



# Utilisation de la PEARO pour la prévision d'ensemble des débits de bassins versants du SPC MedEst : approche multi-modèles hydrologiques.

Alexane LOVAT

Encadrants :

Béatrice VINCENDON

Jean PANSU



*Le Gapeau*

*09/11/2011*

Gapeau en crue à Hyères, le 09 novembre 2011

École Nationale de la Météorologie  
CNRM-GMME-MICADO

17 Juin 2016



# Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Béatrice Vincendon, pour m'avoir donné la chance d'effectuer un stage extrêmement enrichissant et sur un sujet particulièrement intéressant. Je lui adresse ma profonde reconnaissance pour tout ce que j'ai appris à ses côtés ainsi que pour sa patience, sa gentillesse et ses précieux conseils.

Je remercie également Jean Pansu qui a aussi encadré mon travail. Sa vision éclairée sur les questions opérationnelles m'a beaucoup intéressée. Merci à lui aussi pour m'avoir accueillie si chaleureusement lors de mes passages à Aix-en-Provence.

Je tiens à remercier Véronique Ducrocq pour son aide sur la rédaction du rapport ainsi que pour son écoute et sa bienveillance.

Je ne saurais oublier les autres membres du SPC MedEst : André Martin, Francis Martin, Philippe Canova et Vincent Daval pour leur bonne humeur et leur soutien.

Je remercie aussi mes collègues de bureau, Mary, Maxime et Simon pour leur présence.

Finalement, un grand merci à toute l'équipe MICADO pour son accueil et la bonne ambiance de travail qui y règne.



## Résumé

A l'automne, les bassins versants du pourtour méditerranéen subissent des crues récurrentes, rapides et dévastatrices, générées par des épisodes de précipitations intenses. Les enjeux humains et économiques sont forts et justifient l'importance de l'efficacité d'une chaîne de prévision et d'alerte. Des outils de prévision météorologique et de modélisation hydrologique sont développés pour aider les prévisionnistes à établir des prévisions de pluie et de débits suffisamment fiables pour assurer des processus d'alerte efficaces. Mais ces outils fournissent des résultats incertains.

L'incertitude liée à la modélisation hydrologique peut être considérée de différentes façons. Il est classique d'utiliser une approche dite multi-modèles. Dans le cadre de cette étude, le modèle MARINE utilisé au SPC MedEst ainsi que le système couplé surface-hydrologie du CNRM, appelé ISBA-TOP, ont été forcés par des champs de pluie observés (issus des lames d'eau ANTILOPE) afin de réaliser des simulations probabilistes de débits. Une autre manière de considérer l'incertitude sur la modélisation hydrologique est de perturber les paramètres hydrodynamiques du modèle. Une version probabiliste du modèle ISBA-TOP où les paramètres et les conditions initiales de sol peuvent être perturbés a aussi été forcée par des lames d'eau observées dans le cadre de ce stage.

Quant à la prévision, une façon de considérer les incertitudes sur la localisation, la chronologie et l'intensité des événements pluvieux est d'utiliser une approche ensembliste de la prévision, telle que la PEARO développée à Météo-France. Il existe plusieurs manières de générer différents scénarii probables de débits en utilisant une prévision d'ensemble de pluie en entrée : d'un modèle hydrologique déterministe, d'un modèle hydrologique probabiliste et de plusieurs modèles hydrologiques.

L'objectif de ce stage est de réaliser une évaluation de différents systèmes de prévision d'ensemble des débits sur des événements passés, sur trois bassins versants varois d'intérêt pour le SPC MedEst : les bassins du Gapeau, de l'Aille et de l'Endre.



# Résumé long

Les bassins versants du pourtour méditerranéen sont régulièrement touchés par des crues rapides et dévastatrices, générées par des épisodes de précipitations intenses. Ces fortes pluies, associées à une topographie accidentée entraînent la montée rapide du niveau des cours d'eau méditerranéens. La forte variabilité spatio-temporelle des systèmes pluvieux convectifs en jeu rend les crues rapides particulièrement difficiles à modéliser et à prévoir. Le service de Prévision des Crues (SPC) Méditerranée Est (MedEst), en charge de la surveillance des cours d'eau sur le sud est de la France, doit, en plus, tenir compte des enjeux humains et socio-économiques qui sont forts sur ces régions : d'où le besoin de progresser dans la prévision de ces phénomènes.

Les systèmes de prévision d'ensemble à échelle convective tels que la Prévision d'Ensemble AROME, PEARO, permettent de représenter de manière réaliste les champs de précipitations caractéristiques des épisodes fortement pluvieux méditerranéens et d'échantillonner l'incertitude qui les affecte. En effet, les erreurs sur la localisation et l'intensité des noyaux précipitants prévus par des modèles météorologiques de résolution kilométrique tels que le modèle AROME, opérationnel à Météo-France, impactent grandement la réponse hydrologique prévue des cours d'eau concernés.

Des modèles hydrologiques adaptés à l'échelle des bassins affectés et à leur dynamique rapide sont également développés comme le modèle MARINE (Roux et al., 2011) ou le système couplé ISBA-TOP (Bouilloud et al., 2010; Vincendon et al., 2010). Ces modèles sont aussi incertains et des approches probabilistes sont adoptées. Edouard et al. (2016) développe par exemple une version d'ISBA-TOP où les paramètres hydrodynamiques et l'humidité initiale du sol peuvent être perturbés, simulant ainsi un ensemble de débits prévus plutôt qu'un scénario déterministe.

Utiliser la PEARO en entrée de ces modèles permet de réaliser une prévision d'ensemble de débits. L'objectif de cette étude est de réaliser une évaluation de différents systèmes de prévision d'ensemble des débits, en tenant compte de toutes les incertitudes.

Différentes chaînes hydro-météorologiques ont été utilisées (voir Tableau 1) pour simuler les débits de trois cours d'eau varois d'intérêt pour le SPC MedEst, le Gapeau, l'Aille et l'Endre, sur cinq événements passés.

TABLE 1 – Caractéristiques des différents ensembles expérimentés.

Nom de l'expérience	Données de pluie	Modèle hydrologique	Nombre de scénarios
A1	ANTILOPE	MARINE	1
A2	ANTILOPE	ISBA-TOP	1
A3	ANTILOPE	MARINE/ISBA-TOP	2
A4	ANTILOPE	ISBA-TOP probabiliste	20
P1	PEARO	MARINE	12
P2	PEARO	ISBA-TOP	12
P3	PEARO	ISBA-TOP probabiliste	240
P4	PEARO	ISBA-TOP probabiliste/MARINE	252

Les épisodes sélectionnés se sont déroulés entre janvier 2014 et octobre 2015 (16-20 janvier 2014, 04-06 février 2014, 10 février 2014, 25-29 novembre 2014 et 02-03 octobre 2015). Les critères de sélection ont été : une intensité pluvieuse significative (plus de 30mm en 4h à l'échelle du bassin) et une réaction hydrologique pouvant nécessiter le passage opérationnel en Vigilance Crues. L'évaluation statistique des performances

des différentes chaînes hydro-météorologiques est basée sur des scores ensemblistes, adaptés aux sorties de prévisions d'ensemble.

Dans un premier temps, l'incertitude sur les simulations réalisées par les modèles hydrologiques à partir de données de pluies observées est étudiée. MARINE comme ISBA-TOP, sont des modèles hydrologiques événementiels et distribués qui nécessitent des données de précipitations horaires spatialisées en entrée. Les lames d'eau ANTILOPE (ANalyse par spaTiaLisation hOraire des PrÉcipitations) V2 J+1, obtenues par fusion des données des radars et des pluviomètres, sont donc utilisées en tant que pluies de référence pour les pluies observées. Une différence importante entre les deux modèles hydrologiques est que les paramètres du modèle MARINE sont calés, c'est à dire déterminés, pour chaque bassin versant, à partir d'une étude sur des cas passés où différentes valeurs de ces paramètres sont testées puis sélectionnées pour que les débits simulés soient le plus proches possible des débits observés. La version d'ISBA-TOP utilisée, au contraire, est paramétrisée : ses paramètres sont donnés par une relation empirique entre les textures de sols et la valeur du paramètre. ISBA-TOP peut être utilisé dans un mode probabiliste où l'incertitude sur les paramètres est prise en compte.

Les performances des chaînes A1 à A4 sur chaque bassin montrent qu'il n'y a pas un bassin pour lequel les débits sont systématiquement mieux simulés que pour les autres. La figure 1 montre les débits de l'Aille mesurés et simulés par ISBA-TOP et MARINE sur le cas de novembre 2014. Les résultats sont meilleurs pour le modèle MARINE.

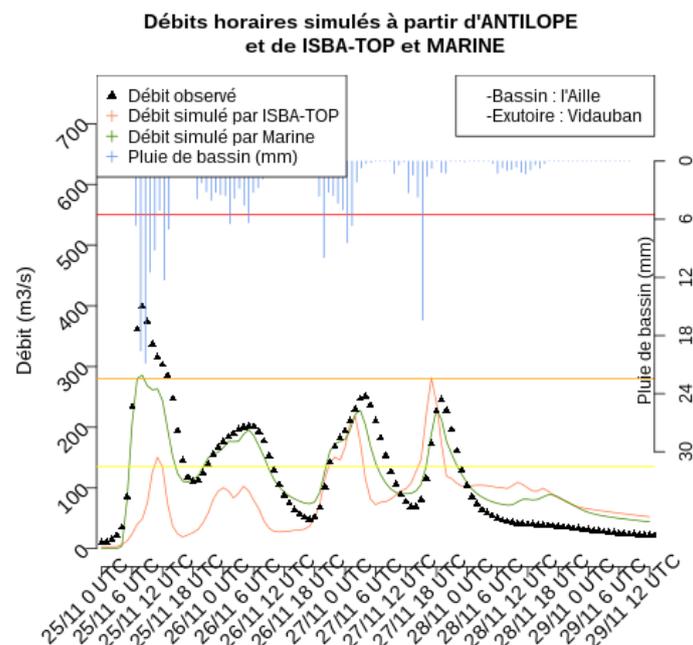


FIGURE 1 – Débit au pas de temps horaire de l'Aille à Vidauban mesuré (triangles noirs) et simulé par MARINE (A1, ligne continue en vert foncé) et par ISBA-TOP (A2, en orange) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014.

Les scores calculés sur les débits horaires, sur tous les événements étudiés et sur les trois bassins, confirment que MARINE permet de mieux simuler les débits qu'ISBA-TOP. Cela montre que le modèle MARINE a été bien calé et que pour ISBA-TOP, il vaut mieux préférer la version probabiliste. Cette version donne, en effet, de meilleurs résultats que la version déterministe d'ISBA-TOP. Le tableau 2 montre le Ranked Probability Score (RPS) et le rapport de l'écart-type sur l'erreur quadratique moyenne (SIGMA/RMSE) pour les ensembles A3 et A4. Le RPS permet d'évaluer un système de prévision d'ensemble sur toute la gamme des valeurs prises par le paramètre étudié (ici le débit), il s'agit d'une mesure de l'écart entre les observations et les prévisions. Sa valeur est 0 pour une prévision parfaite. Le rapport SIGMA/RMSE, lui, indique une sous-dispersion de l'ensemble s'il est inférieur à 1, une sur-dispersion

sinon.

TABLE 2 – Scores sur les débits horaires simulés par les deux ensembles Antilope ISBA-TOP MARINE (A3) et Antilope ISBA-TOP probabiliste (A4) tous bassins et tous cas confondus.

	A3	A4
RPS	0.0450	0.0057
SIGMA / RMSE	0.5090	0.6917

Les ensembles sont tous sous-dispersifs et le meilleur RPS est obtenu pour l'ensemble A4. Pour ce dernier, le rapport SIGMA/RMSE est pourtant supérieur à 1 pour les bassins du Gapeau et de l'Endre. La version probabiliste d'ISBA-TOP conduit à de meilleurs résultats mais mérite d'être améliorée.

Dans un second temps, la prévision des débits à partir de la PEARO est évaluée en comparant les chaînes P1 à P4. Les champs de pluies prévus sont issus des simulations réalisées avec la version pré-opérationnelle de la PEARO qui comprend 12 membres. Celle-ci est lancée à 18 UTC et couvre 36 heures d'échéances. Ces prévisions sont aussi comparées à la prévision de débit obtenue en utilisant en entrée des modèles hydrologiques le scenario de pluie prévu par le modèle AROME déterministe lancé au même moment que la PEARO. Les hydrogrammes obtenus montrent que les débits observés sont souvent compris dans l'enveloppe de l'ensemble des débits prévus (voir figure 2). L'utilisation de la PEARO permet donc d'améliorer la prévision déterministe obtenue avec le modèle AROME.

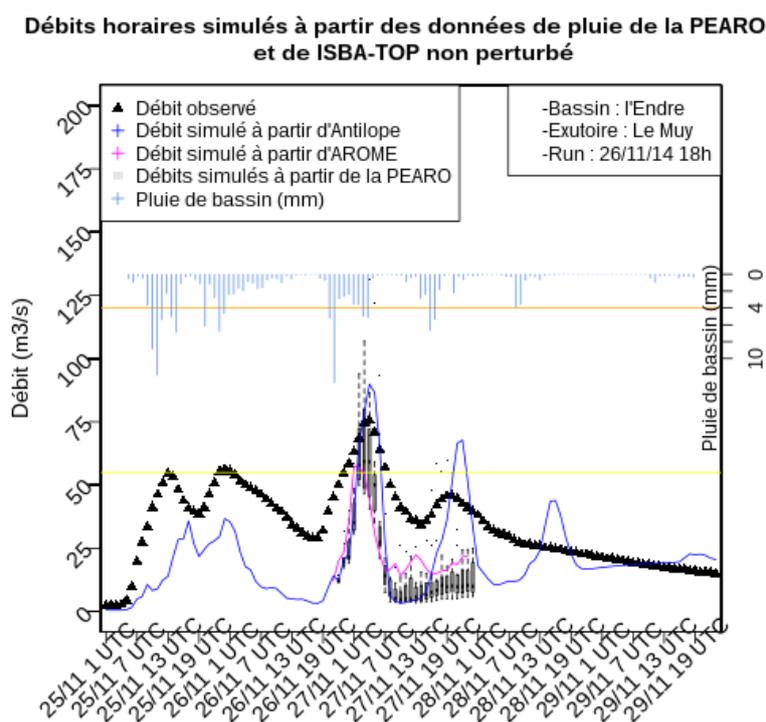


FIGURE 2 – Débit horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs), simulé par ISBA-TOP à partir des données de pluie de la PEARO (boîte à moustaches grises) et de ISBA-TOP non perturbé (lignes bleue et rose continues) entre le 26 novembre 18h et le 27 novembre 23h.

Mais, pour beaucoup de cas, la dispersion des ensembles est souvent trop forte. Le rapport SIGMA/RMSE du tableau 3 confirme ce caractère sous-dispersif pour les quatre ensembles P1, P2, P3 et P4, tous bassins et tous cas confondus. Le meilleur RPS est obtenu pour l'ensemble P3 (PEARO, ISBA-TOP probabiliste).

Des diagrammes de Talagrand ont aussi permis d'évaluer les ensembles P1 à P4. Un diagramme plat indique une fiabilité parfaite, une configuration asymétrique indique un biais de la moyenne de l'ensemble, un

TABLE 3 – Scores sur les débits horaires simulés par les quatre ensembles P1, P2, P3 et P4, tous bassins et tous cas confondus.

	P1	P2	P3	P4
RPS	0,0362	0,0081	0,0069	0,0111
SIGMA/RMSE	0,2477	0,1449	0,3867	0,3565

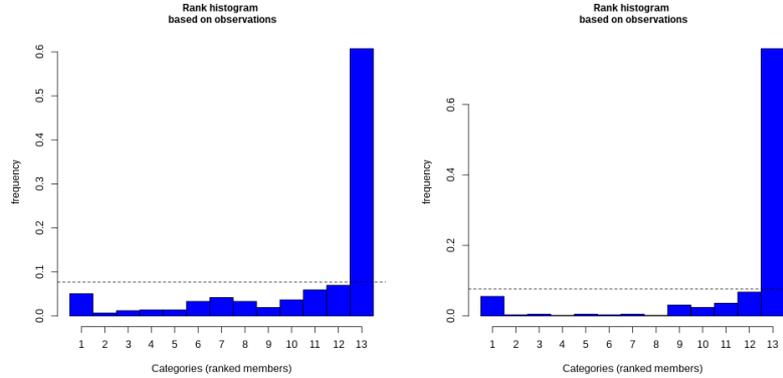
FIGURE 3 – Diagrammes de Talagrand classant l’observation par rapport aux différentes classes des ensembles P1 (PEARO/MARINE) et P2 (PEARO/ISBA-TOP) pour des débits  $> 1m^3/s$  sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d’observations.

diagramme symétrique en U peut résulter d’un ensemble sous-dispersif. La figure 3 montre les diagrammes de Talagrand classant l’observation par rapport aux différentes classes des ensembles P1 et P2.

Les ensembles de débits issus de la PEARO en entrée de MARINE (P1) ou d’ISBA-TOP (P2) ont tendance à sous-estimer les débits par rapport aux observations. Le même biais bas est obtenu en classant les simulations réalisées à partir de pluies observées mais aussi pour les ensembles P3 et P4.

En conclusion, sur les cinq cas et trois bassins étudiés, la PEARO utilisée en entrée de modèles hydrologiques permet d’améliorer la prévision de débits par rapport à l’utilisation du scénario déterministe d’AROME mais un biais bas et une sous-dispersion sont à déplorer. Ce résultat converge avec celui obtenu lors d’une étude précédente sur des bassins cévenols mais une analyse sur un échantillon plus grand reste souhaitable. Il serait aussi intéressant d’utiliser toutes les prévisions disponibles à une échéance donnée comme les prévisions déterministes d’AROME décalées dans le temps, par exemple. De plus, la méthode de perturbation des prévisions de pluies (Vincendon et al., 2010) appliquée aux membres de la PEARO permettrait d’augmenter le nombre de scénarii de précipitations, ce qui pourrait améliorer les prévisions, en particulier le manque de dispersion. Par ailleurs, la version probabiliste d’ISBA-TOP pourraient être améliorée et une approche multi-modèles avec plus de modèles hydrologiques pourrait être envisagée.

Les échéances de 3 h à 36 h de prévision ont été étudiées ici. La prévision de débits à 3-4 heures d’échéance, délai d’anticipation pertinent pour l’intervention des services de secours en situation de crise et d’un grand intérêt pour les SPC comme le SPC Med Est, pourront être considérées en utilisant le modèle de prévision immédiate AROME-PI. Compte tenu du grand nombre de scénarii disponibles pour une échéance donnée, l’approche probabiliste adoptée dans ce stage pourra être réutilisée.

# Extended abstract

Devastating flash-floods, which are triggered by heavy rainfall events, often occur in Mediterranean watersheds during the fall. The mesoscale convective systems associated with these precipitating events and the geomorphologic characteristics of the region can lead to short hydrological response times. The complex space-time features of Mediterranean precipitating systems make flash-floods particularly difficult to model and forecast. The French flood forecasting service of the south-eastern Mediterranean (SPCMedEst) must also handle the high human and socio-economic implications in this region. So there is a need to improve flash-flood forecasting.

Convective scale ensemble prediction systems, such as AROME-EPS, are able to simulate realistic rainfall fields and to sample the associated uncertainty. Indeed, errors on the location and amplitude of the precipitation still affect forecasts from kilometeric resolution meteorological models, such as AROME Météo-France operational model. These errors propagate up to the hydrological response of Mediterranean rivers.

Besides, hydrological models dedicated to fast responding rivers are being developed, among these, the MARINE (Roux et al., 2011) model or the ISBA-TOP coupled system (Bouilloud et al., 2010; Vincendon et al., 2010). Uncertainty also affect those models so some probabilistic approaches are under study. For instance, Edouard et al. (2016) developed a version of ISBA-TOP where the hydrodynamical parameters and the initial soil moisture field can be perturbed so as to produce an ensemble of simulated discharges instead of a single scenario.

The use of AROME-EPS to drive those hydrological models allow to design a discharge ensemble forecast. This study aims at assessing several discharge ensemble forecasting systems considering different sources of uncertainty.

Different hydrometeorological chains (see Table 4) are used so as to simulate the discharge of three rivers, which are monitored by the SPCMedEst, the Gapeau River, the Aille River and the Endre River, on five study cases.

TABLE 4 – Caractéristiques des différents ensembles expérimentés.

Experiment	Rainfall data	Hydrological model	Number of scenarios
A1	ANTILOPE	MARINE	1
A2	ANTILOPE	ISBA-TOP	1
A3	ANTILOPE	MARINE/ISBA-TOP	2
A4	ANTILOPE	Probabilistic ISBA-TOP	20
P1	AROME-EPS	MARINE	12
P2	AROME-EPS	ISBA-TOP	12
P3	AROME-EPS	Probabilistic ISBA-TOP	240
P4	AROME-EPS	Probabilistic ISBA-TOP /MARINE	252

The latter occurred between January 2014 and October 2015 (16-20 January 2014, 04-06 February 2014, 10 February 2014, 25-29 November 2014 et 02-03 October 2015). They were selected because of a significant rainfall intensity (more than 30mm in 4h averaged among a watershed) and an increase of rivers level that could justify an alert. The statistical assessment of the different hydrometeorological chains makes use of probabilistic scores, suitable for ensemble prediction.

The first step of the study concerns hydrological modelling uncertainty. Both MARINE and ISBA-

TOP models are event scale and distributed so spatialized hourly rainfall data are needed to drive them. The Quantitative Precipitation Estimates (QPE) used as a observed and reference data come from a Météo-France system called ANTILOPE which merges radar QPE and raingauges data. An important gap between both hydrological models is that MARINE parameters are calibrated i.e. coming from a tuning procedure aiming to obtain simulated discharges properly matching with measured ones for each watershed and several past cases. On the contrary, the ISBA-TOP version used here is parameterized : the values of the hydrodynamical parameters are given by an established relationship between soil textures and each parameter. ISBA-TOP can also be used in a probabilistic mode where the uncertainty that affect the parameters values is taken into account.

The discharges of each river simulated with the A1 to A4 chains are not systematically closer to the observations for a given watershed. Figure 4 shows the discharges of the Aille River both observed and simulated by ISBA-TOP and MARINE for the November 2014 case. Better results are obtained with the MARINE model.

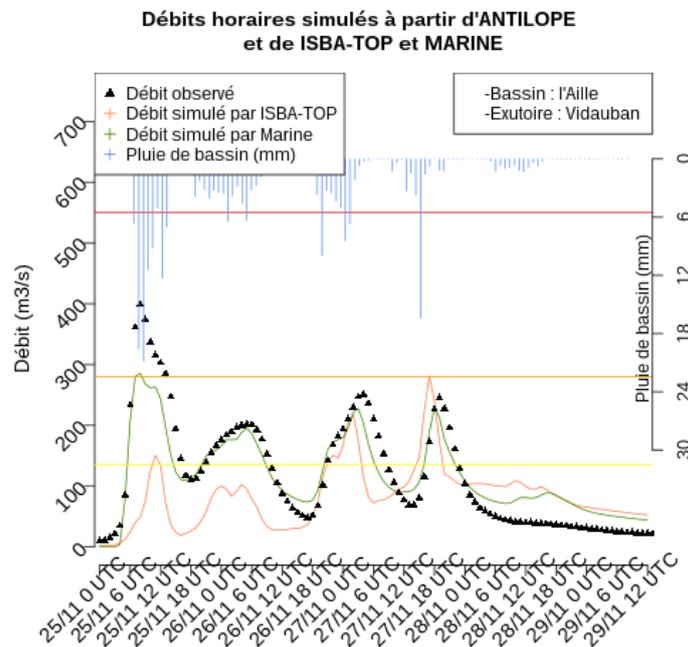


FIGURE 4 – Hourly discharges of the Aille River at Vidauban outlet measured (black triangles) and simulated by MARINE (green line) and ISBA-TOP (yellow line) driven by QPE between the 25 and the 29 November 2014.

The statistical evaluation performed for all study cases and rivers confirms the fact that discharges simulated by MARINE are closer to those observed than the ISBA-TOP ones. This shows that MARINE has been properly calibrated. The scores also demonstrate better results for the probabilistic version of ISBA-TOP than for the deterministic one Table 5 summarizes Ranked Probability Scores (RPS) and the ratio of standard deviation (SIGMA) over Root Mean Square Error (RMSE) computed for the A3 and A4 experiments. RPS measures accuracy of categorical probabilistic forecasts. It quantifies the extent to which a forecast strategy improves predictions with respect to a reference forecast. A perfect forecast has RPS=0. The ratio SIGMA/RMSE indicates a lack of spread in the ensemble forecast if it is below 1 and too much spread if not.

All the ensembles are under-dispersive and the best RPS is obtained with the A4 chain. The A4 chain obtains ratios SIGMA/RMSE exceeding 1 for the Gapeau River and the Endre River. So even if the probabilistic version of ISBA-TOP leads to better results, improvements are still needed.

The second step of this study concerns discharge forecasting. The hydrological models are fed with AROME-EPS forecast and the four ensemble prediction systems P1, P2, P3 et P4 are compared. Rainfall

TABLE 5 – Scores computed for all study cases and rivers for the A3 and A4 chains.

	A3	A4
RPS	0.0450	0.0057
SIGMA / RMSE	0.5090	0.6917

forecasts come from pre-operational version of AROME-EPS which contains 12 members. The 36-h forecasts issued daily start at 18 UTC. The obtained discharge forecasts can be compared with those obtained with the hydrological models driven by rainfall forecasts from AROME, the Météo-France operational model, issued at the same time. The hydrological discharges which were achieved show that the observations are included in the ensemble. Thus the use of AROME-EPS improves the single forecast obtained with only AROME (see figure 5).

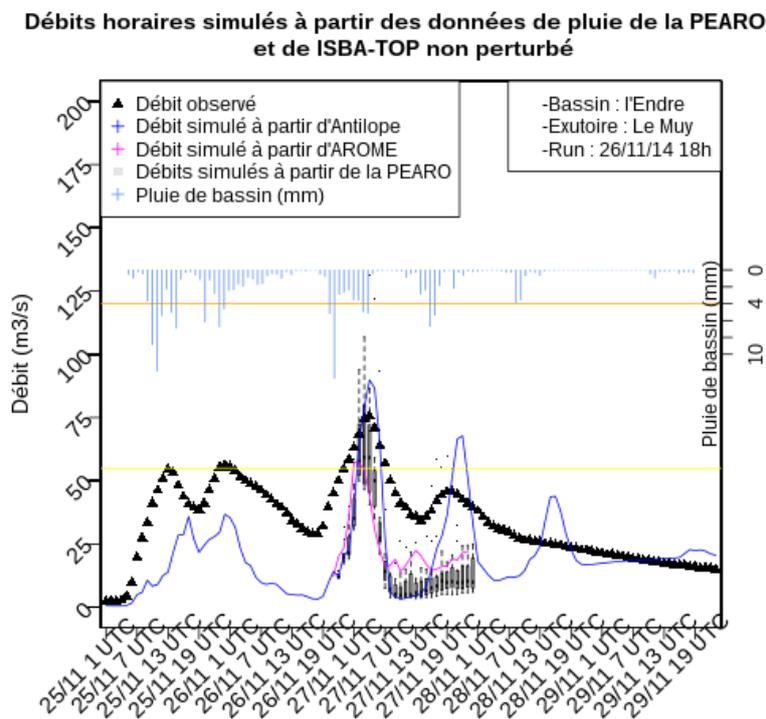


FIGURE 5 – Hourly discharges of the Endre River at Le Muy outlet measured (black triangles) and simulated by ISBA-TOP driven by QPE (blue line), by AROME (pink line) and by AROME-EPS (grey boxplots) between the 26 and the 27 November 2014.

Nevertheless for many cases the spread of the ensembles is too broad. The ratios SIGMA/RMSE shown table 6 highlight the fact that P1, P2, P3 and P4 chains are under-dispersive. The best RPS comes from the P3 experiment.

TABLE 6 – Scores computed for all study cases and rivers for the P1 to P4 chains.

	P1	P2	P3	P4
RPS	0,0362	0,0081	0,0069	0,0111
SIGMA/RMSE	0,2477	0,1449	0,3867	0,3565

Rank histograms (or Talagrand diagrams) have also been used to measure ensemble spreads of P1 to P4 chains. An ensemble with an adequate spread would produce a flat histogram, an asymmetric shape indicates biases and a U-shaped histogram highlights a lack of spread in the ensemble forecast. Figure shows rank histograms based on observations and illustrating the relative frequencies of observed categories.

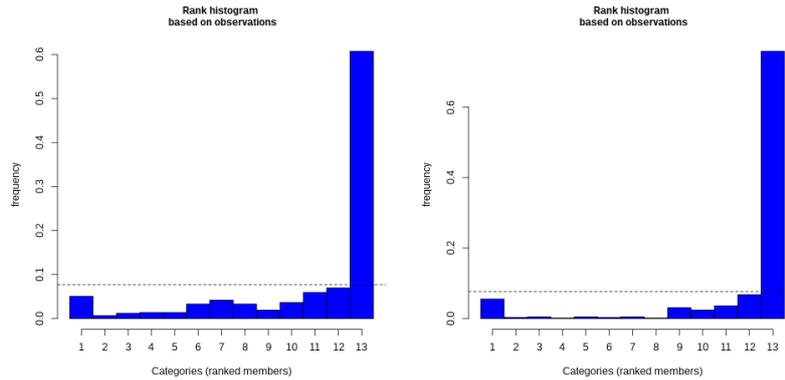


FIGURE 6 – Talagrand diagrams based on observations for discharges  $> 1 \text{ m}^3/\text{s}$  for the ensemble prediction systems P1 and P2. The horizontal dashed line indicates perfect ensembles.

Against observations, P1 and P2 chains tend to under-estimate the discharges values. The same bias is achieved against simulations driven by QPE but also by P3 and P4 experiments.

In summary, for the five case studies and the three studied rivers, the use of AROME-EPS driving hydrological models improves discharge forecasting but there is still a low bias and a lack of spread in these ensembles. This result was already found in a previous study based on the a similar evaluation but on Cevennes Rivers. But it would be worth confirming it on a bigger sample of cases. It would also be interesting to use every forecast available for a same timing, such as time lagged AROME runs for example. Moreover the perturbation method developed to produce short-term precipitation ensemble forecasts from single-value convection-permitting meteorological forecasts (Vincendon et al., 2010) may be applied on every member of AROME-EPS . Indeed increasing the number of scenarii may improve the results and in particular the lack of dispersion. Furthermore the probabilistic version of ISBA-TOP may be improved and using more hydrological models to obtain a real multi-models approach may be considered.

Only the 3 to 36 hours forecast were studied here. But the first three hours are very important to flood forecasting services because they allow early warning for flash floods. These very short ranges may be considered by the use of the AROME-NWC model, which is the Météo-France nowcasting model. The latter is issued with a high time frequency so many scenarii are available for the same range. So the probabilistic approach used in this study may be considered again for discharge nowcasting.

# Sommaire

<b>Résumé long</b>	<b>iii</b>
<b>Extended abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Problématique</b>	<b>3</b>
1.1 SPC MedEst	3
1.2 Vigilance hydrologique	4
1.3 Prévision des crues rapides et incertitudes	5
<b>2 Aspects méthodologiques et données</b>	<b>9</b>
2.1 Domaine d'étude	9
2.1.1 Bassin versant du Gapeau	9
2.1.2 Bassin versant de l'Aille	10
2.1.3 Bassin versant de l'Endre	10
2.2 Episodes étudiés	10
2.3 Données de pluie utilisées	13
2.3.1 Précipitations mesurées : lames d'eau ANTILOPE	13
2.3.2 Précipitations prévues	13
2.4 Données de débits utiles et sources d'incertitudes	14
2.5 Modèles hydrologiques	16
2.5.1 Les différents types de modèles hydrologiques	16
2.5.2 ISBA-TOP et ISBA-TOP probabiliste	17
2.5.3 MARINE	19
2.6 Evaluer la qualité d'une prévision d'ensemble de débits	20
2.6.1 RPS (Rank Probability Score)	22
2.6.2 RPSS (Rank Probability Skill Score)	22
2.6.3 RMSE (Root Mean Square Error) ou erreur quadratique moyenne	22
2.6.4 MAE (Mean Absolute Error) ou erreur moyenne absolue	23
2.6.5 Dispersion	23
2.6.6 Diagramme de Talagrand	23
2.6.7 Boîtes à moustaches	23
2.6.8 Taux de succès, fausses alarmes, non prévisions	24
2.6.9 Courbes ROC	24
<b>3 Evaluation des débits modélisés et prévus</b>	<b>25</b>
3.1 Incertitude liée à la modélisation hydrologique	25
3.1.1 Performance des modèles "déterministes"	25
3.1.2 Version probabiliste d'ISBA-TOP	29
3.1.3 Comparaison des performances d'ISBA-TOP/MARINE et de ISBA-TOP probabiliste	30
3.2 Incertitude sur la prévision	30
3.2.1 Incertitude sur la prévision des pluies	30

3.2.2	Incertitude sur la prévision des pluies et sur la modélisation hydrologique . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Focus sur un évènement du point de vue opérationnel</b>	<b>39</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>45</b>
	<b>Annexes</b>	<b>47</b>
4.1	Annexe 1 : le SPC MedEst . . . . .	47
4.2	Annexe 2 : Domaine d'étude . . . . .	49
4.2.1	GAPEAU . . . . .	49
4.2.2	AILLE . . . . .	50
4.2.3	ENDRE . . . . .	51
4.3	Annexe 3 : Exemple d'abaques vigilance sur le Gapeau . . . . .	52
4.4	Annexe 4 : Bulletin AP-BP du 24 novembre 2014 après-midi . . . . .	52
	<b>Bibliographie</b>	<b>55</b>

# Liste des tableaux

1	Caractéristiques des différents ensembles expérimentés. . . . .	iii
2	Scores sur les débits horaires simulés par les deux ensembles Antilope ISBA-TOP MARINE (A3) et Antilope ISBA-TOP probabiliste (A4) tous bassins et tous cas confondus. . . . .	v
3	Scores sur les débits horaires simulés par les quatre ensembles P1, P2, P3 et P4, tous bassins et tous cas confondus. . . . .	vi
4	Caractéristiques des différents ensembles expérimentés. . . . .	vii
5	Scores computed for all study cases and rivers for the A3 and A4 chains. . . . .	ix
6	Scores computed for all study cases and rivers for the P1 to P4 chains. . . . .	ix
2.1	Tableau des paramètres de calage et bornes pour le SPC MedEst. Il s’agit, hors Strickler, de coefficients multiplicateurs des cartes de paramètre. Pour l’épaisseur du sol, il est normal d’avoir des valeurs inférieures à 1 car l’épaisseur de la base de donnée est très importante (généralement 1 à 2m). . . . .	21
2.2	Caractéristiques des différents ensembles expérimentés. . . . .	21
2.3	Tableau de contingence d’un événement. . . . .	24
3.1	Scores sur les débits horaires simulés par les deux modèles tous bassins et tous cas confondus. . . . .	26
3.2	Scores sur les débits horaires simulés par les deux ensembles tous bassins et tous cas confondus. . . . .	30
3.3	Scores sur les débits horaires simulés par les deux ensembles tous cas confondus, par bassin et tous bassins réunis. . . . .	31
3.4	Scores sur les débits horaires simulés par les trois ensembles PEARO/ISBA-TOP déterministe, PEARO/ISBA-TOP probabiliste et PEARO multi-modèles, tous cas confondus, par bassin et tous bassins réunis. . . . .	34



# Table des figures

1	Débit au pas de temps horaire de l'Aille à Vidauban mesuré (triangles noirs) et simulé par MARINE (A1, ligne continue en vert foncé) et par ISBA-TOP (A2, en orange) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014. . . . .	iv
2	Débit horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs), simulé par ISBA-TOP à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévu par ISBA-TOP à partir du réseau du 26 novembre 18h d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) entre le 26 novembre 21h et le 27 novembre 23h. . . . .	v
3	Diagrammes de Talagrand classant l'observation par rapport aux différentes classes des ensembles P1 (PEARO/MARINE) et P2 (PEARO/ISBA-TOP) pour des débits $> 1m^3/s$ sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d'observations. . . . .	vi
4	Hourly discharges of the Aille River at Vidauban outlet measured (black triangles) and simulated by MARINE (green line) and ISBA-TOP (yellow line) driven by QPE between the 25 and the 29 November 2014. . . . .	viii
5	Hourly discharges of the Endre River at Le Muy outlet measured (black triangles) and simulated by ISBA-TOP driven by QPE (blue line), by AROME (pink line) and by AROME-EPS (grey boxplots) between the 26 and the 27 November 2014. . . . .	ix
6	Talagrand diagrams based on observations for discharges $> 1 m^3/s$ for the ensemble prediction systems P1 and P2. The horizontal dashed line indicates perfect ensembles. . . . .	x
1.1	SPC Méditerranée Est (sans la Corse) . . . . .	4
1.2	Sources d'incertitudes liées à la modélisation hydrologique. D'après Castaings, 2008 . . . . .	6
2.1	Domaine d'étude (source : <a href="http://www.observatoire-eau-paca.org">http://www.observatoire-eau-paca.org</a> ) . . . . .	9
2.2	Inondations dans le Var suite aux orages du 19 janvier 2014 (crédit photo : Var Matin) . . . . .	10
2.3	<i>A gauche</i> : Cumuls de pluies sur 24h observés (lame d'eau Antilope-Rhytmme) entre le 19 janvier 8h et le 20 janvier 8h et <i>à droite</i> : lames d'eau horaire sur le bassin du Gapeau, amont de Hyères St-Eulalie (mm) et évolution des débits ( $m^3/s$ ) à Hyères St-Eulalie (vert), La Crau (orange) et Solliès-Pont (bleu) entre le 16 et le 20 janvier 2014. . . . .	11
2.4	Cumul des précipitations du 04 au 06 février 2014 dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur	11
2.5	Cumul des précipitations du 09 au 10 février 2014 dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur	12
2.7	Hydrogrammes de crue (hauteurs en m) du Réal Martin, du Gapeau et de l'Argens aval - Vigicrues . . . . .	12
2.8	Cumul des précipitations du 02 au 03 octobre 2015 dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur	13
2.9	Exemple de montage d'un courantomètre mécanique (moulinet) . . . . .	15
2.10	Exemple de répartition des points de mesure dans une section de jaugeage (source : Onema, Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires, 09/11) . . . . .	15
2.11	Exemples de supports d'ADCP tractés ou radiocommandés . . . . .	16
2.12	Principe du modèle couplé ISBA-TOP . . . . .	17
2.13	Discrétisations du sol dans ISBA-3L et ISBA-DF, source : Vincendon et al. (2016) . . . . .	18
2.14	Structure du modèle MARINE (source : cours de D. Dartus et H. Roux à l'ENSEEIH, 2015)	19

3.1	Débits horaires du Gapeau à Hyères, de l'Endre au Muy et de l'Aille à Vidauban mesurés (triangles noirs) et simulés par MARINE (A1, ligne continue verte) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 16 et le 20 janvier 2014. . . . .	26
3.2	Débits horaires du Gapeau à Hyères, de l'Endre au Muy et de l'Aille à Vidauban mesurés (triangles noirs) et simulés par MARINE (A1, ligne continue verte) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014. . . . .	27
3.3	Débits horaires de l'Endre au Muy et de l'Aille à Vidauban mesurés (triangles noirs) et simulés par MARINE (A1, ligne continue verte) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 02 et le 04 octobre 2015. . . . .	27
3.4	Débit au pas de temps horaire de l'Aille à Vidauban mesuré (triangles noirs) et simulé par MARINE (A1, ligne continue en vert foncé) et par ISBA-TOP (A2, en orange) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014. . . . .	28
3.5	Débit au pas de temps horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs) et simulé par MARINE (A1, ligne continue en vert foncé) et par ISBA-TOP (A2, en orange) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014. . . . .	28
3.6	Débit au pas de temps horaire du Gapeau à Hyères mesuré (triangles noirs) et simulé par ISBA-TOP déterministe (A2, courbe bleue) et par l'ensemble formé par les perturbations des paramètres d' ISBA-TOP (A4, motif gris) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 16 et le 20 janvier 2014. . . . .	29
3.7	Erreurs quadratiques moyennes et écarts-type des débits horaires simulés par les deux ensembles A3 et A4, tous cas confondus par bassin et pour la globalité des bassins. . . . .	30
3.8	Débit horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs), simulé par ISBA-TOP à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévu par ISBA-TOP à partir du réseau du 26 novembre 18h d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) entre le 26 novembre 21h et le 27 novembre 23h. . . . .	31
3.9	Erreurs quadratiques moyennes et écarts-type des débits horaires simulés par les ensembles P1 et P2 tous cas confondus, par bassin et pour la globalité des bassins. . . . .	32
3.10	Diagrammes de Talagrand classant le scénario déterministe par rapport aux différentes classes des ensembles PEARO/MARINE et PEARO/ISBA-TOP pour des débits $> 1m^3/s$ sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d'observations. . . . .	32
3.11	Diagrammes de Talagrand classant l'observation par rapport aux différentes classes des ensembles PEARO/MARINE et PEARO/ISBA-TOP pour des débits $> 1m^3/s$ sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d'observations. . . . .	33
3.12	Débit horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs), simulé par ISBA-TOP à partir des lames d'eau ANTILOPE (A2, ligne bleue continue), prévu par ISBA-TOP à partir du réseau du 25 novembre 18h d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (P2, boîte à moustaches rouges) et prévu par ISBA-TOP probabiliste à partir du réseau du 25 novembre 18h de la PEARO (P3, boîte à moustaches grises) entre le 25 novembre 21h et le 26 novembre 23h. . . . .	33
3.13	Débits horaires de l'Endre au Muy mesurés (triangles noirs), simulés par ISBA-TOP à partir des lames d'eau ANTILOPE (A2, ligne bleue continue) et AROME (ligne rose), prévu par ISBA-TOP probabiliste (P3, figure de gauche) et par ISBA-TOP probabiliste/MARINE (P4, figure de droite) à partir du réseau du 4 février 2014 18h de la PEARO (boîte à moustaches) entre le 4 février 21h et le 5 février 23h. . . . .	34
3.14	Erreurs quadratiques moyennes et écarts-type des débits horaires simulés par les ensembles PEARO/ISBA-TOP déterministe (P2, bordeaux), PEARO/ISBA-TOP probabiliste (P3, bleu) et PEARO multi-modèles (P4, rouge) tous cas confondus, par bassin et pour la globalité des bassins. . . . .	35

3.15	Diagrammes de Talagrand classant l'observation par rapport aux différentes classes des ensembles P3 PEARO/ISBA-TOP probabiliste et P4 PEARO multi-modèles pour des débits $> 1m^3/s$ sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d'observations. . . . .	35
3.17	Courbes ROC de P1 (en bleu), P2 (en rouge), P3 (en jaune) et P4 (en vert) pour des seuils de 40, 80, 120 et 160 m <sup>3</sup> /s sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figure la probabilité de détection (POD) et en abscisses celle de fausse détection (POFD). Un prévision parfaitement discriminante suivrait les bords gauche et haut du graphique et une prévision non discriminante la bissectrice en tirets bordeaux. . . . .	36
4.1	Scenarii de pluie et de débits prévus à l'heure de l'élaboration de la vigilance le 24 pour la carte de 16 h (réalisation entre 13h30 et 14h30) (heures locales) . . . . .	39
4.2	Indice d'humidité des sols (SWI) le 24 novembre 2014, veille de la crue du Gapeau. . . . .	40
4.3	Retour sur l'événement du 25 novembre 2014 avec les données du SPC à 5h UTC et 11h UTC, en préparation du bulletin vigicrues à rédiger. . . . .	40
4.4	Cumuls de pluies sur 24h issues des lames d'eau ANTILOPE ou de différentes simulations de la PEARO. . . . .	41
4.5	Débits horaires du Gapeau à Hyères mesurés (triangles noirs), simulés à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévus à partir du réseau du 25/11 18UTC d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) novembre 21h et le 26 novembre 23h. Les pluies sont utilisées entrée de MARINE (à gauche) ou d'ISBA-TOP (à droite). . . . .	41
4.6	Pluies de bassin horaires (à gauche) et débits horaires correspondants (à droite) observés (triangles noirs) et simulés par AROME (croix noires) et par les membres de la PEARO à Hyères du 25 novembre 21h au 26 novembre 23h. Chaque membre de la PEARO est caractérisé par une même couleur selon la palette illustrée tout à droite. . . . .	42
4.7	Cumuls de pluies sur 24h (en mm) issues du premier membre de la PEARO entre le 25 novembre 2014 21UTC et le 26 23UTC. . . . .	42
4.8	Débits horaires du Gapeau à Hyères mesurés (triangles noirs), simulés à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévus à partir du réseau du 26/11 18UTC d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) novembre 21h et le 26 novembre 23h. Les pluies sont utilisées entrée de MARINE (à gauche) ou d'ISBA-TOP (à droite). . . . .	43
4.9	SPC Méditerranée Est (sans la Corse) . . . . .	47
4.10	Les différents axes du SPC MedEst. . . . .	48
4.11	Couleurs des vigilances. . . . .	48
4.12	Vigilances sur le bassin versant du Gapeau. . . . .	49
4.13	Bassin versant du Gapeau. . . . .	49
4.14	Bassin versant de l'Aille. . . . .	51
4.15	Bassin versant de l'Endre. . . . .	51
4.16	Abaque vigilances sur le bassin versant du Gapeau, à Hyères. . . . .	52



# Introduction

Les bassins versants méditerranéens sont régulièrement touchés par des crues extrêmement rapides générées par des épisodes de précipitations intenses, surtout en automne. Le risque d'inondation est dès lors une préoccupation majeure, notamment dans le sud-est de la France où les cours d'eau, dont ceux surveillés par le Service de Prévision des Crues (SPC) Méditerranée Est (MedEst) d'Aix-en-Provence, ont des délais de réponse courts en raison, entre autres, de leur topographie accidentée. La prévision de ces crues rapides est rendue difficile par les différentes sources d'incertitudes qui l'affectent. Afin de protéger les personnes et les biens contre les inondations provoquées par ces crues, la prévision des débits nécessite l'utilisation d'outils spécifiques et fiables. Dans ce contexte, il est important d'évaluer l'importance des sources d'incertitudes pesant sur la modélisation hydrologique et sur les prévisions de pluies afin de permettre d'envisager de nouvelles configurations du système opérationnel de prévision de débits utilisé au SPC.

Une approche intégrée météorologique et hydrologique est développée dans le cadre du programme international HYMEX (<http://www.hymex.org/>) pour simuler les crues-éclair. Les modèles météorologiques à échelle kilométrique sont capables de représenter de manière réaliste les champs de pluies caractéristiques des épisodes fortement pluvieux méditerranéens mais des incertitudes persistent sur la localisation et l'intensité des noyaux précipitants, ce qui impacte grandement la réponse hydrologique des cours d'eau concernés. Les systèmes de prévision d'ensemble à échelle convective tels que la Prévision d'ensemble AROME, PEARO qui devrait être opérationnelle d'ici la fin 2016, permettent de prendre en compte cette incertitude. L'utilisation de ces prévisions probabilistes de pluies en entrée d'un modèle hydrologique comme le système couplé ISBA-TOP (Bouilloud et al., 2010; Vincendon et al., 2010), ou MARINE (Roux et al., 2011) permet de réaliser une prévision d'ensemble de débits. Mais la seule incertitude considérée est alors celle sur la prévision des pluies. Cette dernière est certes cruciale pour la prévision des crues rapides mais d'autres incertitudes affectent les débits prévus : celles liées à la connaissance de l'état initial des sols et à la modélisation hydrologique. Des travaux de thèse sont actuellement menés pour prendre en compte ces sources d'incertitude via la construction d'une prévision d'ensemble hydrologique complète, PEARO/ISBA-TOP en perturbant les paramètres hydrodynamiques et l'humidité initiale du sol dans ISBA-TOP (Edouard et al., 2016).

L'objectif de cette étude est de réaliser une évaluation de différents systèmes de prévision d'ensemble des débits, en tenant compte de toutes les incertitudes. Cinq événements passés ont été étudiés sur trois bassins versants varois d'intérêt pour le SPC MedEst : le Gapeau, l'Aille et l'Endre. Les différents systèmes de prévision d'ensemble de débits qui ont été alors évalués reposent sur l'utilisation d'une prévision d'ensemble de pluie en entrée : d'un modèle hydrologique déterministe, d'un modèle hydrologique probabiliste et de plusieurs modèles hydrologiques.

Le premier chapitre de ce rapport présente la problématique et un état de l'art sur la prévision d'ensemble des crues méditerranéennes. Le second chapitre décrit le domaine et les épisodes étudiés, la méthodologie utilisée, de même que les données, les modèles hydrologiques et les scores de vérification choisis. Les résultats sont présentés chapitre 3. D'abord les simulations de débits par les modèles ISBA-TOP (version multi-paramètres ou pas) et MARINE utilisant en entrée les lames d'eau ANTILOPE sont analysées. Puis la partie prévision est abordée. Les scénarii de pluie, issus de la prévision d'ensemble AROME ont été utilisés en entrée des mêmes modèles. Une étude comparative a ainsi pu être menée sur les débits simulés à partir d'une approche multi-paramètres (en utilisant la version probabiliste d'ISBA-TOP) et ceux simulés à partir d'une approche multi-modèles (utilisation simultanée d'ISBA-TOP et de MARINE). Dans le dernier chapitre, un cas est étudié plus en détails sous l'angle de la prévision opérationnelle des crues en

SPC.

# 1 | Problématique

Les épisodes de précipitations intenses surviennent sur le pourtour méditerranéen principalement à l'automne (Ricard et al., 2012). Les orages produisant ces pluies abondantes résultent de la confrontation entre l'air chaud et humide des basses couches provenant de la Méditerranée avec celui plus froid localisé en altitude. En effet, l'apport méditerranéen de chaleur sensible et latente participe au développement et à l'entretien des systèmes convectifs quasi-stationnaires. Le relief joue aussi un rôle déterminant (Ducrocq et al., 2008) en favorisant le blocage de perturbations, en constituant un forçage stationnaire, ou encore par effet de contournement. Ces fortes pluies, associées à une topographie accidentée (vallées étroites et pentues, sols peu épais rapidement saturés, la roche affleurant à certains endroits) entraînent la montée rapide du niveau des rivières méditerranéennes et des cours d'eau parfois éphémères. Les enjeux humains et socio-économiques sont forts et concernent aussi bien les cotes méditerranéennes occidentales qu'orientales (Llasat et al., 2010). L'épisode orageux du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes en est malheureusement une bonne illustration avec 100 mm relevés en une heure à Cannes provoquant ruissellement intense et inondations et faisant une vingtaine de victimes. La vulnérabilité de ces régions face au risque d'inondation ne cesse d'augmenter liée à une population et une urbanisation croissantes. Une vaste campagne d'observations de ces phénomènes extrêmes a aussi été menée à l'automne 2012 dans le cadre du programme international HyMEX Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment, (Ducrocq et al., 2013, 2014) dont l'un des objectifs est d'améliorer la prévision de phénomènes intenses en Méditerranée : fortes pluies et crues rapides, vents forts, sécheresse.

La surveillance opérationnelle des principaux cours d'eau, la production et la diffusion de la vigilance crues sont des missions assurées par l'État au travers du réseau VIGICRUES regroupant le SCHAPI (service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations), les SPC (service de prévision des crues), les unités d'hydrométrie et les cellules de veille hydrologiques. La vigilance crues permet d'avertir les autorités et le public d'un éventuel risque de crues dans les 24 heures à venir, plus ou moins important selon la couleur de vigilance. Elle fait écho au dispositif de vigilance météorologique de Météo-France (en service depuis 2001), et qui donne l'ensemble des risques d'origine météorologique par département. Grâce à ces deux vigilances, préfets, maires et grand public, peuvent se mettre en situation de réagir et de gérer au mieux la situation.

## 1.1 SPC MedEst

Le Service de Prévision des Crues Méditerranée Est, SPC MedEst, assure la surveillance, la prévision et la diffusion de l'information sur les crues pour les Bouches-du-Rhône, le Var, les Alpes-Maritimes ainsi qu'une partie des Alpes de Haute-Provence pour la surveillance du haut bassin du Var (cf. figure 1.1). Il recouvre l'ensemble des bassins versants des cours d'eau côtiers situés à l'est du Rhône, soit 249 km de cours d'eau sur 63 communes, ainsi que la Corse. Il relève de la direction interrégionale de Météo-France et du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), à Toulouse. Plus de détails sont données en Annexe 1.



FIGURE 1.1 – SPC Méditerranée Est (sans la Corse)

## 1.2 Vigilance hydrologique

La réaction des cours d'eau méditerranéens surveillés par le SPC Med-Est dépend de la pluie mais aussi de l'état hydrique du bassin qui peut être expertisé via des indices d'humidité des sols. Dans son expertise, un prévisionniste hydrologue peut utiliser des abaques établis pour des stations hydrologiques de référence sur 06h ou 24h selon le type d'événement (convectif ou stratiforme). Ces abaques sont des graphes de deux types :

- cumul de précipitations moyenné sur le bassin versant, appelé "pluie de bassin", prévu dans les 24h en fonction du débit (ou hauteur) initial(e) à une station de référence,
- pluie de bassin prévue dans les 24h en fonction de l'indice SWI<sup>1</sup> (Soil Water Index) moyen du bassin.

Les autres SPC méditerranéens effectuent un suivi en temps réel et une prévision de débit sur les tronçons essentiellement par propagation à partir des lames d'eau observées (extrapolées ou non) avec acquisition en temps réel au pas de temps 5 minutes.

Au SPC MedEst, la pluie de bassin et son intensité doivent être évaluées par le prévisionniste en fonction des lames d'eau moyennes et maximales prévues par zone AP-BP (zone géographique préalablement définie et correspondant le plus souvent à des contours de bassins versants hydrologiques) fournies dans les Bulletins de Précipitation ou d'informations recueillies directement auprès du prévisionniste météo. On appelle bulletins AP-BP les « avertissements précipitations » (AP) et les « bulletins précipitations » (BP) fournis par Météo-France aux SPC en fonction des besoins du réseau de prévision des crues (dépassement de seuil d'avertissement de précipitations par zone, valeur moyenne par zone, cumul maximal envisagé dans les 24h,...). Les scénarios de précipitations prévus par le modèle ARPEGE et le modèle AROME sont également à disposition du SPC MedEst. Ces scénarii sont utilisés en entrée de modèles à une dimension : le modèle GRP (du Génie Rural pour la Prévision) et le modèle « PQ » basé sur une relation linéaire entre la pluie tombée et le débit à venir. Différentes hypothèses sur les cumuls et la répartition des pluies prévues peuvent être expérimentées pour aider à évaluer une probabilité d'atteindre tel ou tel niveau de crue. En suivi de situation, après contact avec le chef prévisionniste météo régional, une mise à jour des pluies horaires les plus probables pour les 3-6h à venir est possible pour affiner la prévision quantitative sur un bassin fortement exposé. Les modèles PQ et GRP présentent de nombreuses limites (variabilité de la relation linéaire de PQ, initialisation humidité du sol déficiente début d'automne, perte de pertinence en cas de pluie de bassin non homogène). Les tests actuels au SPC sur le modèle GR3H avec initialisation du réservoir de production et du modèle spatialisé MARINE vont amener à la disparition progressive des

1. Le SWI est un indicateur de l'humidité du sol. Il évalue l'état de la réserve en eau d'un sol, par rapport à sa réserve optimale (réserve utile). En reprenant les notations de 2.5.2,  $SWI(en\%) = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$

Lorsque le SWI est voisin de 1, voire supérieur à 1, le sol est humide, tend vers la saturation. Lorsque le SWI tend vers 0, le sol est en état de stress hydrique, voire très sec.

modèles de type PQ.

Par ailleurs, le système Aïga, outil de qualification du risque hydrologique, est utilisé comme aide à la vigilance. Avec pour données d'entrées les lames d'eau 15 minutes de la mosaïque Panthère, il calcule (avec le modèle GR du Cémagref) sur des bassins versants virtuels de  $1\text{km}^2$  des débits unitaires qui sont ensuite agglomérés à l'échelle de bassins versants afin d'en estimer les débits à leurs exutoires. Ces débits, comparés en temps réel à une base statistique hydrologique des débits de crue, sont évalués en fonction de leur probabilité d'apparition, qualifiée en durée de retour.

### 1.3 Prévision des crues rapides et incertitudes

Alors que les crues lentes apparaissent plutôt en plaine dans les grands systèmes fluviaux où les pluies de longue durée permettent l'accumulation de volumes d'eau considérables, les crues rapides concernent plutôt les petits bassins versants de quelques centaines à milliers de  $\text{km}^2$  frappés par des pluies orageuses et entraînant des débits de pointe très importants. Les systèmes pluvieux convectifs qui en sont à l'origine présentent une forte variabilité spatio-temporelle ce qui rend les crues rapides si particulières et si difficiles à modéliser et à prévoir. Des outils dédiés sont nécessaires. Sur le plan météorologique, ils doivent être capable de représenter la très forte variabilité spatio-temporelle des événements fortement précipitants méditerranéens. Sur le plan hydrologique ils doivent être adaptés à l'échelle des bassins affectés et à leur dynamique rapide. L'utilisation de données de précipitations mesurées en entrée de modèles hydrologiques permet de simuler les débits mais ces données sont entachées d'incertitude. Les lames d'eau radar combinent données radar et pluviomètres (via une calibration [Tabary \(2007\)](#); [Tabary et al. \(2007\)](#)) et des progrès importants ont été faits ces dernières années sur la qualité des lames d'eau, même si celles ci restent entachées d'incertitude.

La prévision des débits implique l'utilisation de prévisions météorologiques en entrée de modèles hydrologiques. La mise en service du modèle AROME ([Seity et al., 2011](#)) en 2008, capable de simuler explicitement la convection, a permis une meilleure prévision des systèmes pluvieux convectifs, de même certainement que l'amélioration de sa résolution horizontale en avril dernier (2,5 à 1,3 km). Mais les champs de précipitations prévus demeurent incertains.

Parmi les sources d'incertitudes, on distingue celles que l'on peut réduire grâce à l'apport d'informations de qualité (incertitudes réductibles ou épistémiques) de celles qui restent imprévisibles quelle que soit la quantité de données disponibles (incertitudes irréductibles ou aléatoires). De même, on distingue l'incertitude paramétrique, liée à la description des paramètres du modèle, de l'incertitude de modélisation qui renvoie à l'inadéquation entre le modèle et la réalité (structure, équations, maillage, résolution numérique...). Les incertitudes concernant les champs de pluie prévus sont multiples : représentation incomplète des processus physiques et de leur résolution numérique, paramétrisation des processus sous maille, connaissance imparfaite des conditions initiales ([Buizza et al., 1999](#)), etc. Une façon de considérer les incertitudes sur la localisation, la chronologie et l'intensité des événements pluvieux est d'utiliser une approche ensembliste de la prévision, telle que la PEARO, prévision d'ensemble avec le modèle AROME ([Vié et al., 2011](#); [Nuissier et al., 2012](#); [Bouttier et al., 2012, 2015](#)), développée à Météo-France. Par ailleurs, la méthode des perturbations développée au CNRM ([Audard-Vincendon, 2010](#); [Vincendon et al., 2011](#)) consiste à perturber les précipitations du modèle déterministe AROME à partir d'une climatologie des erreurs préalablement établie. Pour augmenter le nombre de scénarii de pluie, la méthode des perturbations des champs de pluie déterministes peut aussi être appliquée aux membre de la PEARO.

La plupart des systèmes utilisés, en recherche, en mode expérimental, pré-opérationnel ou encore opérationnel, consiste à forcer un modèle hydrologique par une prévision probabiliste météorologique (PEARP, EPS,...), ne tenant compte alors que des incertitudes sur la prévision des précipitations ([Bartholmes & Todini, 2005](#); [Siccardi et al., 2005](#); [Thielen et al., 2009](#); [Vincendon et al., 2011](#)). Les travaux de recherche consacrés à ces questions sont nombreux et la prévision d'ensemble hydrologique fait l'objet d'actions nationales et internationales. Par exemple, le projet HEPEX (Hydrological Ensemble Prediction Experiment, [Schaake et al. \(2008\)](#)), mis en place en 2004, a pour but d'améliorer la prévision d'ensemble pluie/débit en rassemblant les hydrologues et les météorologues autour de questions portant sur la propagation des incertitudes et le couplage hydrométéorologique. En Europe, la coopération scientifique COST (de 2005 à

2010, COST Action 731 : Propagation of Uncertainty in Advanced Meteo-Hydrological Forecast Systems, Zappa et al. (2010)) s'est également intéressée à ces questions à des fins de prévision hydrométéorologique. Depuis 2002, la Communauté Européenne a mis en place un système d'alerte européen pour les crues (EFAS : European Flood Alert System, Thielen et al. (2009)) développé en Italie au Joint Research Center.

Mais la seule incertitude considérée dans ces systèmes est alors celle sur les pluies prévues. Cette dernière est certes cruciale pour la prévision des crues rapides mais d'autres incertitudes affectent les débits prévus, notamment les incertitudes liées à la modélisation hydrologique (Figure 1.2 décrivant la propagation des erreurs dans un modèle hydrologique).

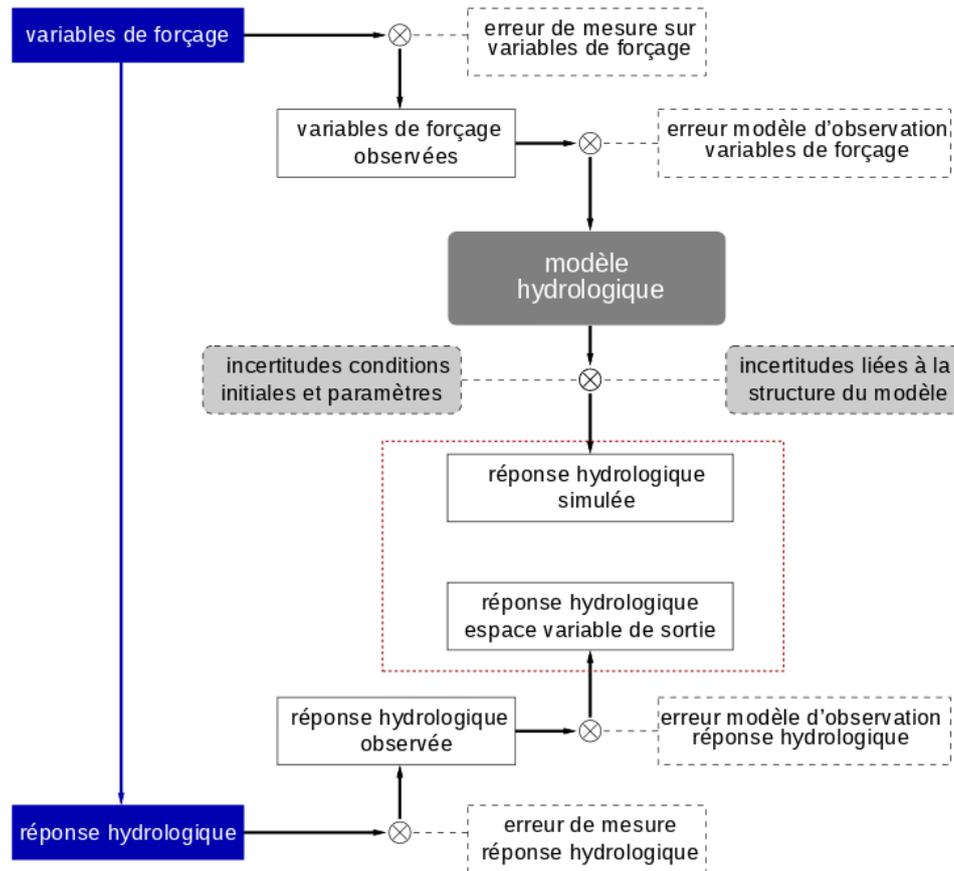


FIGURE 1.2 – Sources d'incertitudes liées à la modélisation hydrologique. D'après Castaings, 2008

Les modèles hydrologiques sont des outils numériques dédiés à la simulation des différents mécanismes physiques du cycle terrestre de l'eau, permettant de modéliser l'évolution des débits des cours d'eau. Il existe différents types de modèles hydrologiques qui peuvent être classés selon leur discrétisation spatiale et temporelle et leur description des processus. Cependant tous les modèles hydrologiques ne sont pas adaptés à tous les types de crue. Pour les crues méditerranéennes à dynamique rapide, les modèles distribués (où les bassins versants sont discrétisés en sous-unités où les processus physiques sont traités) sont mieux adaptés car ils tiennent compte des hétérogénéités des caractéristiques des bassins versants considérés (Ayrat et al., 2005).

Les incertitudes dues à la modélisation hydrologique ou à la connaissance de l'état du sol au départ peuvent être corrigées en post-traitement par des stratégies de correction de biais (analyses bayésiennes, régressions...). Zalachori et al. (2012) comparent plusieurs stratégies de correction de biais. Outre la correction de biais, les post-traitements peuvent aussi permettre de quantifier l'incertitude de modélisation hydrologique ou l'intégralité de l'incertitude (relative aux pluies et à la modélisation hydrologique) (Olsson & Lindström (2008); Weerts et al. (2011); Zalachori et al. (2012); Hashino et al. (2006) etc...). De plus, utiliser plusieurs modèles hydrologiques permet de s'affranchir des états initiaux et des stratégies de

modélisation propres à chaque modèle. Une autre façon de faire est de construire un ensemble hydrologique à partir de perturbations des paramètres, mais cette méthode n'est pas répandue (Liu et al., 2012). Les travaux de thèse de Simon Edouard qui se termineront au dernier trimestre 2016 s'intéressent aux incertitudes liées à la connaissance de l'état initial des sols et à la modélisation hydrologique au sein d'une prévision d'ensemble hydrologique complète (PEARO/ISBA-TOP). Ce travail de stage vient compléter ces travaux, en s'intéressant à d'autres bassins versants. Il fait aussi écho au projet CHROME, commun à Météo-France et au SCHAPI (Chaîne de prévision HydRométéOrologique Multi-Ensemble) qui vise à coupler des prévisions d'ensemble météorologiques avec une modélisation hydrologique multi-modèles. Le but du projet CHROME est d'améliorer la Vigilance Crue et la prévision hydrologique en contexte méditerranéen sur trois bassins cévenols connexes : le Gardon, l'Ardèche et la Cèze (500 à 20 00  $km^2$ ), en prenant en compte les incertitudes liées à la prévision météorologique et à la modélisation hydrologique. A ce jour, les prévisions météo issues de la méthode des perturbations de Audard-Vincendon (2010) sont utilisées en entrée de 4 modèles hydrologiques distribués. Parmi eux, on retrouve le modèle ISBA-TOP développé au CNRM mais aussi d'autres modèles comme : ALHTAIR, développé au SPC Grand Delta, MARINE, développé à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse et SCS-LR d'Hydro Sciences Montpellier.

L'objectif de cette étude est de réaliser une évaluation de différents systèmes de prévision d'ensemble des débits sur des événements passés, sur trois bassins versants varois d'intérêt pour le SPC MedEst : les bassins du Gapeau, de l'Aille et de l'Endre. Les différents systèmes de prévision d'ensemble étant générés par l'utilisation d'une prévision d'ensemble de pluie en entrée : d'un modèle hydrologique déterministe, d'un modèle hydrologique probabiliste et de plusieurs modèles hydrologiques.



## 2 | Aspects méthodologiques et données

Ce stage de cinq mois s'est déroulé au sein du Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle (GMME) du CNRM, qui conduit des recherches sur les phénomènes de méso-échelle et micro-échelle dans les domaines de l'atmosphère et des surfaces continentales. Au sein de ce groupe, l'équipe MICADO s'intéresse à la convection profonde aux latitudes tempérées et aux systèmes fortement précipitants en région méditerranéenne. Une de ses activités est le couplage hydrométéorologique pour la prévision des crues-éclair. Le travail relaté dans ce rapport s'inscrit donc dans la thématique de la prévision des crues rapides développée à GMME/MICADO. Ce chapitre décrit le domaine et les épisodes ainsi que les données et les modèles utilisés au cours de ce travail.

### 2.1 Domaine d'étude

Le trois bassins versants varois étudiés au cours de ce stage, ceux du Gapeau, de l'Endre et de l'Aille (figure 2.1), sont décrits brièvement dans cette section. On trouvera une description détaillée en Annexe 2.

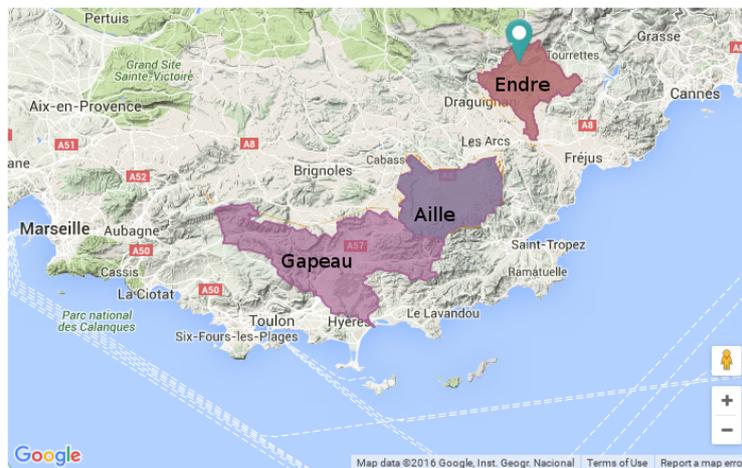


FIGURE 2.1 – Domaine d'étude (source : <http://www.observatoire-eau-paca.org>)

#### 2.1.1 Bassin versant du Gapeau

Le bassin versant du Gapeau s'étend sur  $548 \text{ km}^2$ , concerne 23 communes et possède trois cours d'eau principaux : le Gapeau, le Réal Martin et le Réal Collobrier. Entièrement intégré dans le département du Var, il couvre une zone calcaire en partie karstique du Nord de Toulon, une partie du massif des Maures, et traverse la plaine côtière de Hyères-les-Palmiers avant de se jeter dans la Méditerranée. Comme la plupart des fleuves côtiers de la région, le Gapeau est marqué par un réseau hydrographique fortement influencé par la géologie et le relief, avec une partie amont à pente assez forte puis une plaine alluviale large et enfin une plaine côtière, constituant autrefois une vaste zone de divagation du lit.

### 2.1.2 Bassin versant de l'Aille

L'Aille est un des affluents de l'Argens et traverse l'ensemble de la Plaine des Maures. Le bassin a une superficie de près de  $280 \text{ km}^2$ . Sa forme d'amphithéâtre favorise la genèse de crues importantes et rapides, bien que la déclivité du bassin soit globalement faible. Le sous sol est majoritairement composé de roches imperméables, ce qui engendre un fort ruissellement en cas de forte pluie. De plus, la morphologie du réseau hydrographique de l'Aille fait que de nombreux affluents se rejoignent sur un tronçon assez court, favorisant les débordements en aval de ce tronçon.

### 2.1.3 Bassin versant de l'Endre

L'Endre est un autre affluent de l'Argens. Sa superficie est de l'ordre de  $190 \text{ km}^2$ . La vallée de l'Endre est peu occupée et la partie basse de la plaine de l'Endre est occupée par des plans d'eau. La végétation qui borde le cours d'eau est bien fournie et des alluvions (dépôts de débris de sable, vase ou argile) y ont formé des sortes de petites plages.

## 2.2 Episodes étudiés

Les cas d'étude ont été sélectionnés parce qu'ils représentaient des événements à intensité pluvieuse potentiellement significative ( $>30\text{mm}$  en 4h à l'échelle du bassin) et ayant entraîné une réaction hydrologique. Il fallait aussi que les données de prévision d'ensemble soient disponibles. De plus, ces événements avaient conduit à des interrogations en opérationnel quant à un passage en Vigilance Crues. Les épisodes de crues rapides étudiés ici se sont déroulés : du 16 au 20 janvier 2014, du 04 au 06 février 2014, le 10 février 2014, du 25 au 29 novembre 2014 et du 02 au 03 octobre 2015. La situation météorologique et les conséquences hydrologiques sont décrites dans cette partie.



FIGURE 2.2 – Inondations dans le Var suite aux orages du 19 janvier 2014 (crédit photo : Var Matin)

#### 16 au 20 janvier 2014

Début janvier 2014, les sols de la région sont déjà très humides. Un premier épisode pluvieux affecte la région le 16 janvier, entraînant une faible hausse du niveau des cours d'eau. Des pluies modérées à fortes, continues et régulières, surviennent ensuite le samedi 18 janvier. Puis, le 19 janvier, le Var est concerné par un système orageux de petite dimension mais à formation rétrograde (orage qui se réalimente de manière persistante sur son flanc arrière, ce qui rend le système convectif quasi stationnaire). Les cellules orageuses se sont succédées sur une même zone, entraînant des lames d'eau très importantes des Iles d'Hyères vers le bassin des Réal Collobrier et Réal Martin, puis sur l'amont de l'Aille et la Bresque, affluents de l'Argens. L'épicentre ( $200$  à  $300 \text{ mm}$ ) se situait vers la Londe des Maures.

Après une faible montée de son débit le 16 janvier, le Gapeau subit une crue plus marquée le 18 janvier après-midi avec un pic à  $260 \text{ m}^3/\text{s}$  à Hyères qui est à l'origine d'un premier débordement au déversoir de Plan-du-Pont entre 19h et 21h. Le lendemain, dimanche 19 janvier, à La Crau, les débordements du Réal Martin ont donné une hauteur maximale mesurée de  $4,24\text{m}$  (soit  $74 \text{ cm}$  de plus que la hauteur de premier débordement). Il s'agit de la plus forte hauteur mesurée depuis 48 ans. Ceci reflète l'ampleur « exceptionnelle » de l'inondation en lit majeur du Réal Martin et de son affluent principal, le Réal Collobrier.

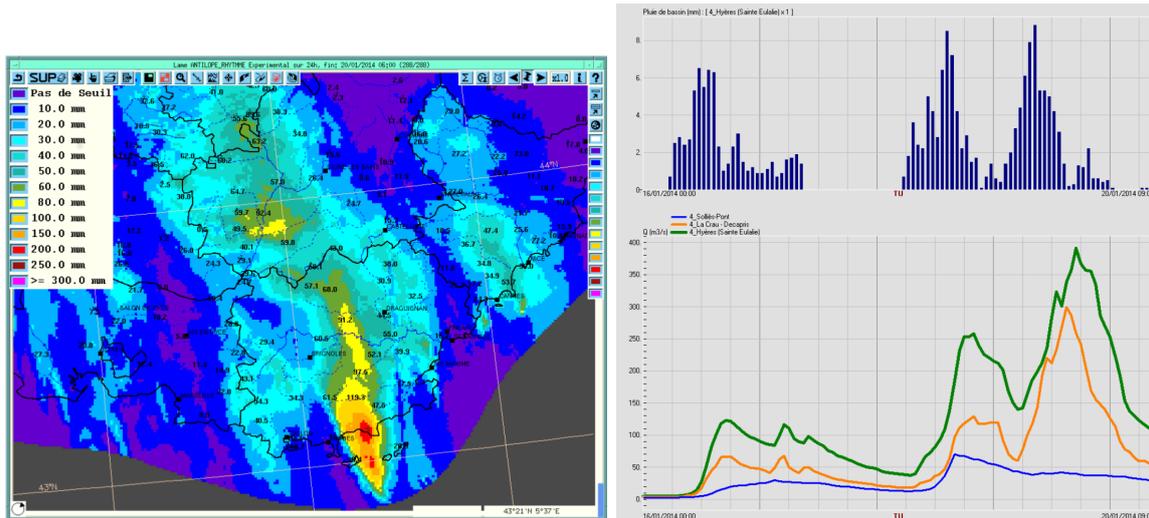


FIGURE 2.3 – *A gauche* : Cumuls de pluies sur 24h observés (lame d'eau Antilope-Rhythme) entre le 19 janvier 8h et le 20 janvier 8h et *à droite* : lames d'eau horaire sur le bassin du Gapeau, amont de Hyères St-Eulalie (mm) et évolution des débits ( $m^3/s$ ) à Hyères St-Eulalie (vert), La Crau (orange) et Solliès-Pont (bleu) entre le 16 et le 20 janvier 2014.

A Hyères St Eulalie, les débordements débutent pour une hauteur de 2,50m (un peu moins de 300  $m^3/s$ ). Le pic du 19 janvier à 18h atteint 3 mètres, valeur au moins cinquantennale pour cette station. Les débits du Gapeau sont situés dans la gamme de vigilance Orange entre le 19 à 12h30 et le 20 à 1h.

Cet épisode a entraîné dans le Var la mort de deux personnes, 200 millions d'euros de dégâts dans 19 communes, 300 entreprises et 260 exploitations agricoles sinistrées et des dizaines de maisons noyées.

#### 04 au 06 février 2014

Le 5 février, la région Paca est affectée par des cumuls de pluies entre 10 et plus de 70 mm, les plus fortes valeurs se retrouvant à nouveau sur le Var (71 mm à Sainte-Maxime, 63 mm à Plan-d'Aups, 54 mm à Méounes-les-Montrieux).



FIGURE 2.4 – Cumul des précipitations du 04 au 06 février 2014 dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur

#### 10 février 2014

Le Var et les Alpes-Maritimes sont une nouvelle fois touchés (100 mm à Bormes-les-Mimosas (83), 80 mm à Méounes-les-Montrieux (83), 87 mm à Antibes (06), 79 mm à Cannes et Peille (06)), Le 8, le train des Pignes déraile entre Annot et Saint-Benoît dans les Alpes-de-Haute-Provence provoquant 2 morts et un blessé grave, un rocher s'étant détaché avant de percuter la rame. Le Gapeau, l'Argens aval et la Nartuby dans le Var, ainsi que l'Huveaune dans les Bouches-du-Rhône ont été placés en vigilance orange pour crues.

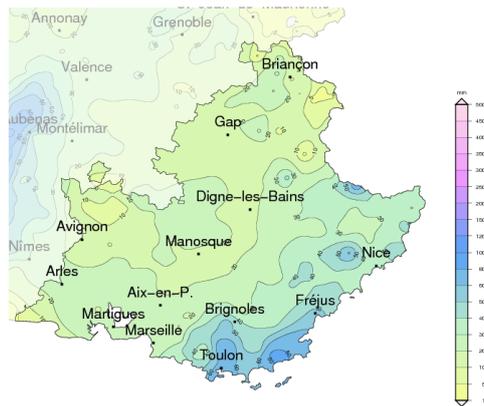


FIGURE 2.5 – Cumul des précipitations du 09 au 10 février 2014 dans la région Provence-Alpes-Côte-d’Azur

### 25 au 29 novembre 2014

Un forçage d’altitude lié à un thalweg remontant des Baléares a provoqué des pluies orageuses intenses du Golfe du Lion à la Provence à partir du 25 novembre. C’est sur le Var que les orages ont été les plus fréquents. On a relevé des lames d’eau significatives : 202 mm à Collobrières, 167 mm au Luc et 165 mm à Hyères ainsi que d’autres valeurs dépassant 100 mm au sud du département. Ces pluies ont généré de nombreuses inondations dans le sud varois. Les phénomènes de ruissellement sont fréquents et des crues significatives des fleuves côtiers ont été relevées aussi bien sur le Gapeau et ses affluents que sur l’Argens aval. Les cours d’eau du réseau secondaire (Gisèle, Môle par exemple) sont également très impactés. (figure 2.7)

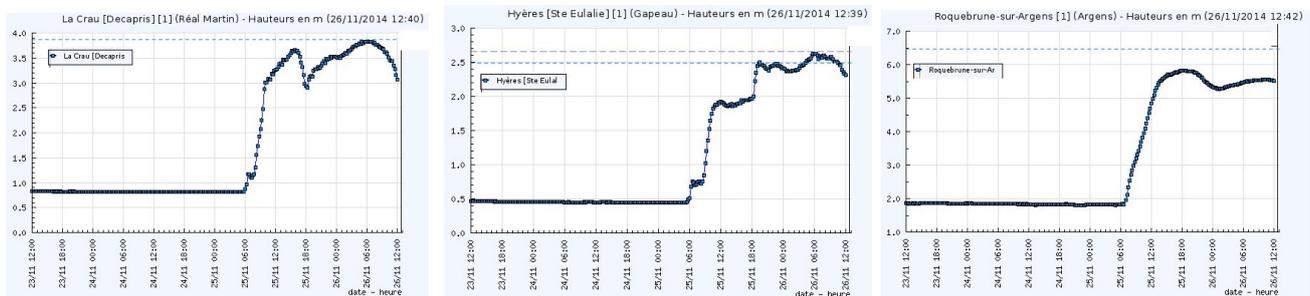


FIGURE 2.7 – Hydrogrammes de crue (hauteurs en m) du Réal Martin, du Gapeau et de l’Argens aval - Vigicrues

Dans la nuit du 25 au 26 novembre, d’autres orages peu mobiles ont éclot dans les Bouches-du-Rhône. C’est la région de Salon-de-Provence qui a été la plus concernée. Des cumuls de pluie de 60/70 mm ont été ponctuellement enregistrés.

### 02 au 03 octobre 2015

Une dégradation orageuse marquée a concerné l’extrême Est du Var. Lors de son passage sur le massif de l’Estérel, son activité s’est renforcée par effet orographique et par une alimentation en basses couches d’air chaud et humide en provenance de la mer. Elle s’est intensifiée le long du littoral, selon un axe Mandelieu – Cannes – Antibes à partir de 20 h et a terminé son développement vers Nice peu après 21h45 le 3 octobre. Le système orageux multicellulaire (MCS) rétrograde a causé la mort d’au moins 17 personnes. On a relevé à la station de Cannes 195 mm en 24 h dont : 175 mm en 2 h, 109 mm en 1 h, 68 mm puis 57 mm en 30 min. Les sols étaient déjà très humides puisqu’il était tombé près d’une centaine de mm les 1er et 2 octobre sur ce même secteur. Au total sur les 3 jours du 1er au 3 octobre on a mesuré : 284 mm à Cannes, 271 mm à Mandelieu, 215 mm à Antibes, 203 mm à Nice (figure 2.8).

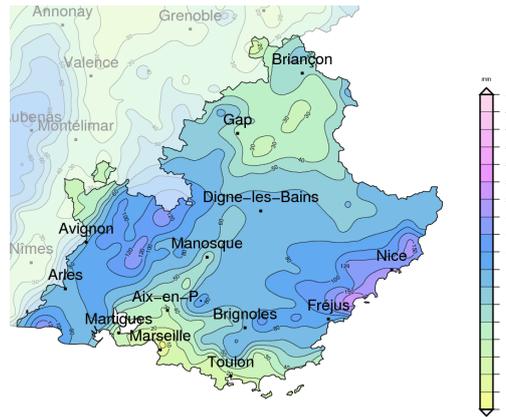


FIGURE 2.8 – Cumul des précipitations du 02 au 03 octobre 2015 dans la région Provence-Alpes-Côte-d’Azur

## 2.3 Données de pluie utilisées

Pour la simulation des crues méditerranéennes ou pour leur prévision, des données spatialisées de précipitation au pas de temps horaire sont nécessaires (voir [Bouilloud et al. \(2010\)](#) par exemple).

### 2.3.1 Précipitations mesurées : lames d’eau ANTILOPE

Les lames d’eau ANTILOPE (ANalyse par spaTiaLisation hOraire des PrÉcipitations) V2 J+1, obtenues par fusion des données des radars et des pluviomètres, sont utilisées en tant que pluies de référence pour les pluies observées dans la suite de l’étude. Dans cette version V2, la méthode de spatialisation est la même pour la partie stratiforme et la partie convective des précipitations, il s’agit d’un krigeage avec dérive externe. Les données des pluviomètres sont krigées avec comme dérive externe les lames d’eau radar. Les estimations de pluies obtenues ont une extension spatiale proche de celle du radar mais avec des valeurs ajustées en fonction des cumuls pluviométriques observés.

### 2.3.2 Précipitations prévues

#### Prévision de pluie déterministe issue du modèle AROME

AROME ([Seity et al., 2011](#)) est le modèle de prévision numérique du temps non hydrostatique à maille fine exploité en opérationnel à Météo-France depuis décembre 2008. Sa résolution horizontale est actuellement de 1,3 km mais elle était de 2,5 km en 2014 et 2015. C’est donc avec cette résolution qu’ont été produits les scénarios de pluie prévus en opérationnel pour nos cas d’étude. AROME résulte de nombreuses collaborations, nationales et internationales, et des dernières avancées en modélisation atmosphérique. En effet, les paramétrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Méso-NH alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique d’ALADIN. Il a démontré sa capacité à reproduire des phénomènes convectifs de fine échelle. Les prévisions de précipitations de ce modèle souffrent néanmoins d’incertitudes. La prévision déterministe n’est pas parfaite parce que la description de l’état initial de l’atmosphère et le modèle sont tous deux incertains : erreurs de mesure, zones sans données, paramètres de modélisation,... Les lois régissant l’évolution de l’atmosphère, système chaotique, amplifient ces défauts. De petites erreurs sur l’analyse peuvent ainsi fausser la prévision, et ce d’autant plus que l’échéance visée est lointaine. Pour les systèmes fortement précipitants méditerranéens, [Vincendon et al. \(2010\)](#), entre autres, ont montré que des erreurs de prévision subsistent surtout sur la localisation et l’intensité des systèmes précipitants. Ces erreurs se propagent le long de la chaîne de prévision des crues en s’amplifiant. Elles peuvent être particulièrement pénalisantes pour les petits bassins. Il est donc essentiel d’utiliser un système de prévision de précipitations prenant en compte ces incertitudes.

## Champs de pluie de la prévision d'ensemble AROME

Les prévisionnistes utilisent de plus en plus une méthode qui permet de tenir compte de ces incertitudes : la prévision d'ensemble, qui est une approche probabiliste. Elle propose plusieurs scénarios (aussi appelés "membres") de l'évolution des variables météorologiques en prenant en compte les incertitudes sur la description de l'état initial de l'atmosphère ainsi que celles inhérentes au modèle météorologique (structure du modèle, paramétrisations des processus). La prévision d'ensemble AROME (PEARO) est un ensemble à l'échelle convective et à courte échéance. Elle a été développée au CNRM à la suite de plusieurs études. D'abord, [Vié et al. \(2011\)](#) ont évalué l'impact des incertitudes affectant les conditions initiales à l'échelle convective et celui de l'incertitude liée aux conditions de grande échelle appliquées aux limites latérales du modèle AROME. Trois ensembles ont été comparés : un premier où le modèle AROME utilise en conditions aux limites latérales les membres de la PEARP (Prévision d'Ensemble ARPège) ; un autre où les conditions initiales sont modifiées à l'échelle convective à l'aide d'une technique d'assimilation de données et un dernier où les deux méthodes sont appliquées. Une conclusion est que les incertitudes sur les conditions limites latérales ont un impact plus long que celles sur les conditions initiales à l'échelle convective. L'impact de ces dernières n'apparaît plus au delà de 12h. Cet impact dépend toutefois fortement du contexte synoptique. Par ailleurs, une méthode de physique stochastique a été testée ([Bouttier et al., 2012](#)). Il s'agit d'une adaptation du schéma SPPT (Stochastic Perturbation of Physics Tendencies) du ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast). Les tendances utilisées dans les équations des processus physiques sont perturbées de manière statistique (de telle manière que leur moyenne soit nulle). Ces perturbations stochastiques ont des effets systématiques sur les sorties de modèle. La performance probabiliste de la PEARO se trouve améliorée significativement, quand on compare ses résultats avec les observations durant une période de 2 semaines. Dans la version pré-opérationnelle de la PEARO, les conditions initiales sont basées sur l'assimilation d'ensemble ARPEGE. Les tendances physiques d'AROME subissent une perturbation stochastique. Ses conditions aux limites viennent de membres de la PEARP (sélection par clustering). Compte-tenu du coût numérique des prévisions, la PEARO contient en général une dizaine de simulations. Dans cette étude, les champs de pluies PEARO sont issus des simulations réalisées avec la version pré-opérationnelle de la PEARO qui comprend 12 membres. Celle-ci est lancée à 18 UTC et couvre 36 heures d'échéances.

### Problématique dans le cadre de cette étude :

L'objectif de ce stage est d'utiliser la PEARO pour prévoir des débits de cours d'eau varois. Une expérience de référence est d'abord réalisée en utilisant les lames d'eau ANTILOPE en entrée des modèles ISBA-TOP (version multi-paramètres ou pas) et MARINE. Pour la partie prévision, les scénarii de pluie, issus de la prévision d'ensemble d'AROME sont utilisés en entrée des mêmes modèles. Il est donc possible de comparer les débits simulés à partir d'une approche multi-paramètres (en utilisant la version probabiliste d'ISBA-TOP) ou d'une approche multi-modèles (utilisation simultanée d'ISBA-TOP et de Marine).

Pour chacun des événements sélectionnés (voir chapitre 2.2), les lames d'eau ANTILOPE ont été extraites et des simulations de la PEARO ont été réalisées afin de couvrir temporellement l'épisode pluvieux. Les simulations de la PEARO démarrent systématiquement un jour donné à 18UTC. Les trois premières heures de prévision ne sont pas utilisées car elles correspondent au spin-up du modèle (temps de relaxation des modèles météorologiques correspondant au temps de retour à « l'équilibre interne du modèle » après l'assimilation). Il a donc fallu comparer les débits simulés aux débits prévus entre le jour J à 21 UTC et le jour J+2 à 06 UTC.

## 2.4 Données de débits utiles et sources d'incertitudes

Aujourd'hui, le SPC Med-Est récupère les données de stations limnimétriques (mesures de hauteur d'eau dans les cours d'eau) sur les bassins de l'Arc, l'Huveaune, le Gapeau, l'Argens et le Var. La fréquence des requêtes auprès des stations, par téléphonie ou radio, est adaptée à la situation hydrométéorologique (de la 1/2 heure à 3 heures).

La DREAL PACA est en charge de l'hydrométrie et de la gestion du réseau de mesures. Elle garantit le bon fonctionnement des stations via leur maintenance préventive et curative. Elle définit les courbes de tarage (relation hauteur – débit) et assure la critique et l'archivage des données dans la banque hydrométrique nationale. En période de crue, elle réalise ou fait réaliser par un prestataire spécialisé des jaugeages pour améliorer la connaissance des forts débits aux principales stations de mesure du réseau. Il existe une convention entre la DREAL PACA et Météo-France décrivant les conditions d'intervention selon les besoins spécifiques de la prévision des crues.

Le débit étant égal au produit de la vitesse moyenne de l'écoulement par la surface de la section mouillée, il est nécessaire d'effectuer des mesures de vitesses de l'écoulement en différents points de la rivière (figure 2.10) et de bien connaître la forme de la rivière et de son lit (celui-ci pouvant être modifié après le passage de fortes pluies et de crues importantes). Les mesures de vitesse d'écoulement peuvent être faites à l'aide de courantomètres, figure 2.9, ou par ADCP.

Un courantomètre (ou vélocimètre) est un appareil de mesure permettant de déterminer la vitesse en un point de l'écoulement. La mesure peut être mécanique (hélice ou moulinet), électro-magnétique ou acoustique à effet Doppler (ADV, ADC). Pour le jaugeage à pied, il est généralement monté sur une perche graduée et déployé sur des verticales réparties en travers de la section de mesure.



FIGURE 2.9 – Exemple de montage d'un courantomètre mécanique (moulinet)

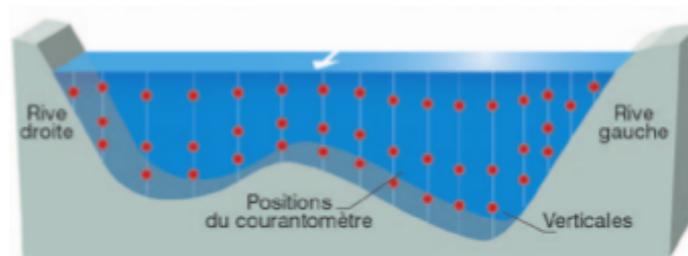


FIGURE 2.10 – Exemple de répartition des points de mesure dans une section de jaugeage (source : Onema, Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires, 09/11)

L'Onéma donne les valeurs suivantes pour l'incertitude de mesure de ces courantomètres (niveau de confiance à 95 %) :

- 7 % dans les bonnes conditions d'application et en régime permanent,
- 15 % en conditions plus défavorables, voire jusqu'à 30 % si l'appareil est mal étalonné ou le régime hydraulique variable.

Un ADCP (profileur acoustique de courant à effet Doppler, figure 2.11) immergé à la surface de l'écoulement effectue rapidement des mesures de profondeur et de vitesses sur toute la verticale. L'appareil émet des ultrasons qui sont renvoyés par les particules en suspension et par le fond. A partir de leur temps de retour, on peut mesurer la profondeur du fond et les vitesses. L'analyse de l'effet Doppler donne des informations sur les vitesses d'écoulement le long de la verticale de mesure.

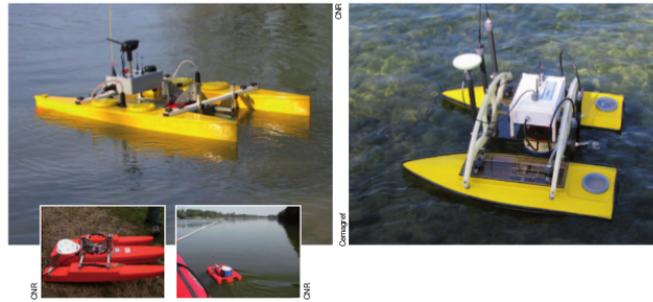


FIGURE 2.11 – Exemples de supports d'ADCP tractés ou radiocommandés

L'Onema préconise de retenir les valeurs suivantes, usuellement rencontrées pour l'incertitude élargie (niveau de confiance à 95 %) :

- 5 % dans les bonnes conditions d'application (moyenne de 4 à 6 traversées en régime permanent, et avec un coefficient de variation inférieur à 2,5%) ;
- 10 ou 15% en conditions défavorables (ratio du débit mesuré sur le débit total de moins de 50% , support instable, trajectoire erratique, durée de jaugeage trop brève), ou pour un débit issu d'une seule traversée de l'ADCP ;
- 20 à 30% dans de mauvaises conditions.

Les jaugeages ADCP ne sont pas toujours possibles : turbidité de l'eau, vitesse trop forte. Au vu de l'évolution du lit de la rivière, il est important de savoir qu'une courbe de tarage (relation hauteur/débit) n'est valide que sur une période donnée. Cependant sur de nombreux cours d'eau méditerranéens, à évolution très rapide, il est difficile voire impossible de jauger en crue d'où un chantier d'intérêt commun au Schapi sur l'utilisation de moyens vidéos pour le jaugeage en Très Hautes Eaux.

## 2.5 Modèles hydrologiques

### 2.5.1 Les différents types de modèles hydrologiques

Un modèle hydrologique est un outil numérique qui traduit via des expressions mathématiques les liens entre les différents mécanismes physiques du cycle terrestre de l'eau. Pour les modèles les plus simples, dits modèles « pluie-débit », une série temporelle de précipitations en entrée donne en sortie une série de débits.

Il existe différents types de modèles hydrologiques qui peuvent être classés selon trois critères : la discrétisation spatiale (modèle global, distribué ou semi-distribué), la discrétisation temporelle (modèle événementiel ou continu) et la description des processus (modèle empirique, conceptuel ou physique). Leurs caractéristiques sont développées ci-dessous.

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique, une boîte noire. Des relations empiriques relient les entrées aux sorties, comme c'est le cas pour le modèle GR (Michel, 1983). Au contraire, un modèle distribué prend explicitement en compte la variabilité spatiale des processus et/ou des variables d'entrée et/ou des conditions aux limites et/ou des caractéristiques géométriques du bassin versant. Ce dernier peut être discrétisé en sous-bassins globaux entre lesquels s'effectuent des transferts, comme pour le modèle SHE (Abbott et al., 1986), ou en plusieurs mailles rectangulaires ou triangulaires. Pour de tels modèles, une connaissance géographique et physique détaillée du bassin versant est nécessaire mais pose le problème de surparamétrisation. Il existe donc des modèles non totalement distribués, c'est-à-dire dont certains composants ont été globalisés : les modèles de type semi-distribué qui tiennent compte de la variabilité spatiale à travers des classes dont le comportement est semblable. Le modèle TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979; Obed & Zin, 2004) en est un.

Le comportement d'un bassin peut être modélisé pour un événement particulier ou sur une période de temps plus importante. Les modèles événementiels reproduisent la réponse d'un bassin à un épisode pluvieux alors que les modèles continus permettent de suivre l'évolution des variables d'état et de sortie à plus long terme. Les modèles événementiels nécessitent une condition initiale alors que les modèles continus

ont besoin de conditions aux limites (sur les précipitations, la température, le rayonnement, le vent...) pour fonctionner.

Plusieurs processus entrent en jeu quant à la description du cheminement d'une goutte de pluie tombée sur un bassin versant jusqu'à l'exutoire. La dynamique pluie-débit des modèles empiriques est appréhendée de manière statistique (stochastique : événements aléatoires non indépendants ou probabiliste : distribution de probabilité des grandeurs). Les modèles conceptuels intègrent la complexité des processus en reproduisant plus simplement le concept physique du comportement du système. Tous les processus ne sont pas décrits exactement mais certains principes sont respectés, comme la conservation de la masse et de l'énergie ou la description du bassin versant par fonctions de production et de transfert. Souvent leur modélisation s'appuie sur des réservoirs inter-connectés représentant les compartiments hydrologiques des bassins. Les modèles physiques visent à décrire le plus justement possible les mécanismes internes du système en se basant sur toutes les lois de la physique connues (lois de conservation de masse, d'énergie, de quantité de mouvement, lois de croissance en biologie...).

La performance d'un modèle hydrologique peut être évaluée selon plusieurs critères :

- la précision : les débits simulés doivent correspondre au mieux avec ceux observés.
- la robustesse : il doit être aussi précis pour des conditions de crues ou d'étiage.
- l'universalité : il doit pouvoir fonctionner sur n'importe quel bassin versant.
- Le caractère complet : il doit pouvoir intégrer de nombreuses caractéristiques afin de définir au mieux un bassin versant.
- l'adaptabilité : il doit pouvoir s'adapter et être corrigé pour n'importe quel bassin versant.

Dans cette étude, deux modèles hydrologiques événementiels distribués ont été utilisés : ISBA-TOP qui est un modèle physique, et MARINE, qui est un modèle conceptuel-physique.

## 2.5.2 ISBA-TOP et ISBA-TOP probabiliste

### ISBA-TOP

ISBA-TOP est un modèle couplé entre ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère, [Noilhan & Planton \(1989\)](#)) permettant de simuler les bilans d'eau et d'énergie de surfaces continentales et le modèle hydrologique distribué TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL, [Beven & Kirkby \(1979\)](#)) qui s'applique quand la composante prépondérante dans la génération des crues est le ruissellement par excès de saturation (2.12). Il s'agit d'estimer la redistribution latérale de l'eau du sol par le module hydrologique dans le schéma de surface qui ne simule que les échanges verticaux d'eau et de chaleur dans le sol. Les échanges sol-atmosphère sont gérés par ISBA en particulier l'évaporation et l'infiltration de l'eau dans le sol. A partir de l'humidité du sol fournie par ISBA, TOPMODEL modélise des transferts latéraux de l'eau dans le sol sur la base de l'information topographique. Les surfaces saturées et les nouvelles estimations de l'humidité du sol sont alors renvoyées à ISBA qui en déduit une valeur pour le ruissellement de sub-surface et le drainage profond. Le transfert de ces deux composantes vers les exutoires permet la simulation de débits totaux.

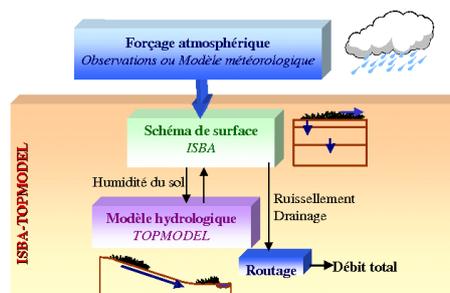


FIGURE 2.12 – Principe du modèle couplé ISBA-TOP

Initialement, ISBA-TOP était basé sur la version trois-couches de ISBA, appelée ISBA-3L. Ces trois couches correspondent à une couche de surface de quelques centimètres d'épaisseur, une zone racinaire

d'environ un mètre et demi (mais dont la profondeur varie en fonction de la couverture végétale) et une zone de drainage (sous-racinaire). Cette dernière a été introduite par [Mahfouf & Noilhan \(1996\)](#).

Une approche de type rappel newtonien proche de la méthode force-restore est utilisée pour modéliser la diffusion verticale à travers les zones racinaire et sous-racinaire ([Boone et al., 1999](#)).

Depuis peu, la version multi-couches ISBA-DF (ISBA- explicit vertical DiFfusion model), avec diffusion explicite dans le sol, est utilisable à la place d'ISBA-3L dans ISBA-TOP ([Vincendon et al., 2016](#)). Les transferts verticaux de chaleur et de masse sont reliés aux gradients thermiques et hydriques, cependant ces transferts sont liés car les coefficients thermiques du sol dépendent du contenu en eau.

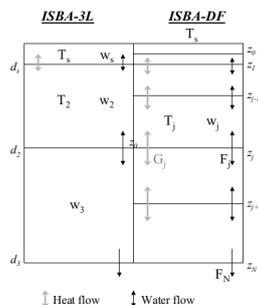


FIGURE 2.13 – Discrétisations du sol dans ISBA-3L et ISBA-DF, source : Vincendon et al. (2016)

$d$  : profondeur du sol

$z$  : niveau vertical

$T$  : température moyenne de la couche au niveau considéré

$w$  : contenu en eau liquide au niveau considéré

$G$  : flux thermique au niveau considéré

$F$  : flux hydraulique au niveau considéré

En mode simulation, ISBA-TOP utilise en entrée des pluies horaires spatialisées pouvant provenir de données radar par exemple et d'autres paramètres météorologiques de surface (température et humidité de l'air à 2m, vent à 10m, rayonnements) issus de l'analyse SAFRAN. Les conditions initiales d'humidité et de température du sol proviennent de sorties du modèle SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU, [Habets et al. \(2008\)](#))

### ISBA-TOP probabiliste

L'idée est de tenir compte de l'incertitude qui affecte la modélisation hydrologique. ISBA-TOP est basé sur des fonctions de pédotransfert qui constituent une paramétrisation des écoulements souterrains de l'eau et de son stockage. Ces paramètres sont déterminés selon la littérature mais peuvent ne pas être adaptés au contexte. L'incertitude qui affecte ces paramètres peut être échantillonnée en les perturbant dans la limite des grandeurs physiques raisonnables. En outre, il est également possible de perturber les conditions initiales d'humidité pour considérer l'incertitude qui les affecte. [Edouard et al. \(2016\)](#) ont développé une version probabiliste d'ISBA-TOP permettant d'obtenir à partir d'un unique scénario de pluie un ensemble de scénarii de débits en perturbant des paramètres hydrodynamiques et l'humidité initiale du sol. Ces perturbations ne concernent que les paramètres ayant un fort impact sur la réponse hydrologique des bassins.

Ils ont été déterminés par une analyse préalable de la sensibilité du modèle à ses paramètres hydrodynamiques ([Edouard et al., 2016](#)). Les paramètres suivants ont été étudiés :

- $W_{sat}$  : teneur volumétrique en eau à saturation, atteint quand tous les pores du sol sont remplis d'eau
- $W_{wilt}$  : contenu en eau du sol au point de flétrissement (seuil à partir duquel la plante ne peut plus capter l'eau du sol devenue trop rare)
- $W_{fc}$  : contenu en eau du sol à la capacité au champ (seuil au dessus duquel il n'y a plus de drainage gravitationnel dans le sol mais ruissellement)
- $K_{sat}$  : conductivité hydraulique à saturation, propriété d'un milieu poreux saturé qui détermine la loi

de Darcy, entre le débit spécifique et le gradient hydraulique qui provoque le mouvement

- $\psi_{sat}$  : potentiel matriciel à saturation, correspondant aux forces de rétention exercées par la matrice (forces d'imbibition et de capillarité) pour un sol saturé
- $b$  : paramètre de forme sans dimension qui relie le potentiel matriciel  $\psi$  au contenu volumétrique d'eau dans le sol  $w$

$$\psi(w) = \psi_{sat} \left( \frac{w}{w_{sat}} \right)^{-b}$$

- $M$  : taux de décroissance de la transmissivité : pour un sol de profondeur  $d$ , la transmissivité  $T$  à cette profondeur (qui caractérise la productivité d'un captage) dépend de la transmissivité à la surface du sol  $T_0$  suivant :

$$T(d) = T_0 e^{-\frac{d}{M}}$$

Edouard et al. (2016) ont montré que les paramètres d'ISBA-TOP ayant le plus fort impact sur la simulation des débits sont  $W_{sat}$ ,  $K_{sat}$  et  $M$ . Les paramètres sont modifiés à l'aide de coefficients multiplicatifs aléatoires mais bornés pour respecter les limites trouvées dans la littérature (par exemple :  $0,3 < W_{sat} < 0,62$ ). On veille également à garder une cohérence physique (par exemple :  $W_{wilt} < W_{fc} < W_{sat}$ ). L'humidité initiale du sol est perturbée simultanément. Un champ de perturbations aléatoires mais lissées est appliqué à l'état initial « déterministe » (provenant de SIM).

### 2.5.3 MARINE

Le modèle MARINE (Modélisation et Anticipation du Ruissellement pour des événements Extrêmes : Roux et al. (2011)), développé à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) est un modèle événementiel distribué, adapté à la prévision des crues rapides. C'est le modèle le plus physique actuellement proposé au SPC Méditerranée Est puisque :

- L'infiltration de l'eau dans le sol se fait avec le modèle de Green et Ampt.
- Les écoulements de subsurface sont résolus avec la loi de Darcy.
- Le ruissellement de surface ainsi que le réseau de drainage sont représentés avec un modèle d'onde cinématique.

Le temps de simulation pour des bassins de  $700 \text{ km}^2$  sur les ordinateurs du centre est bien adapté à du temps réel (Marchand, 2014). Il a été développé pour simuler des événements intenses sur des bassins à forte pente (onde cinématique : plus la charge est importante, plus la vitesse de propagation augmente). Pour des bassins très plats, il peut être couplé à un modèle hydraulique simple, ce dernier recevant les entrants intermédiaires simulés par MARINE (Pansu, 2016).

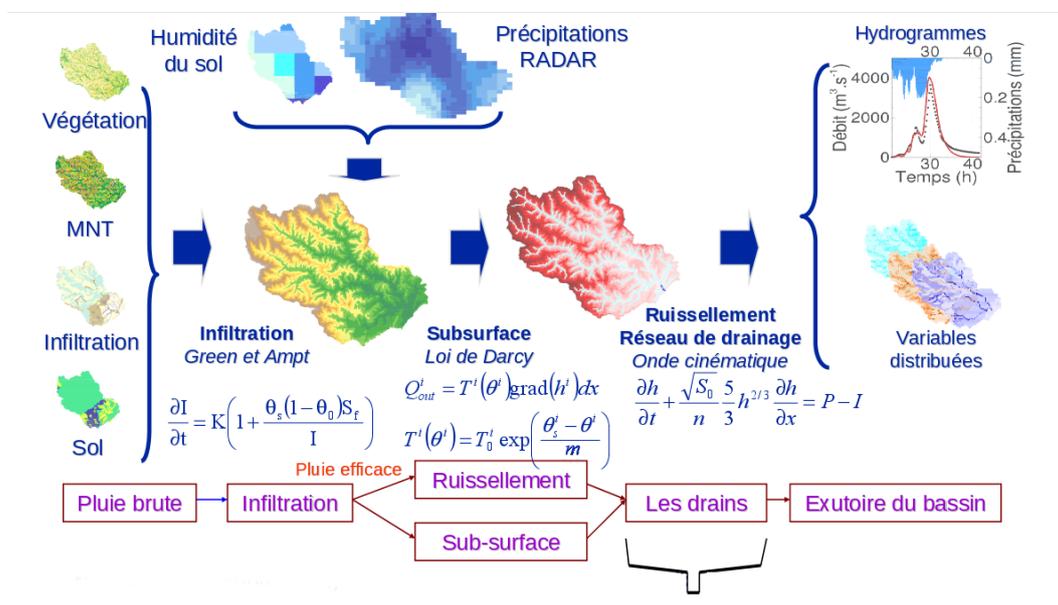


FIGURE 2.14 – Structure du modèle MARINE (source : cours de D. Dartus et H. Roux à l'ENSEEIH, 2015)

I : infiltration cumulée  
K : conductivité hydraulique à saturation  
 $\theta_0$  : contenu en eau initial dans le sol  
 $\theta_s$  : contenu en eau saturé dans le sol  
Q : débit  
T : transmissivité du sol  
m : paramètre de décroissance de la transmissivité  
h : profondeur d'eau  
P : taux de précipitation  
n : coefficient de Manning  
S0 : pente du lit  
Sf : succion

### Calibration de MARINE

Il y a 14 paramètres à définir, soit en utilisant une valeur uniforme sur chaque bassin versant, soit en utilisant une carte SIG à laquelle un coefficient multiplicateur peut éventuellement être appliqué. Pour cette étude, les paramètres du modèle MARINE (notamment ceux d'arrière plan orange dans le tableau 2.1) ont été calés à partir de 5 événements avant 2014 : 13 décembre 2008, 21 décembre 2010, 27 novembre 2012, 13 décembre 2012 et 23 janvier 2013. Ces événements sont marqués par des pluies modérées sur sols humides.

\* : coefficient multiplicateur

Ces calages ne sont en général pas très bons dans les cas très secs de début d'automne. Pour le Gapeau, la partie karstique n'a pas été calibrée : on a pris les débits mesurés à la station de Soliès (ISBA-TOP, lui, ne tient pas compte de cette zone karstique). Pour l'Endre, le Zsol correspondant à la partie karstique a été modifié afin d'obtenir de meilleurs résultats (épaisseur de 6m ajouté au Zsol originel pour simuler grossièrement les non-productions liée au karst non saturé).

Pour caler MARINE pour un usage opérationnel, les points suivants ont été appliqués :

- un biais systématique n'est pas obligatoirement un problème.
- une estimation correcte en pointe hormis un épisode historique est plus pertinente que l'inverse.
- une décrue un peu trop lente est moins pénalisante qu'une trop grande variation dans l'erreur relative sur le débit de pointe.
- les lames d'eau ANTILOPE opérationnelles ont été utilisées et non les lames d'eau J+1.
- si un modèle ne marche pas pour un type donné de situation (premières pluies d'automne par exemple avec un coefficient de ruissellement très faible) il est tout à fait possible d'utiliser un calage spécifique.

## 2.6 Evaluer la qualité d'une prévision d'ensemble de débits

Durant ce stage, une étude comparative entre différents systèmes de simulation et de prévision a été menée. Le tableau 2.2 récapitule les chaînes hydro-météorologiques considérées.

Les sorties des prévisions d'ensemble ne sont pas vérifiées de la même manière que celles des prévisions déterministes. En effet, tous les membres d'un ensemble forment une distribution de probabilités d'événements possibles et doivent donc être évalués simultanément et non de manière isolée. Les prévisions d'ensemble nécessitent alors l'utilisation de scores ensemblistes, ceux utilisés dans cette étude sont décrits dans la suite de cette section.

Un système de prévision d'ensemble doit présenter deux qualités importantes : la **fiabilité** et la **résolution**. La première représente la capacité du système à prévoir des probabilités en accord avec les fréquences d'occurrence effectivement observées. Ainsi en considérant un certain événement sur une période donnée,

TABLE 2.1 – Tableau des paramètres de calage et bornes pour le SPC MedEst. Il s'agit, hors Strickler, de coefficients multiplicateurs des cartes de paramètre. Pour l'épaisseur du sol, il est normal d'avoir des valeurs inférieures à 1 car l'épaisseur de la base de donnée est très importante (généralement 1 à 2m).

	Paramètre	Min	Max	Calage trouvé pour le Gapeau	Calage trouvé pour l'Endre	Calage trouvé pour l'Aille
Réservoir sol	Profondeur Z (m)*	0.1	2	0,3	0,3	0,18
	Porosité $\psi$ *			1	1	1
	Humidité initiale Hum0 (%)*			1,35	1,35	1,35
Infiltration (Green& Ampt)	Conductivité hydraulique KGA (mm/h) *	0.1	20	13,4	12	10
	Front d'humidification SfGA (mm)*			1	1	1
Subsurface (Darcy-TOPMODEL)	Transmissivité KSS ( $m^2/s$ )*	500	5000	500	115	5800
	Paramètre de décroissance de la transmissivité MSS			0,08	0,14	0,001
	Pente iDSS (m/m)*			1	1	1,7
Ruissellement (onde cinématique)	coefficient de Manning ( $s/m^{1/3}$ )*			1	1	1
Transfert réseau de drainage (onde cinématique)	KsD1 Strickler lit mineur en $m^{1/3}/s$	5	40	36	16	25
	KsD2 Strickler lit majeur en $m^{1/3}/s$	1	20	7	10	25
	Largeur du canal WD1 (m)*			1	1	1
	Profondeur du canal PD1 (m)*			1	1	0,75
	Pente du lit majeur iD2 (m/m)*			1	1	1

TABLE 2.2 – Caractéristiques des différents ensembles expérimentés.

Nom de l'expérience	Données de pluie	Modèle hydrologique	Nombre de scénarios
A1	ANTILOPE	MARINE	1
A2	ANTILOPE	ISBA-TOP	1
A3	ANTILOPE	MARINE/ISBA-TOP	2
A4	ANTILOPE	ISBA-TOP probabiliste	20
P1	PEARO	MARINE	12
P2	PEARO	ISBA-TOP	12
P3	PEARO	ISBA-TOP probabiliste	240
P4	PEARO	ISBA-TOP probabiliste/MARINE	252

si cet événement est prévu  $m$  fois avec une probabilité  $p$ , et si parmi ces  $m$  cas, l'événement est observé avec une fréquence égale à  $p$ , alors l'ensemble est fiable. La résolution, elle, permet de mesurer la capacité

du système à discriminer les situations où la fréquence observée s'écarte de la fréquence climatologique de l'événement. Ceci traduit le degré d'information supplémentaire apporté par le système par rapport à la climatologie.

### 2.6.1 RPS (Rank Probability Score)

Il s'agit d'un score issu de celui de Brier et dont la particularité est d'évaluer le système de prévision d'ensemble sur toutes les gammes de valeurs prises par le paramètre étudié (ici le débit). Les prévisions sont divisées en  $J$  catégories, avec  $J=127$  pour la suite, délimitées dans notre étude par les valeurs allant de 0 à 5080  $m^3/s$  par pas de 40.

Une prévision d'ensemble donne une probabilité  $y_j$  de réalisation à chaque classe  $j$ . L'observation se range dans une seule de ces classes, par exemple la classe  $i$ , alors :  $o_i = 1$  et  $o_{j \neq i} = 0$ . On note  $Y_j$  la prévision cumulée et  $O_j$  l'observation cumulée :  $Y_j = \sum_{m=1}^j y_m$  et  $O_j = \sum_{m=1}^j o_m$  avec  $j=1, \dots, J$ . On définit alors le RPS comme la moyenne des sommes des écarts quadratiques des différentes composantes de prévision cumulée et d'observation cumulée, moyennée sur la période considérée ( $N$  jours).

$$RPS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\sum_{j=1}^J [Y_j - O_j]^2]$$

Avec :

$J$  : nombre de classes de probabilités

$j$  : indice de la classe de probabilité  $j$

$Y_j$  : distribution cumulée des prévisions au seuil  $j$

$O_j$  : distribution cumulée des observations au seuil  $j$

$N$  : nombre de jours

Le score RPS varie entre 0 (prévision parfaite) et  $+\infty$ .

### 2.6.2 RPSS (Rank Probability Skill Score)

Le RPSS compare le RPS à un score de référence, où la simulation de référence est souvent une simulation climatologique ou une climatologie de débits, de la manière suivante :

$$RPSS = 1 - \frac{RPS}{RPS_{ref}}$$

Le RPSS est égal à 1 si la prévision est parfaite, 0 ou moins si le modèle est moins bon que la référence et est positif si le modèle est meilleur.

### 2.6.3 RMSE (Root Mean Square Error) ou erreur quadratique moyenne

Ce paramètre statistique désigne la racine carrée de la moyenne de l'erreur au carré et mesure la magnitude moyenne des erreurs commises par une prévision. Les RMSE donnent un poids relativement important aux différences élevées. En d'autres termes, le RMSE est très pertinent lorsque les grandes erreurs sont indésirables et il fournit également une mesure de la différence moyenne entre l'observation et la moyenne des membres de la prévision d'ensemble. La formule du RMSE s'écrit comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}$$

Avec :

$o_i$  : données observée pour le jour  $i$

$m_i$  : moyenne des prévisions des membres de l'ensemble pour le jour  $i$

$N$  : nombre de jours comptés pour calculer le score.

### 2.6.4 MAE (Mean Absolute Error) ou erreur moyenne absolue

A l'inverse de l'erreur quadratique moyenne, l'erreur absolue moyenne est un paramètre qui donne de l'importance aux faibles différences.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |m_i - o_i|^2$$

mi désigne la moyenne des prévisions des membres de l'ensemble pour le jour i, oi la donnée observée pour le jour i et N le nombre de jours comptés pour calculer le score.

### 2.6.5 Dispersion

La dispersion d'un ensemble peut être estimée numériquement par le calcul de l'écart-type. Cette différence entre la valeur prévue par un membre et la moyenne de l'ensemble est calculée pour chaque prévision. La formulation de l'écart-type est définie par :

$$s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{k,i} - \bar{x}_i)^2}$$

Où :

n : est le nombre de membres de la prévision

N : est le nombre d'échéances sur lesquelles porte le calcul du score

$\bar{x}_i$  : est la moyenne des prévisions de l'ensemble pour l'échéance i

$x_{k,i}$  : est la valeur de la prévision d'un membre pour la même échéance i

### 2.6.6 Diagramme de Talagrand

Le diagramme de Talagrand fournit une représentation de la fiabilité d'un système de prévision d'ensemble. C'est un type d'histogramme dans lequel les catégories que représentent les barres sont des rangs variables plutôt que des valeurs particulières — un histogramme de rangs. Sa construction se fait à partir de plusieurs réalisations (prévisions et observations). A chaque pas de temps d'un événement, N valeurs de débits sont prévues par l'ensemble, la valeur de l'observation peut être classée parmi elles. Le diagramme de Talagrand indique la fréquence des positions prises par l'observation dans ce classement sur toutes les échéances de l'événement (position 1 : observation < N membres, position 2 : 1 membre < observation < (N-1) membres, ..., position (N+1) : N membres < observation). En examinant la forme du diagramme de Talagrand, on peut tirer des conclusions sur le biais du système d'ensemble et sur l'adéquation de sa dispersion. Un diagramme plat dans lequel toutes les barres sont égales indiquerait une fiabilité parfaite. Une configuration asymétrique indique souvent un biais de la moyenne de l'ensemble. Un diagramme symétrique en U (respectivement de U inversé) peut être le résultat d'un ensemble sous-dispersif (respectivement sur-dispersif).

### 2.6.7 Boîtes à moustaches

Cette sous-partie vise à rappeler comment sont élaborées les boîtes à moustaches utilisées dans cette étude. Cinq valeurs les résument : le minimum, les 3 quartiles Q1, Q2 (médiane) et Q3, et le maximum. L'écart interquartile est utilisé comme indicateur de dispersion. Il correspond à 50 % des effectifs situés dans la partie centrale de la distribution. On repère sur la boîte à moustaches d'une variable :

- L'échelle des valeurs de la variable, située sur l'axe vertical.
- La valeur du 1er quartile Q1 (25 % des effectifs), correspondant au trait inférieur de la boîte,
- La valeur du 2ème quartile Q2 (50 % des effectifs), représenté par un trait horizontal à l'intérieur de la boîte,
- La valeur du 3ème quartile Q3 (75 % des effectifs), correspondant au trait supérieur de la boîte. Ces deux moustaches, délimitent les valeurs adjacentes qui sont déterminés à partir de l'écart interquartile (Q3-Q1)
- Les valeurs extrêmes, atypiques situées au-delà des valeurs adjacentes sont individualisées et représentées par un signe ponctuel (point, étoile,...)

Pour la délimitation des longueurs des moustaches on prend comme constante 1,5 comme celle définie dans la boîte à moustaches de Tukey. En effet la boîte a pour hauteur la distance interquartile ( $Q3-Q1$ ), et les moustaches sont basées généralement sur 1,5 fois la hauteur de la boîte. Une valeur est donc atypique si elle dépasse de 1.5 fois l'écart interquartile au dessous du 1er quartile ou au dessus du 3ème quartile. Du coup, l'extrémité de la moustache inférieure est la valeur minimum dans les données qui est supérieure à la valeur frontière basse :  $Q1-1,5*(Q3-Q1)$  L'autre extrémité est la valeur maximum dans les données qui est inférieure à la valeur de la frontière haute :  $Q3+1,5*(Q3-Q1)$

### 2.6.8 Taux de succès, fausses alarmes, non prévisions

Pour des prévisions de type binaire, ou catégoriels, on peut employer les termes de réussite et de fausse alarme. La réussite désigne alors la bonne prévision d'un événement ou d'un non-événement (cellules a et d du tableau 2.3) et il y a fausse alarme quand un événement est prévu mais non observé.

TABLE 2.3 – Tableau de contingence d'un événement.

		Le système prévoit	
		un dépassement de seuil	un non dépassement de seuil
En réalité	On observe un dépassement de seuil	Alerte valable (a)	Evènement manqué (b)
	On n'observe pas de dépassement	Fausse alerte (c)	Non-alerte valable (d)

Le taux de réussite ou probabilité de détection est le rapport des prévisions correctes sur l'ensemble des prévisions :

$$POD : \text{probabilité de détection } POD = \frac{a}{a+b}$$

Le taux de fausse alarme ou probabilité de fausse détection est le rapport de fausses alarmes sur le nombre de fois qu'un événement n'a pas été observé :

$$POFD : \text{probabilité de fausse détection } POFD = \frac{c}{c+d}$$

Pour une prévision d'ensemble, on peut également réaliser une table de contingence et calculer ces mêmes scores en décidant que si un pourcentage minimum de membres prévoit l'événement, alors celui-ci est prévu. La valeur de ce pourcentage peut varier.

### 2.6.9 Courbes ROC

Les taux de fausses alarmes et de réussite pour des événements ou des valeurs-seuils prévus peuvent être rassemblés dans un seul et même graphique, que l'on appelle courbe ROC . Elle représente le tracé des couples taux de fausses alarmes (en abscisse) /taux de réussite (en ordonnée) obtenus pour différents pourcentages (cf paragraphe précédent). La qualité de la prévision d'ensemble est indiquée par la position de cette courbe. En effet, une prévision parfaite donnerait un taux de fausses alarmes nul, alors que le taux de bonnes prévisions serait de 1. Ainsi, plus la courbe est proche de ce couple de valeurs (c'est-à-dire proche du coin haut gauche du graphe), plus la prévision est exacte. Un score synthétique associé à ces diagrammes est l'aire sous la courbe ROCA.

Des statistiques sont également effectuées au SCP afin d'évaluer le bon passage des vigilances en période de crues. Seulement les événements répertoriés jusqu'alors ne sont pas nombreux et aucun score réellement objectif n'est possible sur la vigilance jaune opérationnelle car le SPC met souvent le Gapeau en jaune même si on ne pense pas à un risque de débordement pour les 2 cas suivants :

- prévenir un risque de réaction importante sur la Gisele ou des bassins côtiers à enjeux de Fréjus au Toulonnais (hors réseau réglementaire)
- le SPC ne peut communiquer par écrit (bulletins « Vigicrue ») qu'en cas de vigilance jaune et celle-ci doit se faire aux deux actualisations fixes de 10 et 16h, heures locales. En cas d'incertitude importante sur la chronologie des pluies prévues, le prévisionniste hydrologue préfère placer le cours d'eau en vigilance jaune par précaution, notamment sur la carte de 16h afin de préserver le cas échéant (cf. cas du 25/11/2014 dans le paragraphe 4) une anticipation de dépassement de seuil d'au moins 6h en matinée du lendemain.

# 3 | Evaluation des débits modélisés et prévus

## 3.1 Incertitude liée à la modélisation hydrologique

### 3.1.1 Performance des modèles "déterministes"

Dans cette section, sont étudiées les performances des modèles ISBA-TOP et MARINE, en terme de simulation de débits sur les cinq événements sélectionnés (voir chapitre 2.2). Les débits horaires simulés sur chaque bassin versant par les deux modèles à partir des pluies issues de la lame d'eau ANTILOPE sont comparés aux débits observés sur ces bassins. L'objectif est d'avoir une idée du comportement de ces modèles hydrologiques, des incertitudes associées et de pouvoir ainsi répondre aux questions : un bassin versant est-il toujours mieux représenté qu'un autre ? Un modèle est-il meilleur ? Pour cela, plusieurs critères sont à prendre en considération pour évaluer la performance d'un modèle hydrologique : scores, attentes opérationnelles, bonne simulation des pics de crue, du volume d'eau débité, de la chronologie...

Il s'avère que sur les événements choisis, aucun des bassins versants n'est systématiquement mieux simulé que les autres. On peut illustrer ce propos par trois événements tirés des simulations de MARINE.

Les graphes ci-dessous (figure 3.1) représentent les simulations par MARINE de débits du 16 au 20 janvier 2014, sur chaque bassin versant. Pour cet événement, le débit du Gapeau (à Hyères) est globalement mieux simulé que celui de l'Aille (à Vidauban) ou de l'Endre (au Muy). En effet, le débit simulé du Gapeau est le plus proche de celui observé avec une erreur relative de 2,38 % alors que, pour l'Endre et l'Aille, elle est respectivement de -14,44 % (sur-estimation) et 19,48 %. De même, les pics de crue à Hyères sont plutôt bien simulés dans le temps, contrairement au Muy où la simulation est légèrement en avance par rapport à l'observation. Cependant si l'on s'intéresse aux dépassements de seuils de vigilance, la conclusion est plus mitigée. A Hyères, pour le pic du 19 janvier vers 17h :  $365,4 m^3/s$  sont simulés contre 549 observés : l'observation frôle le seuil rouge ( $550 m^3/s$ ) alors que la simulation en est loin, malgré un volume simulé tout de même important. Pour Le Muy, les pics semblent être plus près des valeurs observées mais la sur-estimation du dernier donne une fausse alerte pour les utilisateurs en opérationnel. Pour Vidauban, malgré l'excellente simulation du pic du 16 janvier à 18h, le modèle sous-estime les maxima de débit observés ensuite, en ne dépassant jamais le seuil orange de vigilance (à  $280 m^3/s$ ).

Pour l'événement du 25 novembre 2014, c'est le débit de l'Aille qui est mieux simulé que celui du Gapeau ou de l'Endre. L'erreur relative en débit n'est que de 0,59 % pour l'Aille alors que pour l'Endre et le Gapeau elle est respectivement de -17,41 % et -10,77 %. On peut remarquer pour les trois bassins la difficulté de MARINE à simuler la phase de décrue en fin d'événement. En terme de chronologie et de valeurs de pics de crue, le débit de Vidauban est le mieux simulé (figure 3.2). Seul le pic de crue simulé pour le 25 novembre vers 8h ( $285,9 m^3/s$ ) est éloigné de celui observé ( $399 m^3/s$ ), bien qu'il dépasse quand même le seuil orange de vigilance de  $280 m^3/s$ .

Dans d'autres cas (comme celui du 02 octobre 2015, graphiques 3.3), c'est le débit de l'Endre au Muy qui est le mieux simulé par MARINE. On obtient les mêmes conclusions avec le système ISBA-TOP : selon les cas, ce n'est pas toujours le même bassin pour lequel les simulations sont les meilleures.

La comparaison des performances des deux modèles montre que MARINE permet de simuler des débits plus proches des observations qu'ISBA-TOP sur les événements étudiés. Les simulations des deux modèles peuvent aussi conduire à des résultats très proches. Par exemple, MARINE est meilleur qu'ISBA-TOP dans la simulation des débits du 25 novembre 2014 sur l'Aille : (figure 3.4)

Ce n'est cependant pas toujours le cas. Si on s'intéresse à un autre bassin, MARINE et ISBA-TOP donnent des débits simulés plutôt proches au Muy le 25 novembre 2014 : jusqu'au 26 novembre 19h,

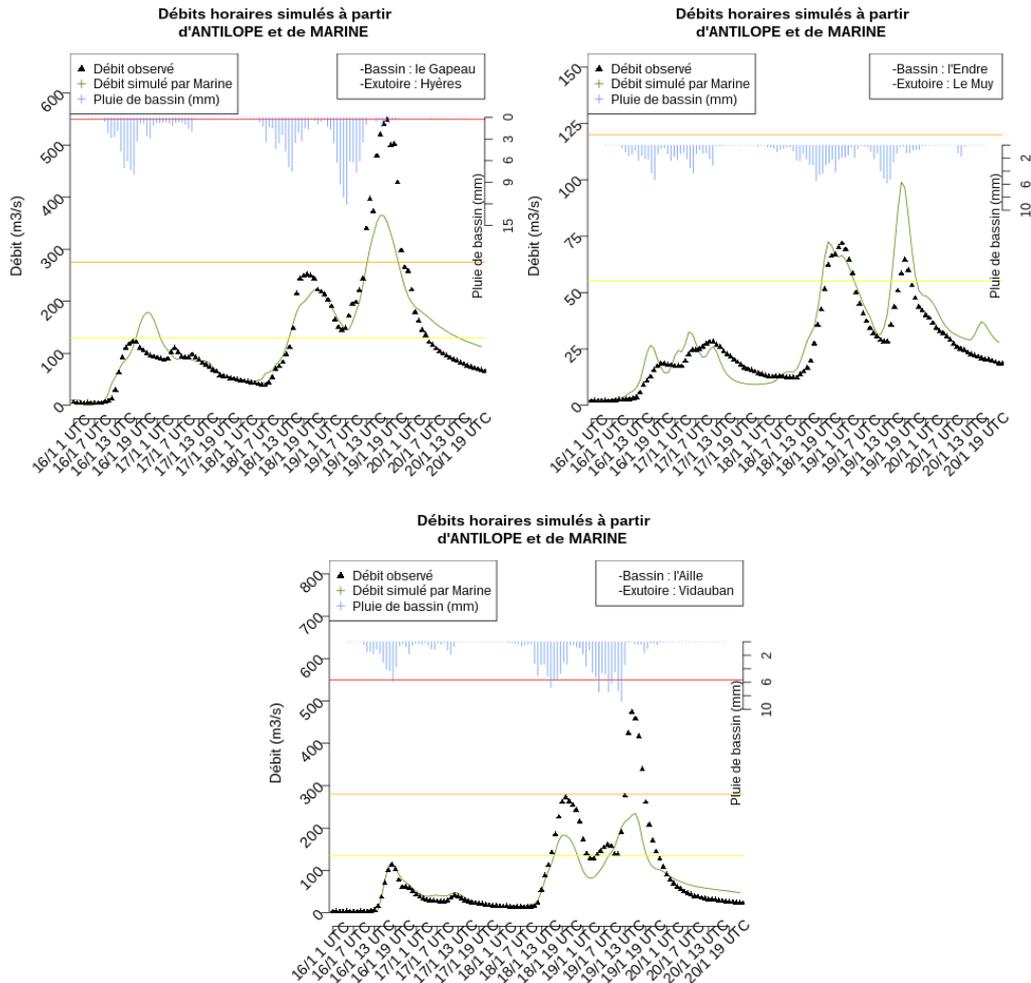


FIGURE 3.1 – Débits horaires du Gapeau à Hyères, de l’Endre au Muy et de l’Aille à Vidauban mesurés (triangles noirs) et simulés par MARINE (A1, ligne continue verte) à partir des lames d’eau ANTILOPE entre le 16 et le 20 janvier 2014.

MARINE est plus proche de la réalité observée mais au-delà, c’est ISBA-TOP qui s’en rapproche le plus (graphique 3.5). Les deux modèles présentent un pic de crue non observé le 28 novembre vers 12h.

Les erreurs relatives, erreurs moyennes absolues et erreurs quadratiques moyennes calculées en considérant tous les bassins et tous les événements confondus pour chaque modèle hydrologique sont données par le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Scores sur les débits horaires simulés par les deux modèles tous bassins et tous cas confondus.

	ISBA-TOP	MARINE
<b>ERREUR RELATIVE entre débit observé et débit simulé</b>	97.90 %	2.20 %
<b>MAE normalisée (<math>m^3/s/km^2</math>)</b>	0.064	0.021
<b>RMSE normalisée (<math>m^3/s/km^2</math>)</b>	0.104	0.036

Pour ces différents scores, MARINE est le modèle le plus performant. L’erreur quadratique moyenne est à peine plus élevée que l’erreur moyenne absolue, ce qui montre que les différences entre les deux modèles ne sont pas très élevées.

*Synthèse* : Les débits horaires ne sont pas systématiquement mieux simulés sur un bassin que sur les autres. Cette conclusion est valable pour MARINE comme ISBA-TOP. D’une manière générale, sur les événements étudiés et sur les trois bassins, les scores calculés sur les débits horaires montrent que MARINE

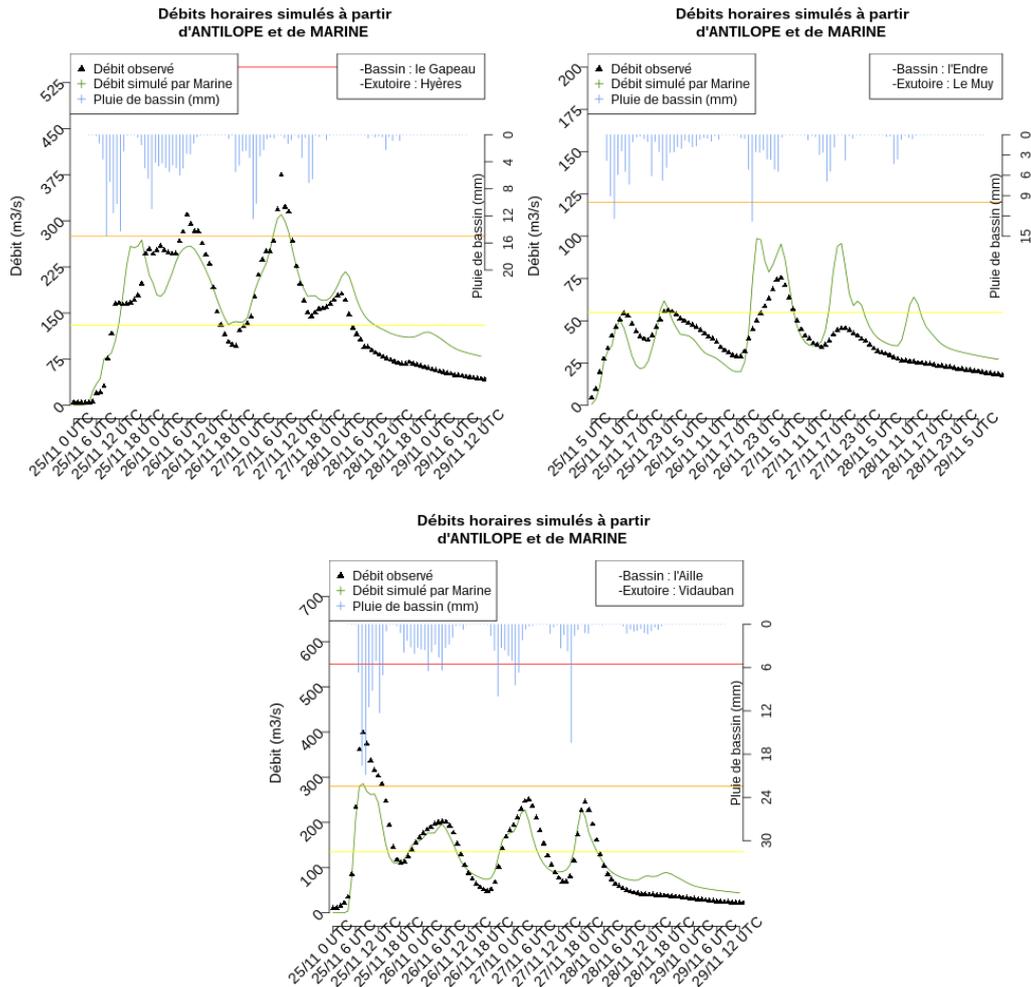


FIGURE 3.2 – Débits horaires du Gapeau à Hyères, de l'Endre au Muy et de l'Aille à Vidauban mesurés (triangles noirs) et simulés par MARINE (A1, ligne continue verte) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014.

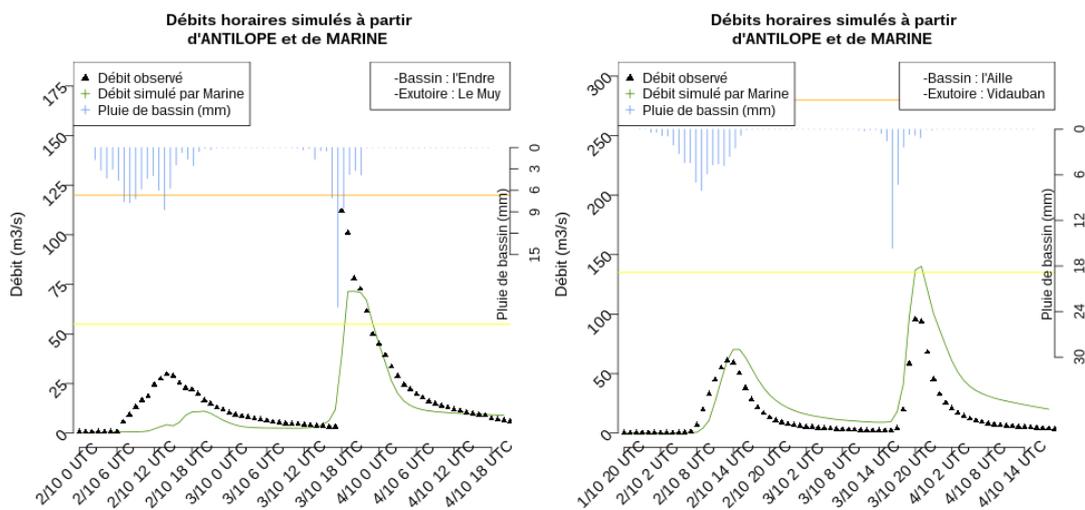


FIGURE 3.3 – Débits horaires de l'Endre au Muy et de l'Aille à Vidauban mesurés (triangles noirs) et simulés par MARINE (A1, ligne continue verte) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 02 et le 04 octobre 2015.

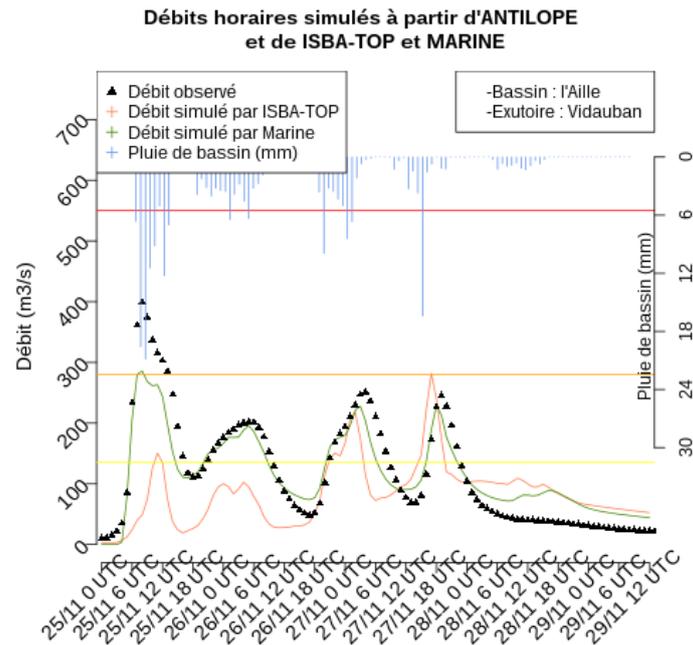


FIGURE 3.4 – Débit au pas de temps horaire de l'Aille à Vidauban mesuré (triangles noirs) et simulé par MARINE (A1, ligne continue en vert foncé) et par ISBA-TOP (A2, en orange) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014.

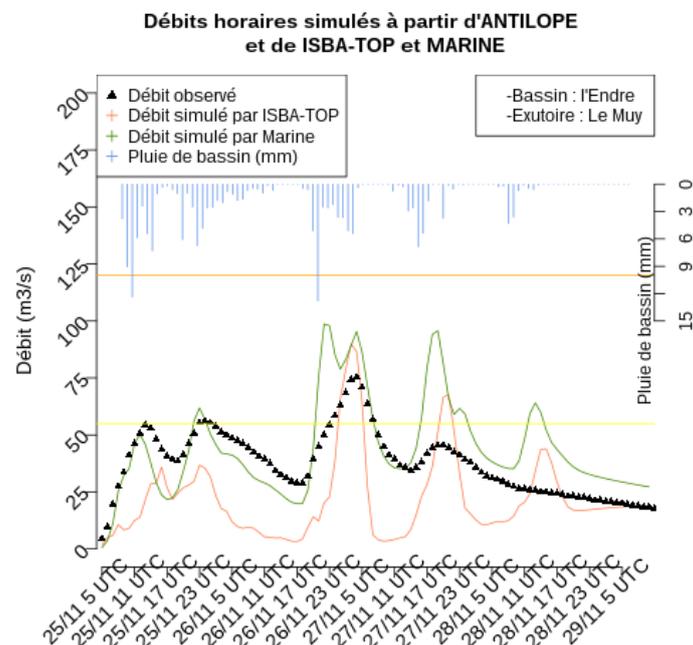


FIGURE 3.5 – Débit au pas de temps horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs) et simulé par MARINE (A1, ligne continue en vert foncé) et par ISBA-TOP (A2, en orange) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 25 et le 29 novembre 2014.

permet de mieux simuler les débits qu' ISBA-TOP. Ceci était attendu puisque les paramètres de MARINE sur les bassins étudiés sont obtenus par calage alors qu'ils sont donnés par une relation dépendant des textures de sol pour ISBA-TOP. Il est à noter que le SPC Med Est a noté une faible adéquation entre les

textures de sol utilisées par ISBA-TOP (provenant de la base de données HWSD) et les mesures réalisées sur le terrain. ceci pourrait expliquer les performances dégradées d'ISBA-TOP sur les bassins de cette région.

Remarque : L'approche multi-modèles peut être utilisée pour quantifier l'incertitude liée aux structures des modèles hydrologiques. N'ayant ici que deux modèles hydrologiques, il est peu pertinent de constituer un ensemble, à moins de pondérer les simulations de MARINE et ISBA-TOP. En effet, il se peut que les deux modèles simulent des débits éloignés des observations, ce qui peut être dû à une mauvaise connaissance de l'état initial d'humidité des sols. Cela n'empêche pas que la dispersion engendrée par les deux scénarios soit parfois trop élevée si les simulations sont très différentes.

### 3.1.2 Version probabiliste d'ISBA-TOP

Etant donné qu'ISBA-TOP est maintenant complètement paramétrisé, il est important de considérer l'incertitude qui affecte les paramètres hydrodynamiques du modèle. La version probabiliste du modèle ISBA-TOP (où les paramètres et les conditions initiales de sol ont été perturbés, cf. section 2.5.2) a donc été utilisée pour simuler les débits sur les 3 bassins et 5 cas sélectionnés à partir des lames d'eau observées. Les résultats obtenus sont présentés dans cette section.

La simulation des débits à Hyères (figure 3.6) pour l'événement du 16 janvier 2014 illustre bien l'apport de la version probabiliste d'ISBA-TOP (en gris) sur la version déterministe (courbe bleue). En effet, bien qu'ISBA-TOP déterministe ait simulé un dépassement du seuil orange à  $275 \text{ m}^3/\text{s}$  (pic simulé à  $341,6 \text{ m}^3/\text{s}$  le 19 janvier à 11h), le pic observé correspondant est bien plus élevé :  $548,3 \text{ m}^3/\text{s}$  le 19 à 18h. Les perturbations des paramètres hydrodynamiques permettent d'envisager une telle élévation de débit : la valeur maximale simulée par l'ensemble est de  $662,3 \text{ m}^3/\text{s}$  (19 janvier à 9h).

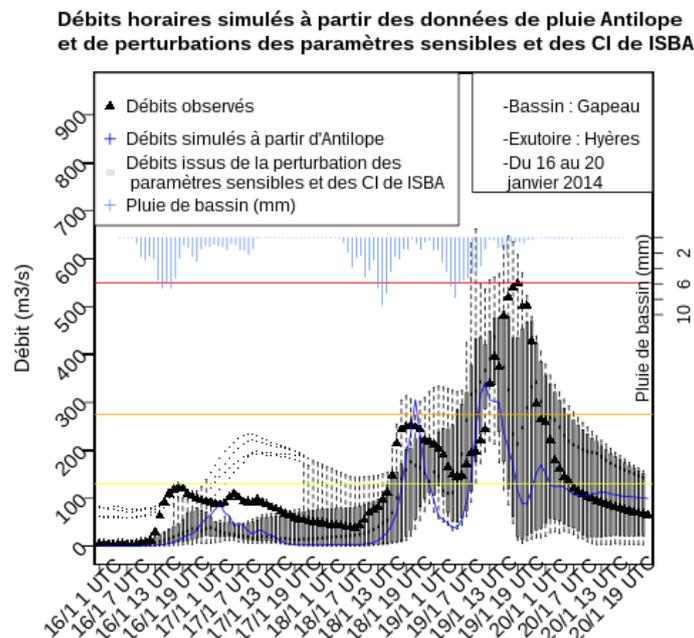


FIGURE 3.6 – Débit au pas de temps horaire du Gapeau à Hyères mesuré (triangles noirs) et simulé par ISBA-TOP déterministe (A2, courbe bleue) et par l'ensemble formé par les perturbations des paramètres d'ISBA-TOP (A4, motif gris) à partir des lames d'eau ANTILOPE entre le 16 et le 20 janvier 2014.

Par ailleurs, la valeur du RPSS d'ISBA-TOP probabiliste calculée sur tous les événements et tous les bassins confondus, en prenant comme référence la simulation d'ISBA-TOP déterministe, est positive : elle est de 0,213. Perturber les paramètres hydrodynamiques d'ISBA-TOP apporte donc un supplément d'information.

*Synthèse* : La version probabiliste d'ISBA-TOP est globalement meilleure que la version déterministe, à la fois en terme de scores et de manière subjective, en visualisant les hydrogrammes.

### 3.1.3 Comparaison des performances d'ISBA-TOP/MARINE et de d'ISBA-TOP probabiliste

Dans cette partie, on cherche à comparer la performance du modèle ISBA-TOP probabiliste à celle obtenue en considérant les deux modèles déterministes. Pour cela, on s'intéresse aux scores (décrits en 2.6) par bassin et tous bassins confondus (tableau 3.2).

TABLE 3.2 – Scores sur les débits horaires simulés par les deux ensembles tous bassins et tous cas confondus.

		Antilope ISBA-TOP perturbé			Antilope ISBA-TOP/MARINE		
		Hyères	Le Muy	Vidauban	Hyères	Le Muy	Vidauban
Par bassin	RPS de l'ensemble	0,0096	0,0013	0,0069	0,0073	0,0008	0,1195
	SIGMA/RMSE	1,1460	1,2703	0,3933	0,6346	0,8343	0,4627
Total	RPS de l'ensemble	0.0057			0.0450		
	SIGMA/RMSE	0.6917			0.5090		

Les scores obtenus (tableau 3.2, figure 3.7) sont légèrement meilleurs pour le bassin versant de l'Endre au Muy (meilleur RPS, plus faible écart-type pour l'ensemble multi-modèle et RMSE plus faible pour ISBA-TOP probabiliste). L'utilisation des simulations des deux modèles déterministes conduit à une trop faible dispersion des scénarii (le rapport SIGMA/RMSE toujours inférieur à 1), ce qui n'est pas étonnant vu que seulement deux modèles sont utilisés. L'ensemble obtenu avec ISBA-TOP perturbé est aussi sous dispersif de manière générale mais ce n'est pas toujours le cas selon les bassins.

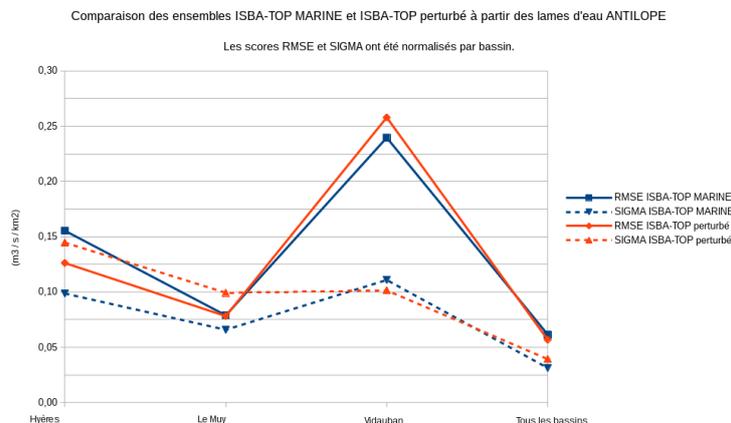


FIGURE 3.7 – Erreurs quadratiques moyennes et écarts-type des débits horaires simulés par les deux ensembles A3 et A4, tous cas confondus par bassin et pour la globalité des bassins.

*Synthèse* : L'utilisation d'ISBA-TOP perturbé conduit à des performances très proches de celle des deux scénarii déterministes en terme de scores.

## 3.2 Incertitude sur la prévision

### 3.2.1 Incertitude sur la prévision des pluies

Comme évoqué en section 2.6, la PEARO a été utilisée en entrée d'ISBA-TOP et de MARINE. Ces ensembles de 12 membres chacun (P1 et P2) sont évalués dans cette section.

Augmenter le nombre de scénarii de pluie dans la chaîne de prévision hydro-météorologique permet d'envisager un plus grand nombre de réponses hydrologiques du système considéré et donc parfois de mieux s'approcher de ce qui est observé. C'est notamment le cas de la prévision de débit faite par ISBA-TOP à partir de la PEARO sur l'Endre au Muy avec le réseau du 26 novembre 2014 18h (graphique 3.8). En

effet, alors qu'AROME en entrée d'ISBA-TOP ne prévoit qu'un débit maximal de  $57,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'utilisation de la PEARO permet d'encadrer le pic de crue entre 50 et  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  pour un pic observé de  $75,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

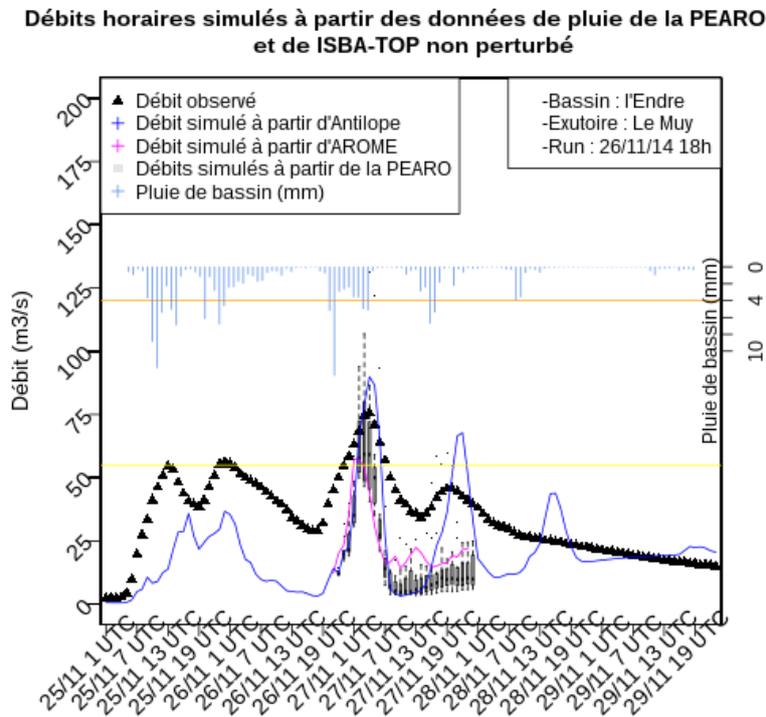


FIGURE 3.8 – Débit horaire de l'Endre au Muy mesuré (triangles noirs), simulé par ISBA-TOP à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévu par ISBA-TOP à partir du réseau du 26 novembre 18h d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) entre le 26 novembre 21h et le 27 novembre 23h.

Une évaluation objective, via le calcul de scores et l'utilisation d'autres outils statistiques, a été réalisée pour comparer les performances des prévisions d'ensemble de débits étudiées dans cette section.

Les scores obtenus en considérant tous les événements (tableau 3.3, graphique 3.9) sont, ici encore, meilleurs pour le bassin versant de l'Endre au Muy (meilleur RPS, plus faible RMSE et plus faible écart-type, notamment en entrée d'ISBA-TOP). Les deux ensembles P1 et P2 sont sous-dispersifs : le rapport SIGMA/RMSE est toujours inférieur à 1.

TABLE 3.3 – Scores sur les débits horaires simulés par les deux ensembles tous cas confondus, par bassin et tous bassins réunis.

		PEARO MARINE			PEARO ISBA-TOP		
		Hyères	Le Muy	Vidauban	Hyères	Le Muy	Vidauban
Par bassin	RPS de l'ensemble	0.005	0.0017	0.0895	0.015	0.0018	0.0085
	SIGMA/RMSE	0.7596	0.3441	0.2672	0.1964	0.1922	0.1330
Total	RPS de l'ensemble	0.0362			0.0081		
	SIGMA/RMSE	0.2477			0.1449		

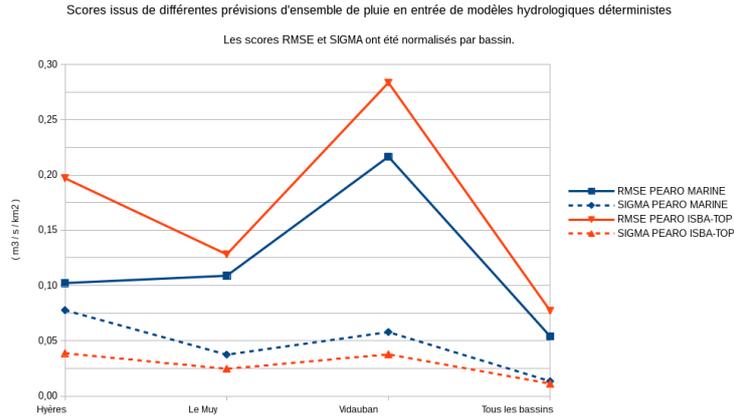


FIGURE 3.9 – Erreurs quadratiques moyennes et écarts-type des débits horaires simulés par les ensembles P1 et P2 tous cas confondus, par bassin et pour la globalité des bassins.

La comparaison de ces ensembles aux observations et au scénario déterministe (AROME opérationnel en entrée d’ISBA-TOP) à l’aide de diagrammes de Talagrand permet de mettre en évidence l’existence de biais des systèmes de prévision d’ensemble et de mieux qualifier leur dispersion et leur fiabilité. En comparant déjà les ensembles aux simulations (graphiques 3.10), bassins et événements tous confondus, on remarque l’existence d’un biais bas des ensembles issus de la PEARO par rapport au scénario déterministe : près d’une fois sur deux le scénario déterministe est supérieur à toutes les valeurs prises par l’ensemble.

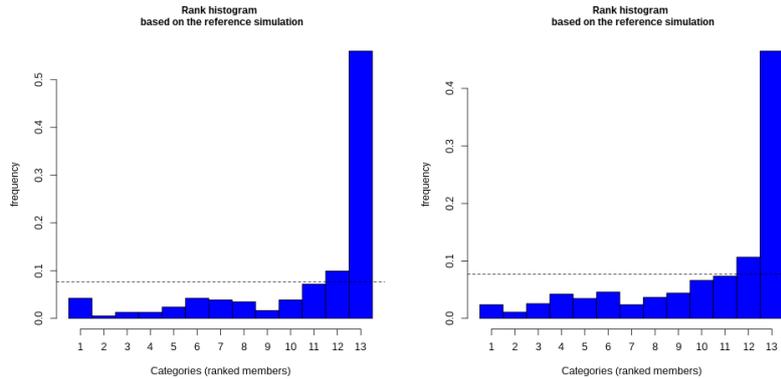


FIGURE 3.10 – Diagrammes de Talagrand classant le scénario déterministe par rapport aux différentes classes des ensembles PEARO/MARINE et PEARO/ISBA-TOP pour des débits  $> 1m^3/s$  sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d’observations.

En comparant ces mêmes ensembles aux observations (graphiques 3.11), on remarque que les ensembles issus de la PEARO sous-estiment également les valeurs de débits observées. En effet, plus d’une fois sur deux l’observation (presque 2 fois sur 3 pour PEARO/ISBA-TOP) est supérieure à toutes les valeurs prises par l’ensemble.

*Synthèse* : L’augmentation du nombre de scénarii de pluie permet d’englober l’observation et ainsi d’obtenir une meilleure prévision des débits quel que soit le modèle hydrologique choisi. Cependant les ensembles sont sous-dispersifs et ont tendance à sous-estimer les observations et le scénario déterministe.

### 3.2.2 Incertitude sur la prévision des pluies et sur la modélisation hydrologique

Ici la PEARO est utilisée en entrée soit d’un modèle hydrologique probabiliste soit de plusieurs modèles hydrologiques. Il s’agit des ensembles P3 et P4 du tableau 2.2 qui visent à déterminer l’apport d’information fourni par la prise en compte des incertitudes sur la modélisation hydrologique en plus de celles sur

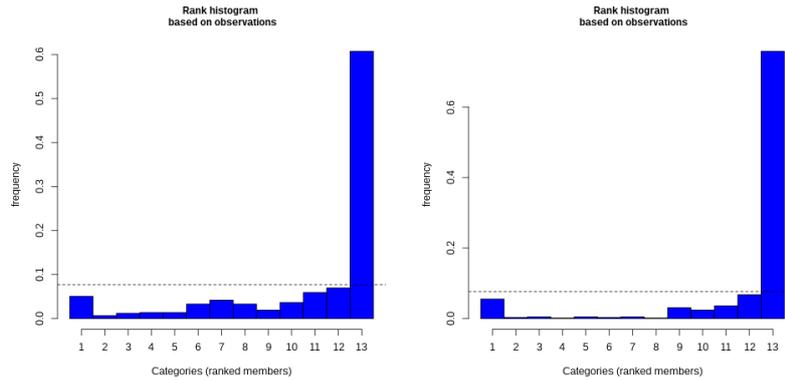


FIGURE 3.11 – Diagrammes de Talagrand classant l’observation par rapport aux différentes classes des ensembles PEARO/MARINE et PEARO/ISBA-TOP pour des débits  $> 1m^3/s$  sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d’observations.

la prévision des pluies.

La figure 3.12 est un bon exemple de l’intérêt de l’utilisation de la version probabiliste d’ISBA-TOP sur celle d’ISBA-TOP déterministe. En effet pour le run de la PEARO du 25 novembre 2014 18h, le débit observé est largement sous-estimé par ISBA-TOP déterministe (en rouge) alors qu’il est bien englobé par l’ensemble issu de la version probabiliste (en gris).

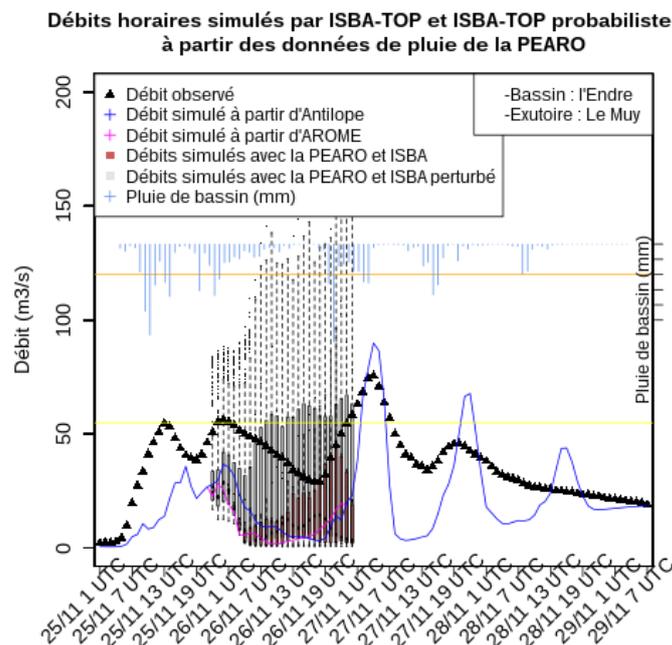


FIGURE 3.12 – Débit horaire de l’Endre au Muy mesuré (triangles noirs), simulé par ISBA-TOP à partir des lames d’eau ANTILOPE (A2, ligne bleue continue), prévu par ISBA-TOP à partir du réseau du 25 novembre 18h d’AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (P2, boîte à moustaches rouges) et prévu par ISBA-TOP probabiliste à partir du réseau du 25 novembre 18h de la PEARO (P3, boîte à moustaches grises) entre le 25 novembre 21h et le 26 novembre 23h.

Par ailleurs, en ajoutant aux scénarios issus de PEARO/ISBA-TOP probabiliste ceux de PEARO/MARINE on peut observer une meilleure chronologie des pics de crue : c’est le cas du 4 février 2014 au Muy (graphiques 3.13) où le débit maximal est mieux encadré par l’ensemble contenant MARINE.

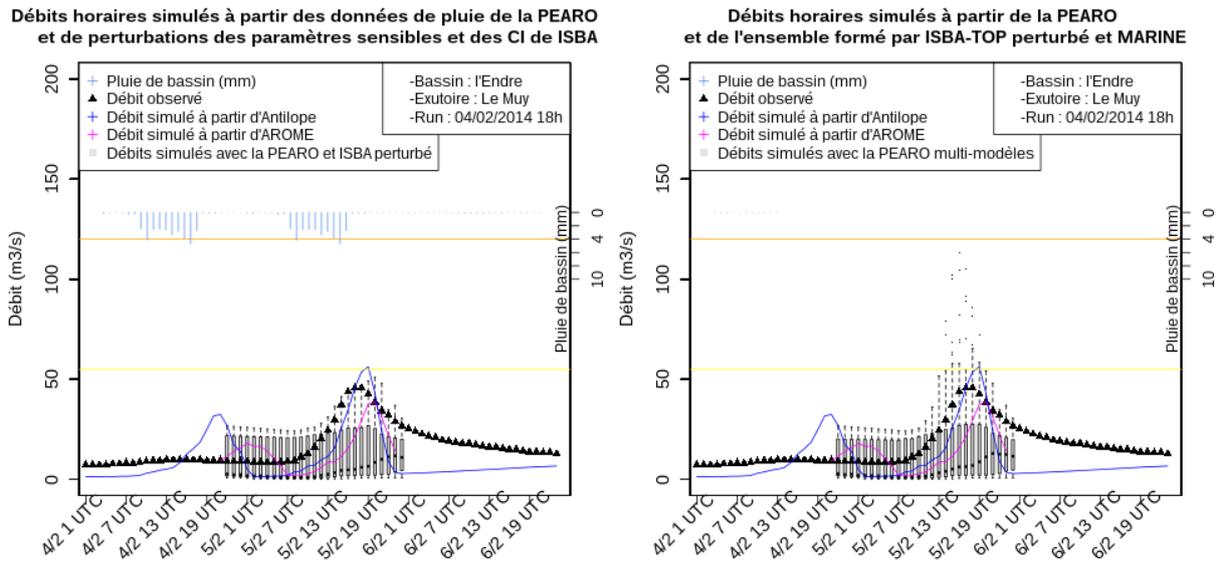


FIGURE 3.13 – Débits horaires de l’Endre au Muy mesurés (triangles noirs), simulés par ISBA-TOP à partir des lames d’eau ANTILOPE (A2, ligne bleue continue) et AROME (ligne rose), prévu par ISBA-TOP probabiliste (P3, figure de gauche) et par ISBA-TOP probabiliste/MARINE (P4, figure de droite) à partir du réseau du 4 février 2014 18h de la PEARO (boîte à moustaches) entre le 4 février 21h et le 5 février 23h.

Les scores obtenus en confondant tous les événements (tableau 3.4, graphique) sont, ici encore, meilleurs pour le bassin versant de l’Endre au Muy (meilleurs RPS, plus faibles RMSE et plus faibles écarts-type, notamment en entrée d’ISBA-TOP probabiliste/MARINE). La PEARO multi-modèles obtient les meilleurs scores par bassin. Les ensembles PEARO/ISBA-TOP probabiliste et PEARO multi-modèles sont sous-dispersifs : le rapport SIGMA/RMSE est toujours inférieur à 1. Les RPS obtenus avec ISBA-TOP probabiliste (par bassin et tous les bassins confondus) sont tous meilleurs que ceux obtenus avec ISBA-TOP déterministe, ce qui montre bien l’apport de cet ensemble par rapport au second.

TABLE 3.4 – Scores sur les débits horaires simulés par les trois ensembles PEARO/ISBA-TOP déterministe, PEARO/ISBA-TOP probabiliste et PEARO multi-modèles, tous cas confondus, par bassin et tous bassins réunis.

		PEARO ISBA-TOP			PEARO ISBA-TOP probabiliste			PEARO multi_modèles		
		Hyères	Le Muy	Vidauban	Hyères	Le Muy	Vidauban	Hyères	Le Muy	Vidauban
Par bassin	RPS	0.015	0.0018	0.0085	0.0127	0.0015	0.0081	0.0116	0.0014	0.0077
	SIGMA/RMSE	0.1964	0.1922	0.1330	0.5446	0.5879	0.2810	0.6763	0.8606	0.3444
Total	RPS	0.0081			0.0069			0.0111		
	SIGMA/RMSE	0.1449			0.3867			0.3565		

Bien que la version déterministe d’ISBA-TOP génère les plus faibles écarts-type, elle comptabilise aussi les erreurs quadratiques les plus importantes (graphique 3.14). Au contraire, l’ensemble PEARO multi-modèles génère les plus forts écarts-type mais les erreurs quadratiques les plus faibles par bassin.

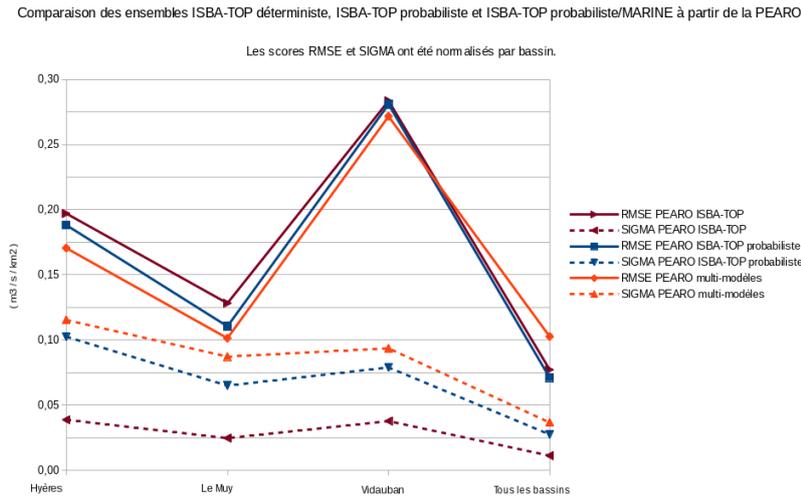


FIGURE 3.14 – Erreurs quadratiques moyennes et écarts-type des débits horaires simulés par les ensembles PEARO/ISBA-TOP déterministe (P2, bordeaux), PEARO/ISBA-TOP probabiliste (P3, bleu) et PEARO multi-modèles (P4, rouge) tous cas confondus, par bassin et pour la globalité des bassins.

Les diagrammes de Talagrand obtenus pour les ensembles PEARO/ISBA-TOP probabiliste et PEARO multi-modèles montrent l'existence de biais bas de ces ensembles vis-à-vis des observations (figures 3.15). L'utilisation de MARINE en plus d'ISBA-TOP probabiliste permet de tempérer ce biais bas en augmentant le nombre de fois où le débit observé est inférieur aux valeurs des membres de l'ensemble.

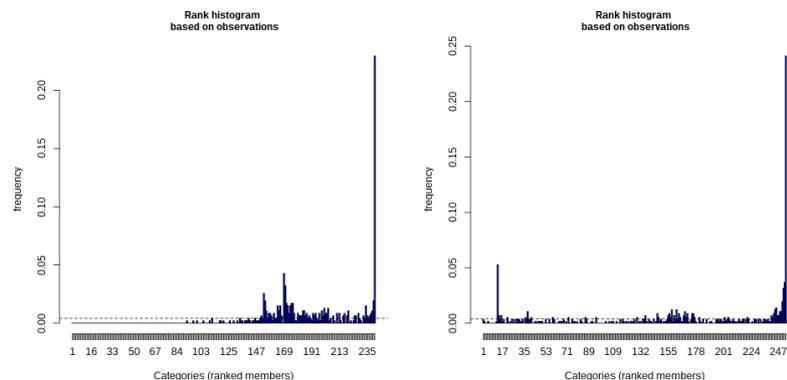


FIGURE 3.15 – Diagrammes de Talagrand classant l'observation par rapport aux différentes classes des ensembles P3 PEARO/ISBA-TOP probabiliste et P4 PEARO multi-modèles pour des débits  $> 1m^3/s$  sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figurent les fréquences d'observations.

*Synthèse* : Utiliser la PEARO en entrée d'ISBA-TOP probabiliste fournit de meilleurs résultats que la PEARO en entrée d'ISBA-TOP déterministe. Par ailleurs si l'on prend aussi en compte les scénarios prévus par MARINE (approche multi-modèles), la prévision est meilleure encore.

L'utilisation de diagrammes ROC permet d'évaluer la qualité de prévisions catégorielles en mettant en rapport le taux de succès et le taux de fausse alarme (section 2.6). Pour cela différentes catégories et valeurs seuils ont été préalablement choisies pour quantifier le nombre d'événements ou de non-événements correctement prévus. On considère les diagrammes ROC, tous bassins et tous événements confondus pour différents seuils (figure 3.17). Les prévisions faites par l'ensemble P1 (PEARO/MARINE) obtiennent de meilleurs scores que la prévision de référence pour des dépassement de seuils de 40, 80, 120 et 160  $m^3/s$  avec des aires sous la courbe ROC supérieures à 0,5. Pour l'ensemble P2 (PEARO/ISBA-TOP), les pré-

visions sont discriminantes pour des dépassements de seuils de 80, 120, 160 et 200  $m^3/s$ . Les plus grandes surfaces sous la courbe ROC de P1 et de P2 sont obtenues pour un seuil de 120  $m^3/s$ . avec une aire la plus étendue pour 120  $m^3/s$ . L'ensemble P4 peine à voir sa courbe au-dessus de la bissectrice, mais cette conclusion est moins évidente en regardant les courbes ROC par bassin (les scores sur l'Endre au Muy étant particulièrement bons). L'ensemble P3 donne des résultats plutôt satisfaisants ici. Par ailleurs, au-delà d'un seuil de 240  $m^3/s$ , si l'on considère la globalité des bassins étudiés et tous les événements confondus, plus aucun ensemble n'est discriminant.

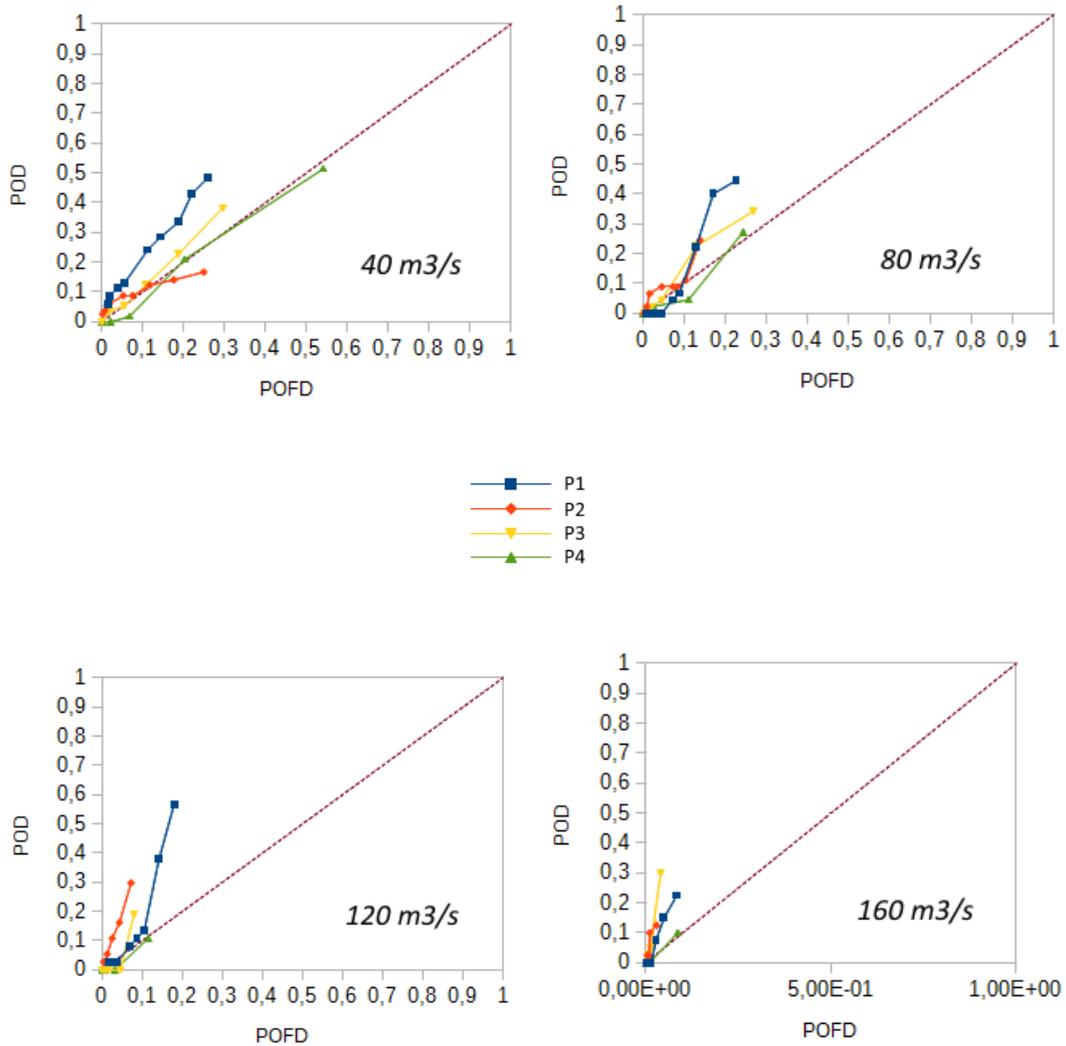


FIGURE 3.17 – Courbes ROC de P1 (en bleu), P2 (en rouge), P3 (en jaune) et P4 (en vert) pour des seuils de 40, 80, 120 et 160  $m^3/s$  sur la globalité des bassins étudiés, tous événements confondus. En ordonnées figure la probabilité de détection (POD) et en abscisses celle de fausse détection (POFD). Une prévision parfaitement discriminante suivrait les bords gauche et haut du graphique et une prévision non discriminante la bissectrice en tirets bordeaux.

Pour simuler les débits horaires des cours d'eau étudiés sur les cas choisis ; les lames d'eau ANTILOPE utilisées en entrée de MARINE, comme d'ISBA-TOP, ne permettent pas de mettre en évidence un bassin sur lequel la simulation est meilleure. MARINE, dont les paramètres ont été calés spécifiquement pour chaque bassin et pour ce type de cas, permet de simuler des débits généralement plus proches des observations qu'ISBA-TOP, modèle paramétrisé non calé. Mais la version probabiliste d'ISBA-TOP conduit à un ensemble de débits simulés qui inclut les observations.

Pour la prévision, les pluies prévues par la PEARO fournies en entrée des mêmes modèles permettent de meilleures prévisions de débits que l'utilisation des prévisions de pluie d'AROME déterministe. Les

ensembles obtenus montrent cependant un biais bas et manquent de dispersion. La prévision parvient à mieux englober les observations quand la version probabiliste d'ISBA-TOP est utilisée et quand on tient compte aussi du modèle MARINE.



## 4 Focus sur un évènement du point de vue opérationnel

Dans cette partie, il s'agit d'étudier un cas et un bassin particuliers pour évaluer l'apport la PEARO si elle avait été disponible pour le prévisionniste hydrologue en SPC.

### Chronologie de la vigilance :

Le 24 novembre à 16h locales, le SPC édite une carte de vigilance verte car les précipitations prévues doivent concerner le Var le lendemain 25 après midi ou soirée (cf. bulletin « AP-BP » du 24 après-midi, mis dans l'annexe 4). Suite aux pluies orageuses tombées dans la nuit du 24 au 25 novembre 2014 sur le département du Var, le prévisionniste du SPC Med Est décide de placer le Gapeau en vigilance crue jaune le 25 à 8h en prévision de précipitations persistantes et de fortes réactions de cours d'eau avec débordements. A 8h, on mesure un débit de  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  à Hyères Ste Eulalie. Puis compte tenu de l'état déjà très humide des sols (figure 4.1) et des pluies répétées et attendues, le Gapeau est placé en vigilance crues orange le 25 à 10h, heure à laquelle le débit atteint  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  à Hyères Ste Eulalie, en hausse rapide. Le seuil orange est véritablement atteint vers 18h, heure locale. La vigilance orange a été levée le 28 à 10h et la jaune le 28 à 16h, signant ainsi la fin de l'épisode.

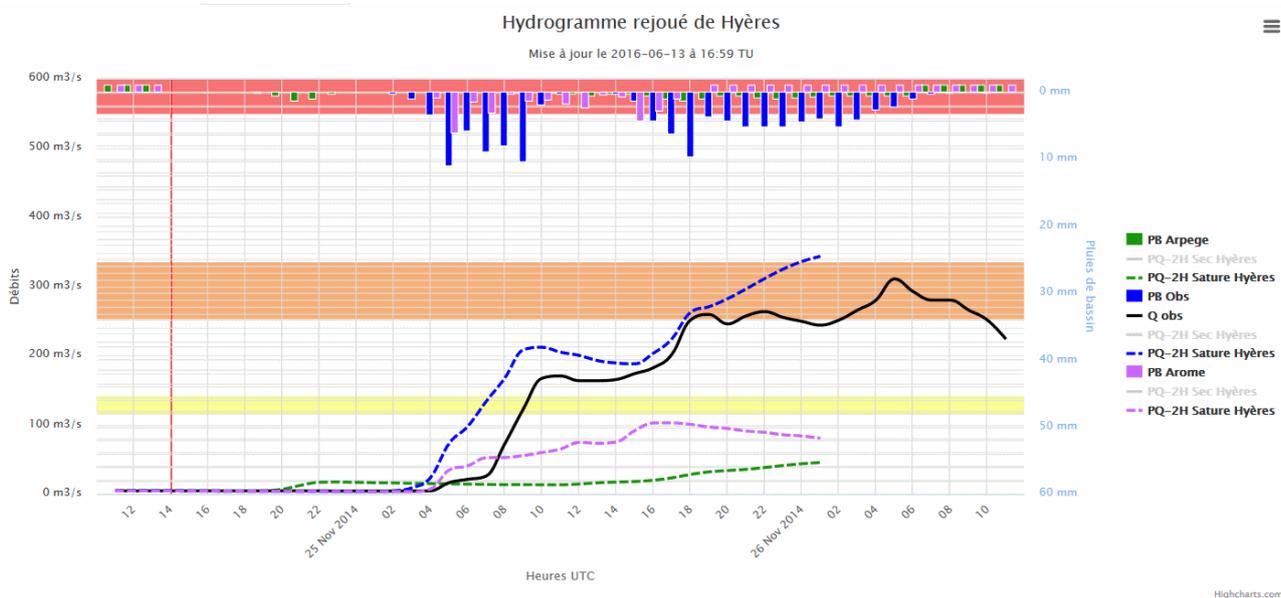


FIGURE 4.1 – Scenarii de pluie et de débits prévus à l'heure de l'élaboration de la vigilance le 24 pour la carte de 16 h (réalisation entre 13h30 et 14h30) (heures locales)

### Les informations disponibles en opérationnel :

En début de vacation, le prévisionniste étudie l'état du sol, les pluies antérieures et la tendance du débit sur les trois dernières heures. La Figure 4.2 montre des sols très humides à saturés le 24 novembre 2014. Cela est notamment dû à la succession des épisodes pluvieux de novembre (4, 9 au 12 et 14-15 novembre). L'absence de pluie du 16 au 24 a cependant permis d'amorcer une baisse de l'humidité des sols au moins dans les bassins karstiques.

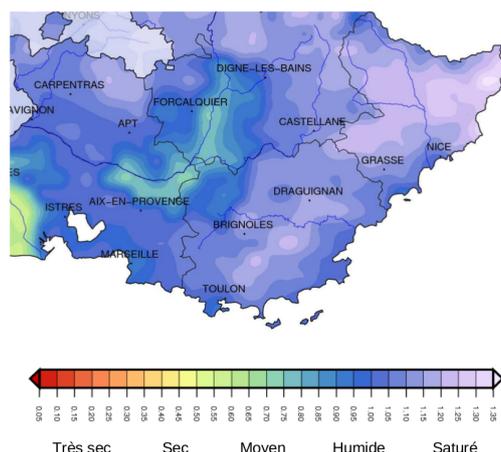


FIGURE 4.2 – Indice d’humidité des sols (SWI) le 24 novembre 2014, veille de la crue du Gapeau.

Ensuite, le prévisionniste s’intéresse au scénario prévu de pluie le plus probable : il examine les prévisions des modèles ARPEGE et AROME et tient compte de la fourchette d’incertitude donnée par le chef prévisionniste régional météorologue (CPR) dans son bulletin de précipitations et son choix de scénario modèle le plus pertinent. Le prévisionniste hydrologue choisit également le modèle hydrologique le plus adapté (PQ et GRP en 2014) selon l’humidité du sol et l’intensité de l’épisode pluvieux (en effet, deux versions du modèles PQ sont disponibles, l’une pour les pluies de faible intensité (moins 8mm par heure), l’autre pour celles d’intensité supérieure à 8mm par heure). En cours d’évènement, le scénario est adapté selon les nouvelles informations : observations, autres bulletins AP/BP, scénario horaire validé par le CPR. Une partie des informations exploitées par le prévisionniste du 24 au 28 novembre 2014 pour la prévision des crues sur le bassin du Gapeau à Hyères) sont regroupées dans la figure/tableau 4.3 :

		Débits (m³/s)						Pluies (mm)					Vigilance Pluie Inondations de Météo- France
		Débit observé	Tendance des 3 dernières heures	Débit maximal prévu par Arpège et PQ	Débit maximal prévu par Arome et PQ	Seuil de vigilance Crues	Débit maximal observé dans les 24h suivantes	Hauteurs de précipitations prévues par APBP pour le jour J	Hauteurs de précipitations prévues par APBP pour le jour J+1	Cumul 24h prévu avec Arpège	Cumul 24h prévu avec Arome	Cumul de pluies 24h observées après	
24 nov 14	5h UTC	4,6	stationnaire	4-5	4,6	vert	16,3	Tr/3	20/40 loc 60	0,4	0	21,2	
	11h UTC	4,6	stationnaire	13-20	13-20	vert	170,5	1/5 loc 10	20/40 loc 60	4	3,7	50,3	
25 nov 14	5h UTC	16,3	augmentation	81-129	101-167	jaune à 8h	310,7	50/80 loc 120	20/40 loc 60	36,4	35,4	97,3	
	11h UTC	170,5	baisse	170-171	150-161	orange	310,7	50/80 loc 120	20/40 loc 70	10,1	17,6	68,6	
26 nov 14	5h UTC	310,7	baisse	300-306	330-451	orange	316,8	40/60 loc 100	30/50 loc 60	34,5	78,5	44,8	
	11h UTC	224	baisse	237-238	263-348	orange	378	40/60 loc 90	30/50 loc 80	23,7	59,4	47,3	
27 nov 14	5h UTC	317	augmentation	300-317	286-340	orange	378	20/40 loc 60	15/30	18,8	39,6	16	
	11h UTC	200	baisse	219-253	234-270	orange	200	40/60	20/40 loc 60	28,8	29,1	14,9	
28 nov 14	5h UTC	95,3	baisse	116-147	104-127	jaune	95,3	15/30	10/20	19,9	14,3	5,6	
	11h UTC	73,7	baisse	72-79	74-79	vert	74	7/15	10/20	5,5	3,4	3,8	

FIGURE 4.3 – Retour sur l’évènement du 25 novembre 2014 avec les données du SPC à 5h UTC et 11h UTC, en préparation du bulletin vigicrues à rédiger.

Finalement, même si le passage en vigilance jaune le 25 à 8h s’est fait sur les observations, le débit du Gapeau à Hyères Sainte Eulalie a bien dépassé deux fois les 275 m³/s, justifiant le passage en vigilance orange le 25 à 10h qui a même donc été anticipé de 8 heures. Un premier pic a été observé le 26 novembre à 6h (310 m³/s à Hyères) et un second le 27 à 7h ( 378 m³/s) (voir triangles noirs des figures 4.5 et 4.8). Pour ces débits, des débordements sont observés au déversoir de Plan du Pont d’abord le 25 vers 19h (pendant moins d’une heure) puis le 26 entre 4h et 11h, et enfin le 27 entre 2h et 10h.

Qu’aurait apporté la PEARO ?

Dans l’expérience menée, seules les simulations démarrant les 24, 25 et 26 novembre à 18UTC sont disponibles. Donc ces simulations n’auraient pu être utilisées que pour l’élaboration des bulletins de 10h les 25, 26 et 27 novembre respectivement. Elles auraient donc pu compléter les trois lignes en rouge dans

le Tableau 4.3 (5h UTC des 25, 26 et 27 Novembre).

La PEARO aurait d'abord fourni au prévisionniste des scenarii de précipitation sur le bassin. On pourrait ajouter au tableau 4.3, de nouvelles colonnes avec l'estimation du cumul 24h de pluie sur le bassin issu de la lame d'eau ANTILOPE et de la PEARO. La figure 4.4 illustre ces valeurs.

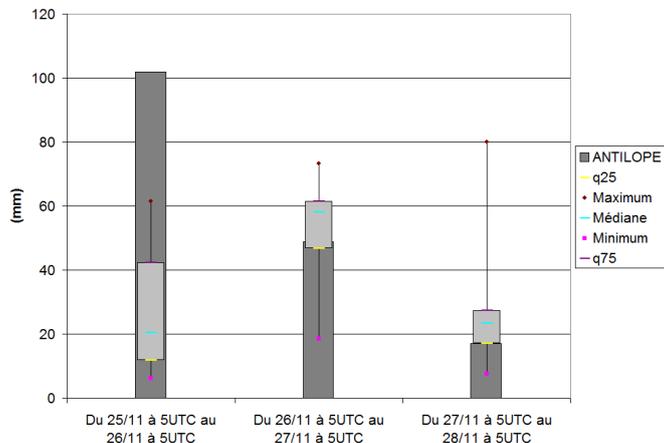


FIGURE 4.4 – Cumuls de pluies sur 24h issues des lames d'eau ANTILOPE ou de différentes simulations de la PEARO.

Les lames d'eau ANTILOPE proposent un cumul de pluie sur 24h très proche de l'indication de la colonne "Cumul de pluies 24h observées après". La PEARO, lancée le 24 à 18UTC, aurait sous estimé les pluies tombées entre le 25/11 à 5UTC et le 26 à 5UTC. Pour les deux autres périodes, le premier quartile fournit la meilleure estimation des pluies de bassin. Si la PEARO n'aurait pas apporté d'information pour la prévision du 25 au 26 novembre, elle aurait proposé pour les deux jours suivants une bonne approximation du cumul de pluie sur le bassin (via l'intervalle inter-quartile).

Pour la prévision quantitative de débits, la figure 4.5 montre les observations de débits, les simulations avec MARINE (à gauche) et ISBA-TOP probabiliste (à droite) utilisant en entrée les lames d'eau ANTILOPE et les prévisions de la PEARO démarrant le 25/11 à 18UTC.

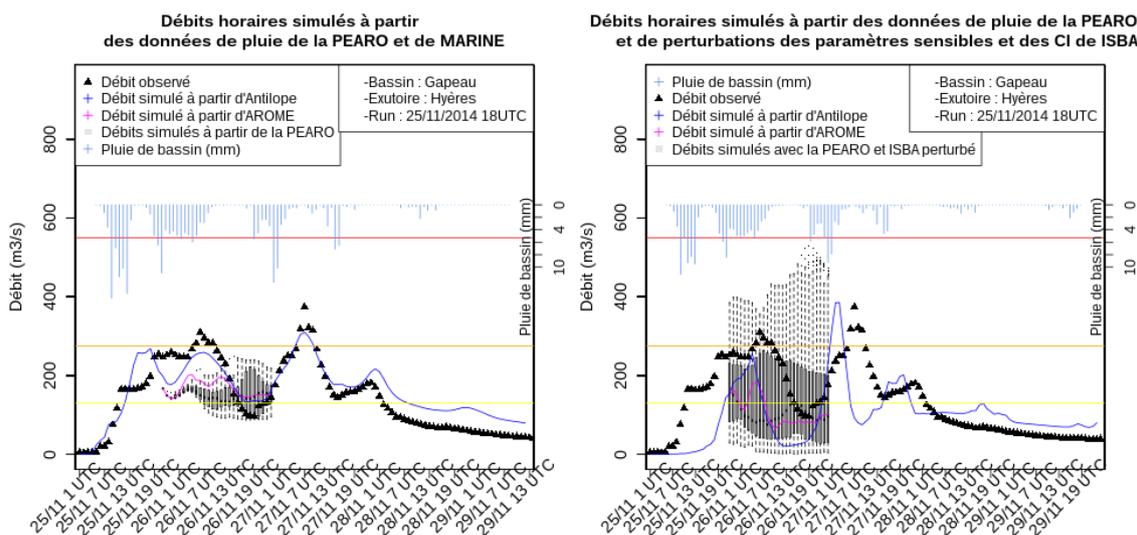


FIGURE 4.5 – Débits horaires du Gapeau à Hyères mesurés (triangles noirs), simulés à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévus à partir du réseau du 25/11 18UTC d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) novembre 21h et le 26 novembre 23h. Les pluies sont utilisées entrée de MARINE (à gauche) ou d'ISBA-TOP (à droite).

La PEARO en entrée de MARINE génère des débits uniquement de vigilance jaune et ne donne pas de signal au prévisionniste du dépassement du seuil orange au cours de la journée du 26/11. C'est le cas avec ISBA-TOP probabiliste mais la dispersion est beaucoup trop forte : le quantile 75 % tangente en effet le seuil de vigilance orange mais la dispersion de l'ensemble est très forte. Les maxima tangentant le rouge amèneraient à s'interroger sur l'origine du scénario AROME qui l'engendre et d'avoir une expertise du Chef Prévisionniste Régional.

La figure 4.6 illustre la chronologie des précipitations horaires prévues par les différents membres de PEARO démarrant le 25 novembre 18 UTC ainsi que les débits simulés à partir de ces pluies.

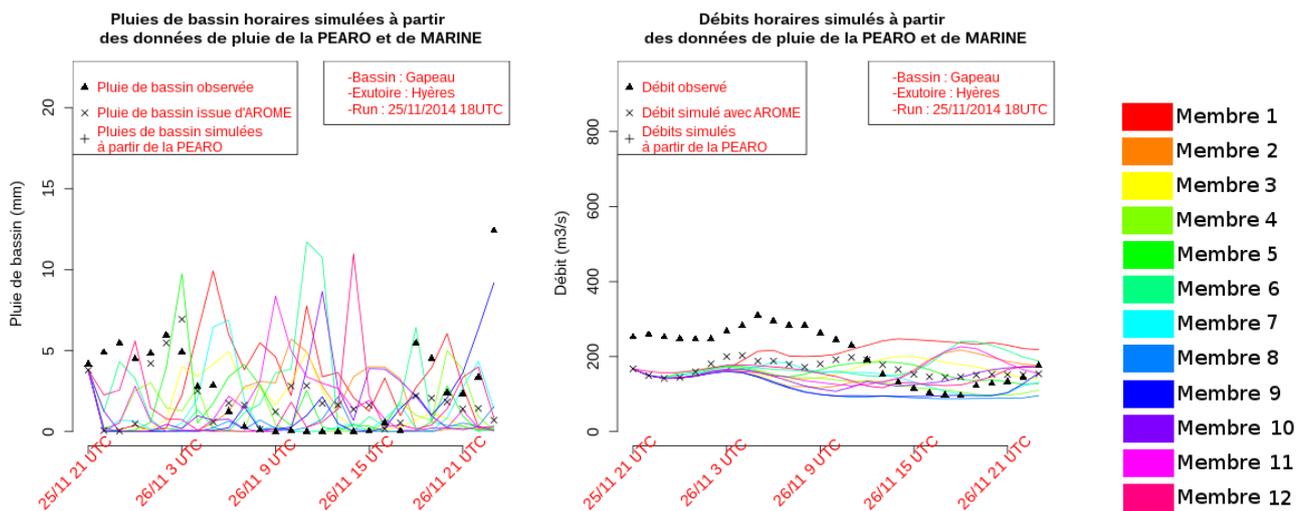


FIGURE 4.6 – Pluies de bassin horaires (à gauche) et débits horaires correspondants (à droite) observés (triangles noirs) et simulés par AROME (croix noires) et par les membres de la PEARO à Hyères du 25 novembre 21h au 26 novembre 23h. Chaque membre de la PEARO est caractérisé par une même couleur selon la palette illustrée tout à droite.

Le premier membre (en rouge) est celui qui simule le débit le plus important sur cette période. La répartition spatiale des pluies proposée par ce membre est illustrée dans la figure 4.7.

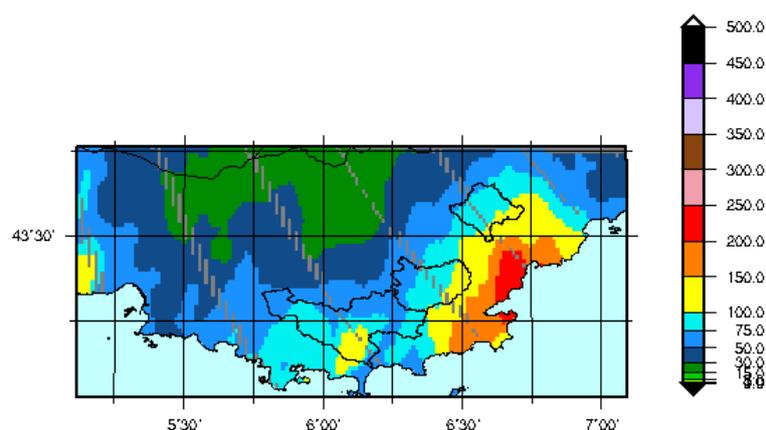


FIGURE 4.7 – Cumuls de pluies sur 24h (en mm) issues du premier membre de la PEARO entre le 25 novembre 2014 21UTC et le 26 novembre 23UTC.

Ces éléments peuvent être un support pour la discussion entre le prévisionniste météorologue et le prévisionniste hydrologue quant à la vraisemblance du scénario le plus pessimiste.

Pour prévoir les débits de la journée du 27/11, la PEARO en entrée de MARINE sous-estime les débits (voir figure 4.8). Toutefois par rapport à la prévision déterministe (ligne rose), la PEARO permet de simuler des débits légèrement supérieurs et frôlant le seuil de vigilance orange au moment effectif du pic

de crue. L'utilisation d'ISBA-TOP conduit à des maxima du bon ordre de grandeur, au dessus du seuil de vigilance orange, mais au prix d'une très forte dispersion encore une fois. Un prévisionniste tirerait peut d'information sur la dynamique de la crue avec la prévision de la figure droite 4.8.

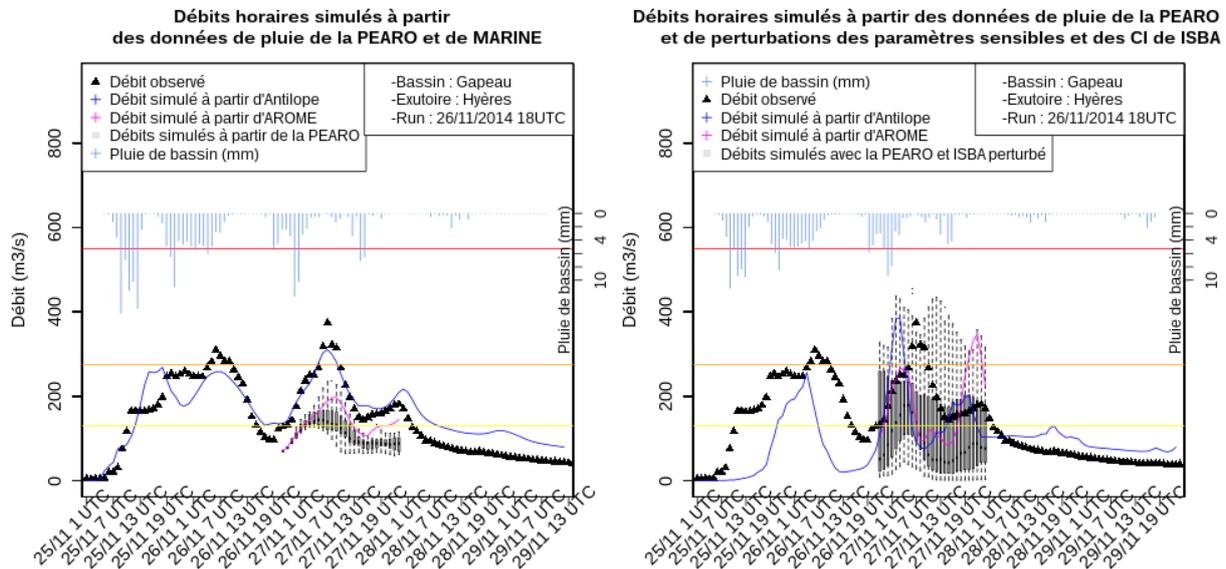


FIGURE 4.8 – Débits horaires du Gapeau à Hyères mesurés (triangles noirs), simulés à partir des lames d'eau ANTILOPE (ligne bleue continue) et prévus à partir du réseau du 26/11 18UTC d'AROME (ligne rose continue) et de la PEARO (boîte à moustaches grises) novembre 21h et le 26 novembre 23h. Les pluies sont utilisées entrée de MARINE (à gauche) ou d'ISBA-TOP (à droite).

*Synthèse* : Les tendances suivies par les différents modèles vont dans le même sens que celle observée. Cependant cette étude ne permet pas de qualifier nettement l'apport de l'utilisation de la PEARO pour la prévision opérationnelle de crue, ni de savoir si grâce à elle le passage en vigilance jaune du 25 novembre en matinée aurait pu être anticipé. Pour cela, il faudrait pouvoir analyser les sorties de la PEARO et d'AROME opérationnel plus fréquentes (6 UTC, 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC) tout au long de l'épisode (en commençant dès le 23-24 novembre par exemple). Par ailleurs les prévisions probabilistes présentées ici, comme par exemple ISBA-TOP probabiliste, sont encore en phase d'amélioration. Une version probabiliste d'ISBA-TOP moins dispersive permettrait notamment d'interpréter de manière plus fiable les dépassements de seuil de vigilance.



# Conclusion

L'objectif de cette étude était l'évaluation de la prévision d'ensemble AROME pour la prévision d'ensemble de débits sur des bassins versants du SPC Méditerranée Est. L'utilisation de différents modèles hydrologiques permettait de prendre en compte l'incertitude sur la modélisation hydrologique. Cinq situations fortement précipitantes entre janvier 2014 et octobre 2015 sur les bassins versants du Gapeau, de l'Aille et de l'Endre ont été étudiées. Les conclusions seront donc à considérer prudemment puisqu'elles se basent sur un nombre réduit d'événements et sur un type d'évènement météorologique unique (situation orageuse).

Un premier travail a été d'étudier les incertitudes liées uniquement à la modélisation hydrologique. Les champs de pluie utilisés étaient donc issus d'observations (lames d'eau ANTILOPE). La capacité des modèles hydrologiques à simuler des débits horaires a été évaluée via plusieurs critères : scores, attentes opérationnelles, bonne simulation des pics de crue, de la chronologie. . . Une première conclusion a été qu'il n'y avait pas un bassin pour lequel les débits sont systématiquement mieux simulés que pour les autres. Cette conclusion est valable avec les deux modèles ISBA-TOP et MARINE. D'une manière générale, sur les événements étudiés et sur les trois bassins, les scores calculés sur les débits horaires montrent que MARINE permet de mieux simuler les débits qu'ISBA-TOP. Cette conclusion était attendue puisque les paramètres de MARINE sur les bassins étudiés sont obtenus par calage alors qu'ils sont donnés par une relation dépendant des textures de sol pour ISBA-TOP. La qualité de ces données de texture de sol est à vérifier car les résultats obtenus avec ISBA-TOP sur des bassins versants cévenols étaient beaucoup plus satisfaisants. L'intérêt d'un modèle hydrologique non calibré est d'être utilisable quelque soit le bassin versant. Ses limites apparaissent ici et montrent l'importance de prendre en compte l'incertitude sur les paramètres hydrodynamiques du modèle. Ensuite, une approche multi-modèles a été adoptée en considérant les simulations des deux modèles MARINE et ISBA-TOP, forcés par des champs de pluie observés. Les scénarii obtenus ont un caractère sous-dispersif. Enfin une version probabiliste du modèle ISBA-TOP (où les paramètres et les conditions initiales de sol ont été perturbés) a aussi été utilisée afin de considérer d'une autre manière l'incertitude sur la modélisation hydrologique. Cette version donne de meilleurs résultats que la version déterministe d'ISBA-TOP. L'ensemble obtenu avec ISBA-TOP probabiliste est aussi sous-dispersif de manière générale mais ce n'est pas toujours le cas selon les bassins. L'approche multi-modèles et la version probabiliste d'ISBA-TOP ont des comportements similaires et donnent leurs meilleurs scores sur le bassin versant de l'Endre, au Muy.

Un deuxième travail a été de considérer les incertitudes associées à la prévision météorologique en utilisant des champs de pluies issus de la prévision d'ensemble AROME. Les incertitudes sur les pluies prévues ont été considérées séparément des incertitudes sur la modélisation hydrologique puis les deux sources ont été considérées ensemble. L'utilisation d'une prévision d'ensemble météorologique permet de considérer les incertitudes sur la localisation, la chronologie et l'intensité des événements pluvieux et ainsi d'obtenir une prévision des débits, englobant l'observation, meilleure qu'en utilisant des prévisions déterministes quel que soit le modèle hydrologique choisi. Cependant les ensembles de débits issus de la PEARO en entrée de MARINE ou d'ISBA-TOP sont sous-dispersifs et ont tendance à sous-estimer les débits par rapport aux observations et aux simulations réalisées à partir de pluies observées. Ce résultat converge avec celui obtenu lors d'une étude précédente sur des bassins cévenols mais une analyse sur un échantillon plus grand reste souhaitable. Par ailleurs, au-delà d'un seuil de  $240 \text{ m}^3/\text{s}$ , sur tous les bassins étudiés et tous les événements confondus, plus aucun ensemble n'est discriminant. Le caractère sous-dispersif et le biais bas par rapport aux observations restent observés en combinant l'incertitude sur les pluies, celle sur la modélisation hydrologique et sur la connaissance de l'état du sol. Les scores

obtenus en considérant tous les événements sont, ici encore, meilleurs pour le bassin versant de l'Endre au Muy. Utiliser la PEARO en entrée d'ISBA-TOP probabiliste fournit de meilleurs résultats que la PEARO en entrée d'ISBA-TOP déterministe. Par ailleurs la prise en compte des scénarios prévus par MARINE (approche multi-modèles), améliore la qualité de la prévision.

Dans la dernière partie de ce travail, le point de vue d'un prévisionniste hydrologue a été adopté sur l'événement du 25 novembre 2014 sur le bassin du Gapeau à Hyères. L'utilisation de la PEARO et des modèles MARINE et ISBA-TOP aurait-elle aidé pour les décisions de passage en vigilance sur le bassin? L'expertise humaine exercée au SPC a permis le passage des bons seuils de vigilance crues aux bons moments. Par ailleurs, les modèles étudiés proposaient des débits prévus évoluant dans le même sens que les observations. L'apport de l'utilisation de la prévision d'ensemble en opérationnel et sur le passage des vigilances concerne surtout les pluies de bassin, il est plus difficile à mettre en évidence lorsque l'on considère les débits. Pour cela, il faudrait pouvoir analyser les différentes méthodes de prévision d'ensemble sur plus de réseaux (6 UTC, 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC) tout au long de l'épisode (en commençant dès le 23-24 novembre par exemple). De même, rien que pour AROME par exemple, les prévisions faites sur tous ses réseaux (6 UTC, 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC), forment un ensemble "décalé dans le temps" qu'il serait intéressant d'étudier. De plus, une version probabiliste d'ISBA-TOP moins dispersive permettrait notamment d'interpréter de manière plus fiable les dépassements de seuil de vigilance. Comme tout nouvel outil, sa prise en main et la bonne connaissance de son comportement face à de nombreuses situations est indispensable aux prévisionnistes hydrologues. L'utilisation et les retours d'expérience faits sur ces modèles ensemblistes permettront leur amélioration et ainsi une efficacité plus importante en opérationnel.

Outre ces perspectives d'améliorations de ces modèles probabilistes, il conviendrait de poursuivre cette étude en considérant d'autres événements qui sont survenus les années précédentes dans le but d'obtenir des scores plus robustes et plus représentatifs du comportement des prévisions d'ensemble. Cela permettrait peut-être, à terme, de dégager un ou plusieurs comportements des modèles suivant chaque type de situation.

Augmenter le nombre de modèles dans l'approche multi-modèles serait pertinent afin de constituer un ensemble avec une dispersion plus satisfaisante que lorsque l'on ne considère que MARINE et ISBA-TOP.

Au niveau de la prévision des pluies, [Vincendon et al. \(2010\)](#) ont développé une méthode de perturbation des prévisions de pluies. Appliquer cette méthode aux membres de la PEARO permettrait d'augmenter le nombre de scénarii de précipitations, ce qui pourrait améliorer la dispersion des scénarii.

Dans ce stage, les échéances étudiées vont de 3h à 36h environ. Les échéances plus courtes (de 1 à 3h) sont d'un grand intérêt également pour les SPC comme le SPC Med Est. Le modèle de prévision immédiate de Météo-France, AROME PI, simule des précipitations à ces échéances toutes les heures. Pour les considérer, le même type d'approche probabiliste que dans ce stage sera à utiliser compte tenu du grand nombre de scénarii disponibles pour une échéance donnée.

# Annexes

## 4.1 Annexe 1 : le SPC MedEst

L'État assure l'organisation de la surveillance, de la prévision et de la diffusion de l'information sur les crues pour les cours d'eau les plus importants du fait des particularités de leur fonctionnement hydrologique, du nombre de communes concernées et des dommages potentiels dans les zones qu'ils peuvent inonder. Le réseau des SPC se compose :

- du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), à Toulouse et rattaché au service des risques naturels et hydrauliques de la Direction générale de la prévention des risques ;
- de 19 services de prévisions des crues (SPC) répartis sur le territoire de la métropole continentale selon une logique territoriale et hydrologique, ainsi que des cellules de veille hydrologique (CVH) en Corse et dans les DOM ;
- de 28 unités d'hydrométrie (UH) en métropole et 5 en Outre-mer qui mesurent, ajustent, archivent (dans la base nationale BD HYDRO) et analysent les niveaux et débits des cours d'eau.

Les collectivités, elles, gèrent avec l'appui technique des SPC les dispositifs de surveillance des cours d'eau dont l'État ne s'occupe pas. Le SPC Méditerranée Est concerne les Bouches-du-Rhône, le Var et les Alpes-Maritimes ainsi qu'une partie des Alpes de Haute-Provence pour la surveillance du haut bassin du Var (figure 4.9). Il recouvre aussi l'ensemble des bassins versants des cours d'eau côtiers situés à l'est du Rhône, soit 249 km de cours d'eau sur 63 communes. Il surveille donc l'Huveaune de Saint-Zacharie à Aubagne, le Gapeau de Soliès-Pont à la mer, l'Argens de Carcès à la mer, la Nartuby de Draguignan jusqu'au Muy et le Var de Villeneuve d'Entraunes jusqu'à la mer. La Corse dépend également du SPC Méditerranée Est, bien qu'aucun dispositif de prévision ni d'alerte ne soit installé sur l'île.



FIGURE 4.9 – SPC Méditerranée Est (sans la Corse)

Contrairement aux autres SPC qui sont rattachés à une direction départementale des territoires (DDT) ou à une direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL), le SPC MedEst relève (figure 4.10) de la direction interrégionale de Météo-France. Les SPC utilisent les données et outils de prévision des crues suivants :

- Mesures en temps réel sur plus de 1 400 stations hydrométriques et 570 stations pluviométriques (en plus des 1 200 stations de Météo-France) ;
- réseau ARAMIS des 24 radars météorologiques de Météo-France ;
- prévisions météorologiques de Météo-France ;
- connaissance de l'humidité des sols ;
- outils de détection des risques hydrologiques (modèles génériques sur la base de prévisions à moyen terme) ;
- règles basées sur l'expérience et la formalisation de l'expertise sur les crues locales ;
- plus généralement, modèles de prévision des écoulements sur les bassins versants et de propagation hydraulique des crues, outils « calés » sur des crues antérieures et, pour certains, « recalés » en temps réel par assimilation des données observées.

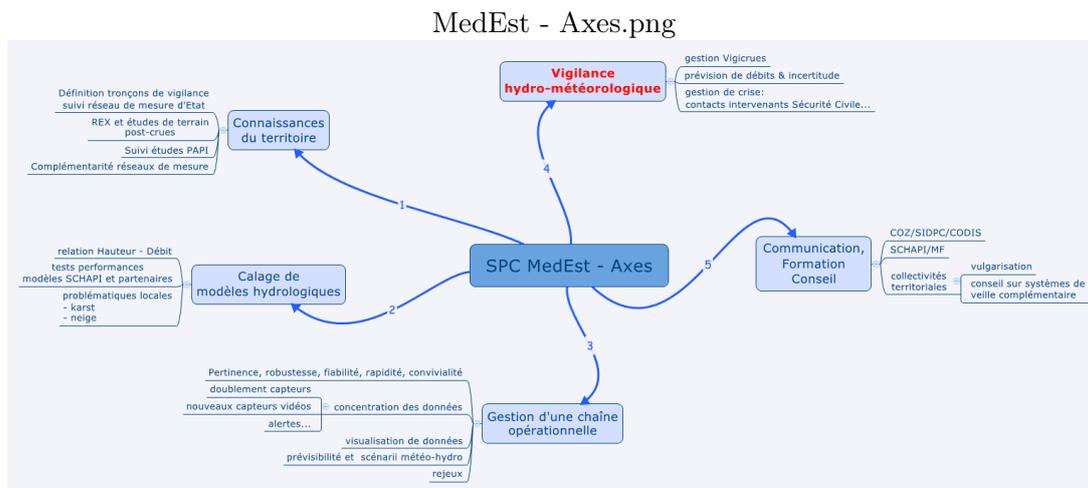


FIGURE 4.10 – Les différents axes du SPC MedEst.

A partir de ces outils et des critères de vigilance existants (intensité de la crue, durée de l'événement, période de l'année, concomitance...) un niveau de vigilance pour les 24 heures est choisi sur une échelle de couleurs - vert, jaune, orange et rouge - du niveau de risque le plus faible au plus élevé (figure 4.11). Le SCHAPI assure la cohérence nationale des couleurs attribuées à chaque tronçon de cours d'eau surveillé, avant de les publier sur le site Vigicrues.

Couleur de vigilance	Qualification du risque	Caractérisation - Conséquences potentielles sur le terrain
<b>ROUGE</b>	Risque de crue majeure. Menace directe et généralisée sur la sécurité des personnes et des biens	Crue rare et catastrophique. Menace imminente et/ou généralisée sur les populations : nombreuses vies humaines menacées. Violence de la crue. Débordements généralisés. Evacuations généralisées et concomitantes (plusieurs enjeux importants impactés en même temps). Paralyse à grande échelle du tissu urbain, agricole et industriel : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bâti détruit</li> <li>• Itinéraires structurants coupés</li> <li>• Hôpitaux et services publics vitaux perturbés voire inopérants.</li> <li>• Réseaux perturbés voire inopérants (électricité, transports, eau potable, assainissement, télécommunications, ...)</li> </ul>
<b>ORANGE</b>	Risque de crue génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes.	Débordements généralisés. Vies humaines menacées. Quartiers inondés : nombreuses évacuations. Paralyse d'une partie de la vie sociale, agricole et économique : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Itinéraires structurants coupés</li> <li>• Hôpitaux et services publics vitaux perturbés voir inopérants.</li> <li>• Réseaux perturbés (électricité, transports, eau potable, assainissement, télécommunication ...)</li> </ul>
<b>JAUNE</b>	Risque de crue ou de montée rapide des eaux n'entraînant pas de dommages significatifs, mais nécessitant une vigilance particulière dans le cas d'activités saisonnières et/ou exposées.	Perturbation des activités liées au cours d'eau (pêche, canoë, ...). Premiers débordements dans les vallées. Débordements localisés, coupures ponctuelles de routes secondaires, maisons isolées touchées, caves inondées. Activité agricole perturbée. Evacuations ponctuelles.
<b>VERT</b>	Pas de vigilance particulière requise	Situation normale

FIGURE 4.11 – Couleurs des vigilances.

Les seuils de vigilance associés au bassin du Gapeau à Hyères et La Crau sont illustrés figure 4.12

Niveau de Vigilance	Tronçon GAPEAU	Stations de référence					
		LA CRAU - DECAPRIS sur le REAL-MARTIN			HYERES - St Eulalie		
	Superficie du bassin versant aux stations	293 km <sup>2</sup>			535 km <sup>2</sup>		
	Définition						
		Hauteur (m)			Hauteur (m)		
		Débit (m <sup>3</sup> /s)			Débit (m <sup>3</sup> /s)		
4 - ROUGE	Risque de crue majeure. Menace directe et généralisée de la sécurité des personnes et des biens	4,24 m	300 m <sup>3</sup> /s	19 Janv 2014	3,01 m	380+200 (*)	19 Janv 2014
		3,97 m		18 Janv 1999	2,76 m		04 Fév 1976 18 Janv 1999 17 Janv 1978
3 - ORANGE	Risque de crue génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes.	3,87 m		09 Nov 2011	2,66 m	300 + 70 (**)	09 Nov 2011
		3,75 m		14 Déc 2012	2,41 m	255 m <sup>3</sup> /s	25 Déc 2000
2 - JAUNE	Risque de crue ou de montée rapide des eaux n'entraînant pas de dommages significatifs, mais nécessitant une vigilance particulière dans le cas d'activités saisonnières et/ou exposées	3,35 m	135 m <sup>3</sup> /s	15 Juin 2010	2,30 m 2,25 m 2,11 m	235 m <sup>3</sup> /s 220 m <sup>3</sup> /s 190 m <sup>3</sup> /s	14 Déc 2012 16 Déc 2008 26 Oct 2012
		2,44 m	76 m <sup>3</sup> /s	19 Nov 2012	1,63 m	121 m <sup>3</sup> /s	23 Janv 2013
1 - VERT	Occurrence 1 à 2 ans						
	Pas de vigilance particulière requise						

FIGURE 4.12 – Vigilances sur le bassin versant du Gapeau.

## 4.2 Annexe 2 : Domaine d'étude

Le trois bassins versants varois étudiés au cours de ce stage, ceux du Gapeau, de l'Endre et de l'Aille sont décrits plus en détails dans cette section.

### 4.2.1 GAPEAU

Le bassin versant du Gapeau s'étend sur 548 km<sup>2</sup>, concerne 23 communes et possède trois cours d'eau principaux : le Gapeau, le Réal Martin et le Réal Collobrier (figure 4.13). Entièrement intégré dans le département du Var, il couvre une zone calcaire (forte perméabilité) en partie karstique (effet tampon) du Nord de Toulon, une partie du massif des Maures, et traverse la plaine côtière de Hyères-les-Palmiers avant de se jeter dans la Méditerranée.

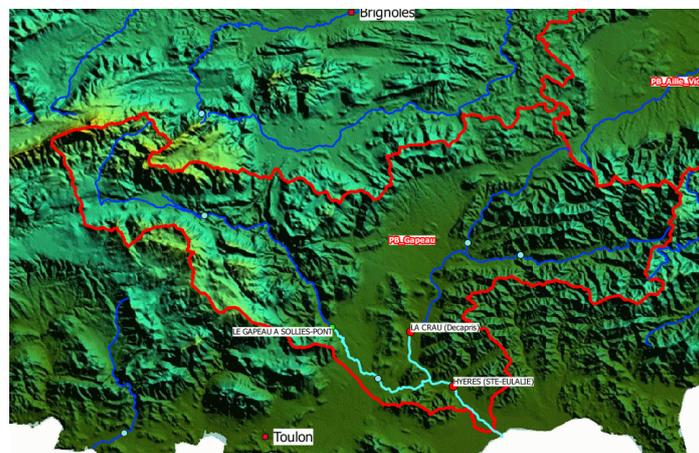


FIGURE 4.13 – Bassin versant du Gapeau.

Comme la plupart des fleuves côtiers de la région, le Gapeau est marqué par un réseau hydrographique fortement influencé par la géologie et le relief, avec une partie amont à pente assez forte puis une plaine alluviale large et enfin une plaine côtière, constituant autrefois une vaste zone de divagation du lit. La configuration des bassins versants ayant conservé un fonctionnement naturel, entraîne des crues intenses et très rapides du bassin amont puis, sur la partie aval, des débordements fréquents et sur de grandes surfaces, avec activation de zones d'expansion des crues et net ralentissement de la propagation de la crue. La modification des cours d'eau (recalibrage, rectification dans la traversée des zones agricoles, endiguement et mise en place de réseaux de drainage) permet de réduire fortement le rôle d'écrêtement des crues des ruisseaux joué par cette plaine, et de favoriser l'évacuation rapide des eaux au moyen d'un réseau dense de fossés. Les fortes crues du bassin du Gapeau sont très majoritairement dues à la réponse hydrologique du Réal Martin. Le contexte géologique est le premier facteur naturel qui explique la réponse hydrologique d'un bassin versant, notamment au travers des paramètres suivants :

- le relief ;
- la nature et l'érodabilité du socle rocheux : massifs de gneiss et granite sur une partie du massif des Maures : érosion par arénisation (avec formation de grandes quantités de sable et un relief de forme très « arrondie »), formations de schistes nettement moins érodables, calcaire : forte perméabilité et faible ruissellement en surface ;
- l'épaisseur de la couche des sols meubles en surface et de la végétation (interception des eaux pluviales et de ruissellement par le système racinaire).

Il est aussi nécessaire de prendre en compte les échanges entre rivières et nappes, ainsi qu'entre nappes et rivières à la fois pour intégrer les apports en période de crue et pour construire une stratégie de réduction du risque d'inondation qui respecte ce fonctionnement, en particulier la réalimentation périodique de la nappe alluviale par les eaux de débordement du Réal Martin et du Gapeau aval. L'occupation des sols influence le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant par le taux de ruissellement et par les conditions d'évacuation des eaux de ruissellement. Pour le Gapeau quatre types de zones prédominent : les zones naturelles (forêts, pelouses, boisements), agricoles (terres arables, cultures), d'habitats et d'activités (tissu urbain, habitations) et zones d'aménagements ou de loisirs (zones industrielles ou commerciales). Le bassin du Gapeau bénéficie d'un suivi hydrométrique important (19 stations sur le bassin versant) ainsi que d'un suivi pluviométrique constitué : d'anciens postes pluviométriques (valeurs de cumuls journaliers) , de stations automatiques (données au pas de temps horaire) et d'une couverture radar complète (permettant le calcul des lames d'eau ANTILOPE au pas de temps horaire et à diverses échelles spatiales).

#### 4.2.2 AILLE

Le cours de l'Aille traverse l'ensemble de la Plaine des Maures, entre Gonfaron et les Arcs. Il débouche sur l'Argens, au sud-est des Arcs après avoir parcouru les gorges de l'Aille, dans le Massif cristallin des Maures (figure 4.14). Le bassin a une superficie de 279,06 km<sup>2</sup>. L'affluent principal, le Riautord prend sa source dans le calcaire, au Luc, tandis que tous les autres affluents descendent du versant nord des Maures. L'essentiel du site repose sur la dépression permienne et le lit est constitué de grès. Le site est bordé d'ensembles de formations boisées (chênes et pinèdes), buissonnantes et herbacées parfois denses. Des prairies, des friches et une ancienne gravière bordent ponctuellement le cours d'eau.



FIGURE 4.14 – Bassin versant de l'Aille.

Le bassin versant de l'Aille a une forme proche d'un amphithéâtre avec des reliefs bordiers (massifs calcaires et triasiques au nord et massif des Maures au sud) qui encadrent une dépression permienne (enfoncement datant d'il y a plus de 260 millions d'années) longue et étroite. Cette configuration en amphithéâtre favorise la genèse de crues importantes et rapides, bien que la déclivité du bassin soit globalement faible. En plus de cette configuration, la morphologie du réseau hydrographique de l'Aille fait que de nombreux affluents se rejoignent sur un tronçon assez court. En cas de crues, les débordements deviennent généralisés à l'aval de ce tronçon. Le risque de très fortes crues en cas de violents orages est élevé car le bassin versant se développe en partie dans des terrains cristallo-permiens. Ainsi, les affluents de rive droite coulent sur des roches imperméables. Les possibilités d'infiltration pour ces cours d'eau sont donc réduites. Ils engendrent un fort apport d'eau par ruissellement. Même si ce sont les affluents du sud du bassin versant (rive droite) qui engendrent le plus fort apport d'eau, ce sont les cours d'eau drainant le nord-ouest du bassin versant qui affectent le plus les habitations et qui entraînent de nombreux dégâts aux infrastructures routières.

### 4.2.3 ENDRE

Le bassin versant de L'Endre présente une superficie de l'ordre de  $187,39 \text{ km}^2$ . Il prend sa source au Nord de Callas. Sur la partie amont du bassin versant, le ruisseau de Saint Pons, affluent rive droite de l'Endre, draine tout le chevelu hydrographique de la commune de Figanières. La rivière l'Endre est un affluent de l'Argens (altitude du lieu de confluence de 10m)(figure 4.15). La vallée de l'Endre est peu occupée et la partie basse de la plaine de l'Endre est occupée par des plans d'eau. La végétation qui borde le cours d'eau est bien fournie et des alluvions (dépôts de débris de sable, vase ou argile) y ont formé des sortes de petites plages.

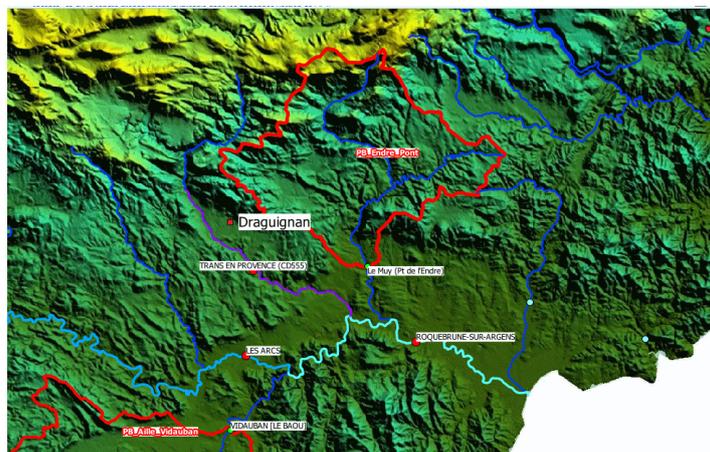
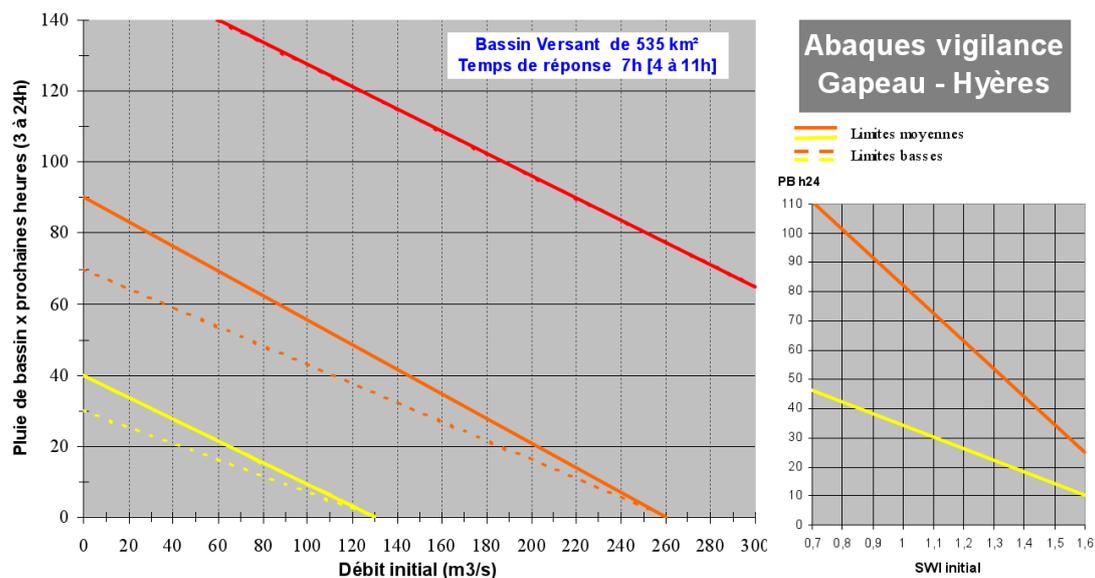


FIGURE 4.15 – Bassin versant de l'Endre.

### 4.3 Annexe 3 : Exemple d'abaques vigilance sur le Gapeau



Les limites des niveaux de vigilance dépendent de l'intensité des précipitations et de l'état de saturation des sols.  
 Sur le graphe Débit Init / P24h, on prendra la limite basse pour des Pluie de Bassin > 5 ou 6 mm/h (intense pour ce BV assez vaste) pendant 3 à 4 heures ou lorsque le bassin est saturé. Se référer alors à l'abaque SWI Init / P24h. La valeur du swi peut éventuellement être réajustée à partir de son dernier calcul quotidien.  
 Si l'épisode est en cours, ajouter la lame d'eau déjà tombée dans le temps de réponse du bassin à la pluie de bassin prévue.

FIGURE 4.16 – Abaque vigilances sur le bassin versant du Gapeau, à Hyères.

### 4.4 Annexe 4 : Bulletin AP-BP du 24 novembre 2014 après-midi



## Région : Sud-Est

Produit le 24 novembre 2014 à 14:40 lég.



Origine : METEO-FRANCE CMIRSE / Aix-en-Provence

Destinataires : SCHAPI, SPC Méditerranée Ouest, SPC Grand Delta, SPC Méditerranée Est

### 1) Hauteurs de précipitations en mm

N°	Zones AP	AP	Observées du 23/11 07h au 24/11 07h		Observées du 24/11 07h au 24/11 13h		Prévues du 24/11 07h au 25/11 07h		Prévues du 25/11 07h au 26/11 07h		Prévues du 26/11 07h au 27/11 07h
			Moy.	(n/nt)	Moy.	(n/nt)	Moy.	Max	Moy.	Max	Moyenne
<b>SPC MEDITERRANEE OUEST</b>											
62107	Vallees du Roussillon	AP	3	(8/8)	3	(8/8)	10/30	50	1/5		1/5
62108	Corbieres	AP	1	(9/9)	2	(9/9)	20/50	80/100	7/15		Tr/3
62102	Aude oceanique		0	(7/7)	0	(7/7)	10/20	30/40	10/20		Tr/3
62109	Orb et Aude aval	AP	1	(5/5)	3	(5/5)	20/50	80/100	20/50	60	Tr/3
62104	Orb amont Montagne Noire	AP	2	(3/3)	4	(3/3)	20/50	50/80	20/50	60	Tr/3
62105	Herault aval - Lez	AP	0	(5/7)	0	(5/7)	10/20	80/100	20/50	50/80	Tr/3
62106	Herault amont	AP	0	(9/10)	0	(9/10)	15/30	50/80	20/50	50/80	3/10
<b>SPC GRAND DELTA</b>											
62019	Cevennes Gardoises		0	(9/9)	0	(9/9)	3/10	15/30	20/50	50/80	10/20
62020	Piemonts Gardois		0	(7/7)	0	(7/7)	1/5	5/10	20/50	50/80	20/40
62018	Cevennes Ardechoises		0	(16/16)	0	(9/16)	1/5	10/15	20/30	50	15/30
62016	Piemonts Ardechois		0	(6/6)	0	(5/6)	1/5	5/10	15/25	30	20/40
62017	Ardeche Nord		0	(11/11)	0	(4/11)	Tr/3		5/10	20	15/30
62015	Vaucluse		0	(18/18)	0	(10/18)	Tr/3		5/10	15	15/30
62014	Drome		0	(18/18)	0	(9/18)	Tr/3		5/10	15	15/30
62011	Haute Durance		0	(7/7)	0	(7/7)	0		Tr/3		10/20
62022	Durance Buech		0	(8/9)	0	(7/9)	Tr/3		1/5		15/30
62012	Durance Verdon		0	(11/12)	0	(11/12)	0		2/5	10	15/30
62013	Basse Durance		0	(8/8)	0	(6/8)	Tr/3		2/5	10	10/20
62021	Delta du Rhone		0	(5/5)	0	(5/5)	Tr/3		15/30	50	15/30
<b>SPC MEDITERRANEE EST</b>											
62203	Est BDR		0	(11/11)	0	(11/11)	Tr/3		2/5	10/20	10/20
62210	Argens		0	(7/7)	0	(7/7)	1/5		10/20	40/60	30/50
62211	Sud Var		0	(10/11)	0	(10/11)	1/5	5/10	20/40	40/60	50/80
62205	Siagne-Paillon		0	(19/19)	0	(19/19)	Tr/3		10/20	30/50	30/50
62206	Var-Roya		0	(12/12)	0	(12/12)	Tr/3	5/10	2/5	10/15	20/40
62207	Corse ouest		0	(13/14)	0	(13/14)	0		Tr/3		1/5
62208	Corse est		0	(7/7)	0	(6/7)	0		Tr/3	5/10	1/5

Pour les données observées, issues des pluviomètres, (n/nt) : n = nombre d'obs présentes ; nt = nombre d'obs possibles

### 2) Période AP

Heure de début d'événement : lundi 24 novembre 2014 à 16h00 (légales)

Heure de fin d'événement : mardi 25 novembre 2014 à 06h00 (légales)

N.B. : La vente, rediffusion ou redistribution des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de Météo-france.

Direction Interrégionale Sud-Est  
 2 boulevard du chateau double 13098 Aix en Provence  
 Courriel : setti@meteo.fr  
 Tel : 0442959000 / Fax : 0442959039



## Région : Sud-Est

Produit le 24 novembre 2014 à 14:40 lég.



### 3 Description :

#### 3.1 Situation actuelle :

Les premières averses localement marquées sont observées sur les départements des Pyrénées-Orientales, de l'Aude et sur l'ouest du département de l'Hérault.

#### 3.2 Evolution prévue :

Les averses de cet épisode pluvio-orageux, vont localement se renforcer et devenir ponctuellement fortes sur l'est des Pyrénées-Orientales, l'est de l'Aude et l'ouest de l'Hérault en fin d'après midi de lundi. Ces averses localement très fortes sont à attendre sur ces régions durant toute la nuit de lundi à mardi. On attend sur ces zones 50/80 mm, et ponctuellement 80/100 mm en quelques heures.

Facteur aggravant : petite houle d'est sur le pourtour du golfe du Lion

Mardi, en matinée les averses de la nuit se décalent sur l'est Languedoc en s'atténuant. Ensuite des passages de petites pluies touchent de nombreuses régions en journée. Un nouvel épisode d'averses localement marquées touche le littoral PACA la nuit suivante.

Mercredi, le littoral varois reste concerné par des pluies localement marquées en matinée tandis que des pluies plus modérées continuent à affecter les Cévennes

### 4 Degré de confiance dans la prévision des quantités :

Assez Bon

### 5 Eventuelles sources d'incertitude :

Assez grande variabilité dans l'activité des pluies orageuses

N.B. : La vente, rediffusion ou redistribution des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de Météo-france.

Direction Interrégionale Sud-Est  
2 boulevard du chateau double 13098 Aix en Provence  
Courriel : [setti@meteo.fr](mailto:setti@meteo.fr)  
Tel : 0442959000 / Fax : 0442959039

# Bibliographie

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O’Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the european hydrological system—systeme hydrologique europeen, “she”, 1 : History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1), 45–59.
- Audard-Vincendon, B. (2010). *Apport des modèles météorologiques de résolution kilométrique pour la prévision des crues rapides méditerranéennes : vers une prévision d’ensemble des débits en région Cévennes-Vivarais*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Ayral, P.-A., Sauvegnargues-Lesage, S., & Bressand, F. (2005). Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair althair. *Ét. Géogr. Phys*, (pp. 75–97).
- Bartholmes, J. & Todini, E. (2005). Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(4), 333–346.
- Beven, K. & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/un modèle à base physique de zone d’appel variable de l’hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43–69.
- Boone, A., Calvet, J.-C., & Noilhan, J. (1999). Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method. *Journal of Applied Meteorology*, 38(11), 1611–1630.
- Bouilloud, L., Chancibault, K., Vincendon, B., Ducrocq, V., Habets, F., Saulnier, G.-M., Anquetin, S., Martin, E., & Noilhan, J. (2010). Coupling the isba land surface model and the topmodel hydrological model for mediterranean flash-flood forecasting : description, calibration, and validation. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 315–333.
- Bouttier, F., Raynaud, L., Nuissier, O., & Ménétrier, B. (2015). Sensitivity of the arome ensemble to initial and surface perturbations during hymex. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Bouttier, F., Vié, B., Nuissier, O., & Raynaud, L. (2012). Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Monthly Weather Review*, 140(11), 3706–3721.
- Buizza, R., Milleer, M., & Palmer, T. (1999). Stochastic representation of model uncertainties in the ecmwf ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(560), 2887–2908.
- Ducrocq, V., Belamari, S., Boudevillain, B., Bousquet, O., Cocquerez, P., Doerenbecher, A., Drobinski, P., Flamant, C., Labatut, L., Lambert, D., et al. (2013). Hymex, les campagnes de mesures : focus sur les événements extrêmes en méditerranée. *La Météorologie*, (80), 37–47.
- Ducrocq, V., Braud, I., Davolio, S., Ferretti, R., Flamant, C., Jansa, A., Kalthoff, N., Richard, E., Taupier-Letage, I., Ayral, P.-A., et al. (2014). Hymex-sop1 : The field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern mediterranean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(7), 1083–1100.
- Ducrocq, V., Nuissier, O., Ricard, D., Lebeauupin, C., & Thouvenin, T. (2008). A numerical study of three catastrophic precipitating events over southern france. ii : Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 134(630), 131–145.

- Edouard, S., Vincendon, B., & Ducrocq, V. (2016). Probabilistic flash-flood modelling :taking into account hydrodynamic parameters and initial soil moisture uncertainties. *submitted to Journal of Hydrology*.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.-L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., et al. (2008). The safran-isba-modcou hydrometeorological model applied over france. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(D6).
- Hashino, T., Bradley, A., & Schwartz, S. (2006). Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions*, 3(2), 561–594.
- Liu, Y., Weerts, A., Clark, M., Franssen, H. H., Kumar, S., Moradkhani, H., Seo, D., Schwanenberg, D., Smith, P., Van Dijk, A., et al. (2012). Toward advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting and water resources management : current status, challenges, and emerging opportunities. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 16, 3863–3887.
- Llasat, M., Llasat-Botija, M., Prat, M., Porcú, F., Price, C., Mugnai, A., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Katsanos, D., Michaelides, S., et al. (2010). High-impact floods and flash floods in mediterranean countries : the flash preliminary database. *Advances in Geosciences*, 23, 47–55.
- Mahfouf, J. & Noilhan, J. (1996). Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the force-restore method. *Journal of Applied Meteorology*, 35(6), 987–992.
- Marchand, L. (2014). Evaluation de l’apport des lames d’eau rythmme dans la calibration des modèles hydrologiques sur le territoire du service de prévision des crues méditerranée est. *Rapport, stage IENM 3*.
- Michel, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec modèle conceptuel à un seul paramètre? *La Houille Blanche*, (1), 39–44.
- Noilhan, J. & Planton, S. (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117(3), 536–549.
- Nuissier, O., Joly, B., Vié, B., & Ducrocq, V. (2012). Uncertainty of lateral boundary conditions in a convection-permitting ensemble : a strategy of selection for mediterranean heavy precipitation events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 12, 2993–3011.
- Obled, C. & Zin, I. (2004). Topmodel : principes de fonctionnement et application. *La Houille Blanche*, (1), 65–77.
- Olsson, J. & Lindström, G. (2008). Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in sweden. *Journal of Hydrology*, 350(1), 14–24.
- Pansu, J. (2016). Installation et calibration de plathynes. *Rapport, Météo-France*.
- Ricard, D., Ducrocq, V., & Auger, L. (2012). A climatology of the mesoscale environment associated with heavily precipitating events over a northwestern mediterranean area. *Journal of applied meteorology and climatology*, 51(3), 468–488.
- 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. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 11(9), 2567–2582.
- Schaake, J., Thielen, J., Hartman, R., & Buizza, R. (2008). Aims, challenges and progress of the hydrological ensemble prediction experiment (hepex) following the third hepex workshop held in stresa 27 to 29 june 2007. *Atmospheric Science Letters*, 9(2), 29–35.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., & Masson, V. (2011). The arome-france convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976–991.

- Siccardi, F., Boni, G., Ferraris, L., & Rudari, R. (2005). A hydrometeorological approach for probabilistic flood forecast. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres (1984–2012)*, (pp. 110).
- Tabary, P. (2007). The new french operational radar rainfall product. part i : Methodology. *Weather and forecasting*, 22(3), 393–408.
- Tabary, P., Desplats, J., Do Khac, K., Eideliman, F., Gueguen, C., & Heinrich, J. (2007). The new french operational radar rainfall product. part ii : Validation. *Weather and forecasting*, 22(3), 409–427.
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., & Roo, A. d. (2009). The european flood alert system—part 1 : concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 125–140.
- Vié, B., Nuissier, O., & Ducrocq, V. (2011). Cloud-resolving ensemble simulations of mediterranean heavy precipitating events : uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 139(2), 403–423.
- Vincendon, B., Ducrocq, V., Nuissier, O., & Vié, B. (2011). Perturbation of convection-permitting nwp forecasts for flash-flood ensemble forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1529–1544.
- Vincendon, B., Ducrocq, V., Saulnier, G.-M., Bouilloud, L., Chancibault, K., Habets, F., & Noilhan, J. (2010). Benefit of coupling the isba land surface model with a topmodel hydrological model version dedicated to mediterranean flash-floods. *Journal of Hydrology*, 394(1), 256–266.
- Vincendon, B., Edouard, S., Dewaele, H., Ducrocq, V., Lespinas, F., G, D., & Anquetin, S. (2016). Modeling flash floods in southern france for road management purposes. *Journal of Hydrology*.
- Weerts, A., Winsemius, H., & Verkade, J. (2011). Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression : examples from the national flood forecasting system (england and wales). *Hydrology and Earth System Sciences*, 15,(1).
- Zalachori, I., Ramos, M., Garçon, R., Mathevet, T., & Gailhard, J. (2012). Statistical processing of forecasts for hydrological ensemble prediction : a comparative study of different bias correction strategies. *Advances in Science & Research*, 8, p–135.
- Zappa, M., Beven, K. J., Bruen, M., Cofino, A. S., Kok, K., Martin, E., Nurmi, P., Orfila, B., Roulin, E., Schröter, K., et al. (2010). Propagation of uncertainty from observing systems and nwp into hydrological models : Cost-731 working group 2. *Atmospheric Science Letters*, 11(2), 83–91.