

## METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DE FORÇAGES METEO PROBABILISTES POUR LA PREVISION HYDROLOGIQUE

*Development of probabilistic forecasting meteorological inputs for flow forecasting*

**Auteurs :** RINALDI Fabien<sup>1\*</sup>, LE LAY Matthieu<sup>1\*</sup>, CORON Laurent<sup>2</sup>

*\* auteur correspondant*

<sup>1</sup>EDF-DTG, 134 rue de l'étang, 38950 SAINT-MARTIN LE VINOUX, France

<sup>2</sup>EDF-DTG, 4 rue Claude Marie Perroud, 31096 TOULOUSE, France

**Résumé :** Les évolutions récentes des prévisions météorologiques numériques ont amené des avancées importantes en termes de mise à disposition de scénarios météorologiques pour les simulations hydrologiques. Ces progrès concernent à la fois la résolution numérique des modèles météorologiques ainsi que le nombre de scénarios disponibles. Les prévisionnistes hydro-météorologistes d'EDF ont ainsi à disposition les informations de plusieurs modèles météorologiques déterministes (AROME-HRES, ARPEGE-HRES, IFS-HRES) et probabilistes (AROME-EPS, PEARP-EPS, IFS-EPS, IFS-EPS<sub>extended</sub>), soit au total 154 scénarios possibles. Une expertise météorologique quotidienne est réalisée permettant, en fonction du type de situation météorologique, de choisir entre les sources de prévisions disponibles. À titre d'exemple, le prévisionniste aura tendance à choisir des scénarios AROME-HRES et PEAROME-HRES en cas de détection de situation convective, mais pourra également être amené à arbitrer pour des échéances plus lointaines entre PEARP-EPS et IFS-EPS. Cet article présente la méthodologie et les outils pour valoriser l'expertise météorologique en fonction des échéances de prévisions et des sources de prévisions disponibles dans les chaînes de prévisions hydrométéorologiques en cours de développement à EDF-DTG. La méthodologie aborde : (i) la création de jeux de prévisions homogènes (prévisions sans couture) ; (ii) la pondération des sources de prévisions ; (iii) le choix des sources de prévisions en fonction des échéances de prévisibilité.

**Mots-clefs :** prévision, opérationnel, météorologie, hydrologie, développement, probabiliste

**Abstract :** This paper presents the development of a probabilistic method for meteorological inputs for flow forecasting. After discussing the context and motivations, the paper details the methodology, the tools available for the forecasters and the evaluation of this approach.

## **1. CONTEXTE OPERATIONNEL DES PREVISIONS HYDROLOGIQUES A EDF HYDRO DTG**

Depuis les années 80, EDF dispose de centres opérationnels dans lesquels sont réalisées toutes les prévisions hydrométéorologiques pour l'entreprise. Ces prévisions ont pour objectifs d'aider à la sûreté, notamment en crue, et à la gestion de la ressource en eau pour la production hydroélectrique et la gestion des étiages. Dès leur création, ces centres intègrent un service temps réel de surveillance, d'alerte et d'accompagnement à destination de l'exploitant pour l'aider à anticiper l'évolution des débits (service 7j/7, 24h/24). Ce service facilite la mobilisation d'équipes en amont des épisodes et la mise en œuvre des consignes de crues pendant ceux-ci (Puygrenier et al., 2023). En 2008, l'organisation de ces centres évolue pour mieux répondre aux besoins d'optimisation quotidienne des programmes de production d'hydroélectricité. (Moulin et al., 2018). À ce jour, les centres de prévision modélisent 400 bassins versants et produisent environ 17 000 prévisions probabilistes journalières par an pour l'optimisation et 1 800 prévisions déterministes horaires par an pour la gestion de crue. (Coron et al., 2023).

Pour ce faire les prévisionnistes hydrométéorologues réalisent en premier lieu une expertise de la situation météorologique et transposent leur analyse, pour chaque bassin versant et de manière probabiliste, aux variables d'entrées précipitations et températures d'air du modèle hydrologique MORDOR (Garçon R., 1996 ; Garavaglia et al., 2017). Rapidement et face à l'accroissement des besoins de prévisions, construire des forçages météo probabilistes cohérents spatialement et temporellement a constitué un enjeu important. Devant le nombre de sources et le type de données disponibles (déterministes, probabilistes) et les échéances météorologiques adressées (jusqu'à 28 jours) la tâche est néanmoins apparue longtemps complexe et difficile.

Cet article se propose de détailler les avancées dans ce domaine, la méthodologie utilisée et ses performances sur un ensemble de prévisions. Il abordera dans un premier temps les gestes d'analyses et d'expertise réalisés par les prévisionnistes hydrométéorologiques à EDF, puis la méthodologie choisie pour construire des forçages probabilistes météorologiques permettant une meilleure valorisation de cette expertise. Enfin, la dernière partie illustre une première évaluation de la méthodologie appliquée.

## **2. EXPERTISE METEOROLOGIQUE POUR LA REALISATION DE PREVISIONS HYDROLOGIQUES A EDF-DTG**

L'expertise météorologique est une étape incontournable de la prévision hydrométéorologique à EDF, à la fois du fait de la complexité (montagne, etc.) et de la taille des bassins versants (de qqs km<sup>2</sup>, à plusieurs milliers) sur lesquels les prévisionnistes réalisent des prévisions. EDF s'appuie ainsi sur l'expertise et les outils développés à Météo France (utilisation des plateformes Synergie puis Synopsis, montée en compétence des prévisionnistes via différentes formations dispensées par Météo-France).

EDF s'est aussi doté des prévisions brutes numériques issues des principaux modèles de prévision numérique du temps (*tableau 1*), à la fois déterministe (AROME-HRES, ARPEGE-HRES, IFS-HRES) et probabiliste (IFS-EPS, ARPEGE-EPS, AROME-EPS). Ces prévisions arrivent de manière continue et sont injectées dans des chaînes de prévisions hydrométéorologiques automatiques pour aider les prévisionnistes dans l'analyse et le suivi d'évènements. De plus EDF dispose d'un historique de précipitations et températures important (CLIM).

Nom modèle	type	membres	résolution	Nbre runs	Portée (heures)
<i>AROME-HRES</i>	Non-hydrostatique	1	0.01°	5 / jours (00h,03h,06h,12h,18h)	51
<i>ARPEGE-HRES</i>	hydrostatique	1	0.1°	4/ jours (00h,06h,12h,18h)	102
<i>IFS-HRES</i>	hydrostatique	1	0.125°	2/ jours (00h,12h)	240
<i>AROME-EPS</i>	Non-hydrostatique	16	0.025°	2/ jours (03h et 09h)	45 / 51
<i>ARPEGE-EPS</i>	hydrostatique	35	0.1°	2/ jours (00h et 06h)	49 / 91
<i>IFS-EPS</i>	hydrostatique	50	0.25°	2/ jours (00h,12h)	360
<i>IFS-EPS extended</i>	hydrostatique	50	0.5°	2 par semaine (lundi, jeudi)	745
<i>CLIM</i>	historique	50	bassin versant	-	-

Tableau 1 : Caractéristiques des modèles météorologiques utilisés à EDF en entrées des simulation hydrologiques

Face à la multiplication des sources de prévisions météorologiques, et au nombre de bassin à traiter pour répondre aux enjeux, la place de l'expertise humaine a été réinterrogée, pour finalement aboutir à une sélection et une pondération des différents scénarios disponibles, en fonction de la situation rencontrée. L'expertise ainsi réalisée s'appuie à la fois sur le comportement des différents modèles sur les premières échéances de prévision et sur la typologie des situations météorologiques prévues.

Cet article n'a pas pour objectif de dresser un état de l'art de l'usage des prévisions météorologiques pour l'hydrologie. Le lecteur intéressé pourra ainsi se référer par exemple à Hemri et al. (2015, 2018) pour des exemples et une revue assez exhaustive des techniques de post-traitements appliquées à la prévision hydrométéorologique. On note par ailleurs que le sujet de la place de l'expertise humaine dans la prévision, qui nous occupe ici, reste relativement orphelin dans la littérature.

## 2.1. Analyse du calage du modèle par rapport aux observations

L'analyse du calage du modèle consiste à comparer les premières sorties du modèle par rapport à l'évènement en cours, sur la base de plusieurs variables d'intérêt : vent, position des centres d'actions météorologiques, position des fronts, forme des précipitations, systèmes météorologiques de méso-échelle en place, réflectivités simulées, températures de brillance simulées, etc. En cas de mauvaise simulation des phénomènes en place, le prévisionniste peut disqualifier telle ou telle source de prévision. Ces choix se font surtout lorsque des systèmes sont en place (passage pluvieux, tempête) puisque nécessitant des observations. On parle alors de calage du/des modèle(s) de prévision. Cette analyse permet aussi de choisir et d'arbitrer entre les différents runs du modèle météorologique.

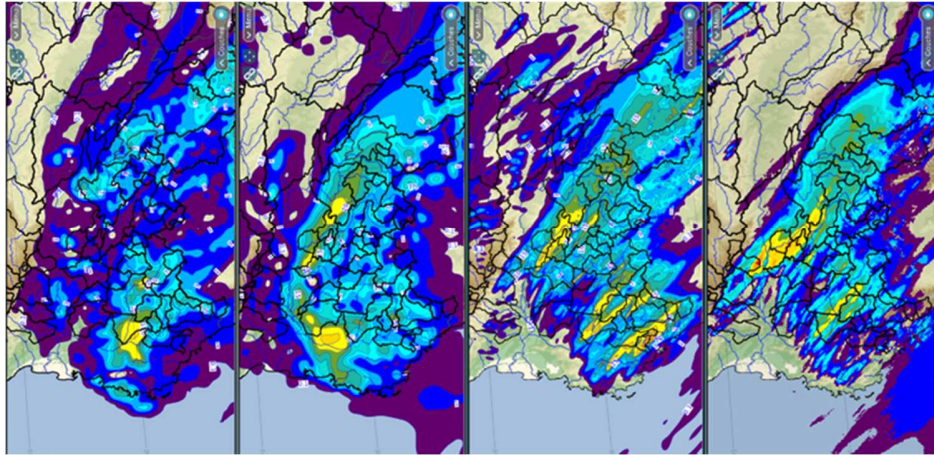


Figure 1 : Exemple à la prise de poste à 6h le 18/09/2023, on se place dans la « peau » d'un prévisionniste. Les images représentent les cumuls de précipitations sur les 3 dernières heures simulées par les différents modèles (de gauche à droite : IFS-HRES (run de 12h la veille), ARPEGE-HRES (run de 00h), AROME-HRES (run de 00h)) et les observées (Lame d'eau ANTILOPE, tout à droite). On peut voir que les modèles AROME-HRES ARPEGE-HRES sont plus en phase avec les précipitations observées.

## 2.2. Choix du type de modélisation en fonction du type de situation

Les modèles météorologiques ont leurs propres caractéristiques : résolution spatiale, modèle hydrostatique ou non hydrostatique, paramétrisations, observations assimilées, etc. Un modèle non hydrostatique comme AROME sera ainsi plus à même de résoudre les phénomènes de type de convection profonde et sera souvent privilégié dans ce type de situation. Au contraire, des modèles comme ARPEGE et IFS sont supposés pertinents dans des situations d'ampleur synoptique comme le passage de perturbations atlantiques.

## 2.3 Échéance de prévisibilité

L'atmosphère étant un système chaotique, de petites erreurs sur les conditions initiales de prévision peuvent se propager rapidement et affecter la prévisibilité. De plus la prévisibilité est aussi limitée par les nécessaires approximations des modèles numériques (Buizza 2000). Il existe donc une échéance de prévisibilité inhérente à l'état initial de l'atmosphère et aux sources de prévisions utilisées. Dans les gestes d'expertise météorologique, le prévisionniste, après analyse de la situation synoptique, peut choisir de « disqualifier » les simulations numériques et d'utiliser plutôt une information historique de type climatologie (CLIM) à partir d'une certaine échéance, le plus souvent au-delà de 10-15 jours. Pour ce faire il analyse les positions des centres d'actions de grande échelle et regarde à partir de quelle échéance les scénarios sont trop divergents et n'apportent plus d'information (Figure 2).

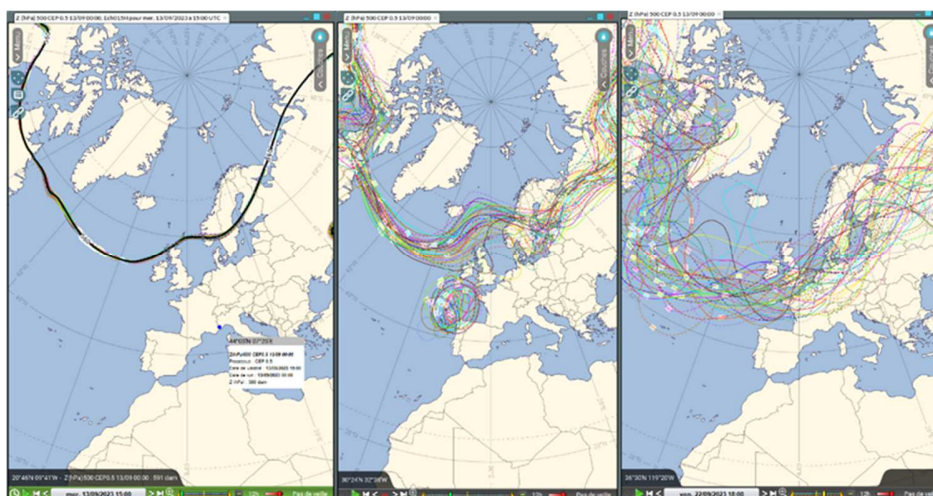


Figure 2. Exemple de position des « spaghettis » (différents membres des EPS) de la Z500 Hpa permettant de positionner les centres d'action d'altitude en fonction des échéances : run du mercredi 13/09/2023 00h00 // image 1 : position à J+0 (jour même) // image 2 : position à J+4 (dimanche 17/09) // image 3 : position à J+9 : (vendredi 22/09/2023). A partir de J +9 la source de prévision n'apporte plus d'information

### 3. METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DE FORÇAGES METEOROLOGIQUES POUR LA PREVISION PROBABILISTE

Une méthodologie et un outil spécifique ont été élaborés pour retranscrire et propager ces choix d'expertise amont météorologique dans la chaîne de prévision hydrométéorologique. La méthodologie s'articule en trois temps : (i) constitution de prévisions sans couture à 28 jours ; (ii) choix et pondération des sources de prévisions, pour différents horizons de temps ; (iii) reconstruction de l'ensemble de prévision final à 28 jours. Un outil, nommé TEAHUPOO pour *Transposition Expertise Amont HUMaine des Prévisions météOrOLOGIques*, permet de déployer cette méthodologie pour construire des scénarios de prévisions expertisés à l'échelle régionale et à échéance de 28 jours.

Cet article s'intéresse à l'apport de différentes sources de prévisions et la valorisation de celles-ci, mais ne traite pas des débiaisages éventuels des prévisions météorologiques, qui constituent une étape préalable à l'expertise météorologique.

#### 3.1. Construction de scénarios de prévisions météorologiques sans coutures à 28 jours

EDF dispose en opérationnel des données mentionnées dans le Tableau 1, soit, pour chaque prévision, entre 154 scénarios (pour les premières échéances) et 50 scénarios (pour les échéances les plus lointaines). La première étape consiste à construire des scénarios sans couture sur la portée de prévision, soit 28 jours (672h). Pour prolonger l'ensemble des scénarios météorologiques jusqu'à 28 jours, une méthode de raboutage par rang (Kuhn, H.W. 1955) est utilisée, qui permet de garantir une cohérence temporelle lors du prolongement des prévisions et considérée comme plus performante qu'une méthode par tirage aléatoire (Aleksovka et al, 2021). Cet ordonnancement est réalisé, pour chaque type de modèle, sur la variable précipitations, agrégée sur l'ensemble des bassins d'intérêt. Ainsi, par exemple, les scénarios les plus humides des prévisions court terme sont appariés aux prévisions long-terme les plus humides sur la période commune. Par défaut, les sources de prévisions sont associées tel que décrit dans le tableau 2.



Pour les modèles déterministes (IFS-HRES, ARPEGE-HRES et AROME-HRES), le prolongement des échéances est effectué par les modèles déterministes de plus longue profondeur temporelle puis par les moyennes d'ensemble des prévisions IFS-EPS et IFS-EPSExtended, tel que décrit dans le tableau 3. Le choix de conserver des modèles déterministes est justifié par une plus grande fréquence de mise à disposition dans le système EDF.

Modèle initial	Modèle final	membres	Portée (heures)	Nom modèle étendu
<i>IFS-EPS</i>	<i>IFS-EPS + IFS-EPSExtended</i>	50	672	<i>IFS-EPS(*)</i>
<i>ARPEGE-EPS</i>	<i>ARPEGE-EPS + IFS-EPS + IFS-EPSExtended</i>	35	672	<i>ARPEGE-EPS(*)</i>
<i>AROME-EPS</i>	<i>AROME-EPS + ARPEGE-EPS + IFS-EPS + IFS-EPSExtended</i>	16	672	<i>AROME-EPS(*)</i>
<i>CLIM</i>	<i>CLIM</i>	50	672	<i>CLIM</i>

Tableau 2 : Construction des modèles météorologiques probabilistes à 28 jours

Par la suite et par soucis de simplicité de notation, on notera ces nouveaux ensembles étendus à 28 jours avec (\*), cf. colonne nom modèle étendu

Modèle initial	Modèle final	membres	Portée (heures)	Nom modèle étendu
<i>IFS-HRES</i>	<i>IFS- HRES + moyenne (IFS-EPS*)</i>	1	672	<i>IFS- HRES(*)</i>
<i>ARPEGE- HRES</i>	<i>ARPEGE- HRES + IFS-HRES + moyenne (IFS-EPS*)</i>	1	672	<i>ARPEGE- HRES(*)</i>
<i>AROME- HRES</i>	<i>AROME- HRES + ARPEGE-HRES + IFS- HRES + moyenne (IFS-EPS*)</i>	1	672	<i>AROME- HRES(*)</i>

Tableau 3 : Construction des modèles météorologiques déterministes à 28 jours

### 3.2. Choix et pondération des sources de prévisions

La deuxième étape consiste à échantillonner parmi l'ensemble initial (154 membres *IFS-EPS(\*)*, *ARPEGE-EPS(\*)*, *AROME-EPS(\*)*, *IFS-HRES(\*)*, *ARPEGE-HRES(\*)*, *AROME-HRES(\*)*, *CLIM*) pour produire un ensemble final de dimension réduite. La taille de cet ensemble a été pour l'instant limitée à 50 membres, pour des questions d'efficacité de coût de calcul dans les chaînes de prévision, l'acquisition d'observations, de prévisions, et de simulation hydrologique. De plus, de nombreux utilisateurs internes EDF utilisent les prévisions probabilistes numériquement dans leur système avec une taille de 50 membres.

Compte-tenu des modèles de prévision météorologiques utilisés et de nos enjeux de prévisions, il a été choisi de définir 3 horizons de temps, avec pour chacun une combinatoire de sources de prévision spécifique : (i) un horizon court-terme, de J à J+1 ; (ii) un horizon moyen-terme, de J+2 à J+6 ; (iii) un horizon long-terme, de J+6 à J+28 (Tableau 4). Ces horizons sont un compromis entre la disponibilité de chaque source de prévision et les caractéristiques de celles-ci.

Horizon	Échéances (en Jours)	Nombre de membres initiaux	Nombre de membres finaux	Sources de prévision disponibles
Horizon Court Terme (CT)	J à J+1	104 membres	50 membres	<i>IFS-EPS</i> (*), <i>ARPEGE-EPS</i> (*), <i>AROME-EPS</i> (*), <i>IFS-HRES</i> (*), <i>ARPEGE-HRES</i> (*), <i>AROME-HRES</i> (*)
Horizon Moyen Terme (MT)	J+2 à J+6	87 membres	50 membres	<i>IFS-EPS</i> (*), <i>ARPEGE-EPS</i> (*), <i>IFS-HRES</i> (*), <i>ARPEGE-HRES</i> (*)
Horizon Long Terme (LT)	J+6 à J+28	100 membres	50 membres	<i>IFS-EPS</i> (*), <i>CLIM</i>

Tableau 4 : Composition des sources de prévision par horizon de temps : court terme, moyen terme, long terme

Pour chaque horizon, une pondération est effectuée en choisissant le nombre de membres parmi les sources initiales qui composeront l'ensemble final (50 membres). Des poids sont attribués par défaut (suite à une calibration détaillée au paragraphe 4.2), mais sont modifiables par les prévisionnistes en fonction de leur analyse météorologique. Le choix des membres de chaque source de prévision initiale qui appartiendront à la distribution finale se fait par tirage aléatoire sans remise (voir paragraphe 4.).

### 3.3 Reconstruction de sources de prévisions météorologiques à 28 jours

La dernière étape consiste à réassembler les ensembles construits sur chaque horizon de temps. On utilise la même méthodologie que lors de la construction du super ensemble initial, à savoir une approche par rang sur les précipitations à l'échelle de l'ensemble des bassins. À noter que cette méthode n'est appliquée que sur les membres non communs aux différents horizons de temps, pour préserver au maximum la continuité temporelle des membres météorologiques entre eux.

### 3.4 Mise en œuvre dans un outil : valorisation de l'expertise humaine

La méthodologie précédemment décrite a été mise en œuvre dans un outil qui permet au prévisionniste de modifier les pondérations par défaut (nombre de membres de chaque distribution source) pour chaque horizon de temps (court terme, moyen terme et long terme). Dans l'exemple ci-dessous (Figure 3), le prévisionniste a choisi, pour l'horizon court-terme, 16 membres AROME-EPS, 32 membres ARPEGE-EPS (noté PEARP) sur 35, 0 membres IFS-EPS (noté EPS) sur 50, 1 membre ARPEGE-HRES (noté ARPEGE) et 0 membre IFS-HRES (noté CEP).

TEAHUPOO : ☰

Court terme : J / J+1    Moyen terme : J+2 / J+6    Long terme : S2 / S3 / S4    validation previsions

PEARO / AROME	PEARP / ARP	EPS / CEP	Calculs
Nbre membres PEARO (16)	Nbre membres PEARP (35)	Nbre membres EPS (50)	Nbre de membres choisis : 50/50 Calcul
16	32	0	
Nbre membres AROME (1)	Nbre membres ARPEGE (1)	Nbre membres CEP (1)	
1	1	0	

Figure 3. Exemple de choix de pondération de source de prévision pour l'horizon court terme. Dans cet exemple, le prévisionniste a choisi 16 membres AROME-EPS sur 16 possibles, 32 membres ARPEGE-EPS (noté PEARP) sur 35, 0 membres IFS-EPS (noté EPS) sur 50, 1 membre ARPEGE-HRES (noté ARPEGE) et 0 membre IFS-HRES (noté CEP).

La restitution au prévisionniste se fait à la fois sous forme cartographique, pour apprécier l'impact de la pondération choisie sur la France, et en comparant les distributions de l'ensemble expertisé et des ensembles d'origine (boîte à moustache et distribution cumulée, figure 4).

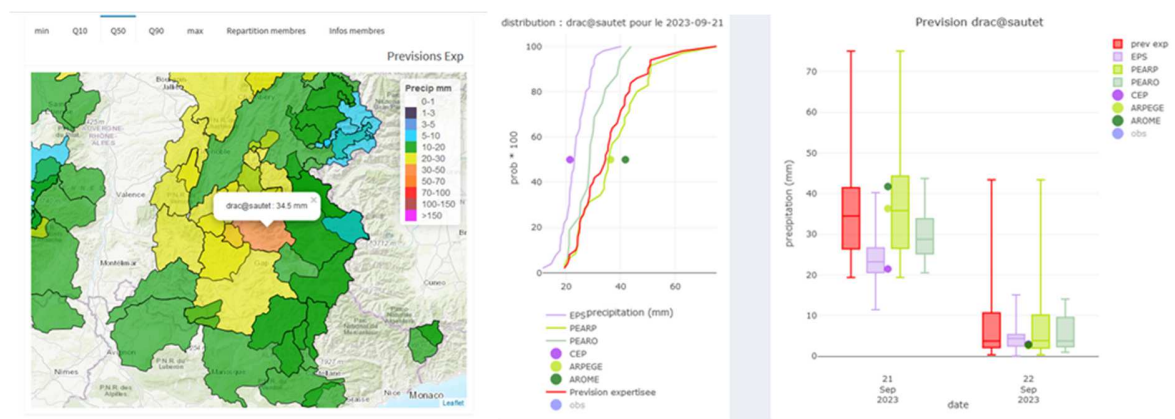


Figure 4. Exemple de choix de restitution du choix de la pondération au prévisionniste, journée du 21-09-2023. A gauche, carte des quantiles 50% des précipitations journalières (vision spatiale), à droite, visualisation sur un bassin versant (Drac au Sautet) sous forme de boîte à moustache et de distribution cumulée. On visualise la distribution expertisée (rouge) dépendante des pondérations choisies sur l'horizon sélectionné (court terme ici). La pondération est celle de la figure 3.

## 4. EVALUATION DES ENSEMBLES DE PREVISIONS PRODUITS

### 4.1 Protocole d'évaluation

La méthodologie proposée a été qualifiée sur un jeu de 962 prévisions, entre le 01/01/2021 et le 20/08/2023, pour des échéances de 0 à 288h (12 jours) et sur un ensemble de 236 bassins versants. Les pondérations utilisées sont celles par défaut évoquées au paragraphe 3.2. L'évaluation porte sur les précipitations prévues par rapport aux observations. Les observations de précipitations utilisées sont les pluies dites « spatiales » calculées sur chacun des bassins versants. Ces précipitations sont des issues d'une combinaison linéaire optimisée des pluviomètres disponibles en temps réel. Les comparaisons sont effectuées sur les cumuls journaliers (06hTU-06hTU). Les prévisions sont réalisées en se plaçant chaque jour à 06hTU avec les réseaux suivants disponibles, l'heure choisie étant représentative de la prise de poste des prévisionnistes à EDF.

Nom modèle	Réseau h (en TU)
AROME-HRES	03h J
ARPEGE-HRES	00h J
IFS-HRES	12h J-1
AROME-EPS	09h J-1
ARPEGE-EPS	00h J
IFS-EPS	12h J-1

Tableau 5 : Disponibilité des réseaux de modèles lors de l'évaluation



Les deux critères utilisés sont le CRPS (Hersbach, 2000) et le R2, le premier permettant d'apprécier la performance probabiliste des prévisions et le deuxième la performance de la moyenne de l'ensemble.

#### 4.2 Calibration des pondérations des sources de prévisions

La calibration du système de prévision a été réalisée en comparant plusieurs pondérations, sur la période court terme (J et J+1). Le tableau 6 ci-dessous représente les combinaisons testées :

Nom	IFS-EPS	ARPEGE-EPS	AROME-EPS	IFS-HRES	ARPEGE-HRES	AROME-HRES
Exp1	15	16	16	1	1	1
Exp2	0	31	16	1	1	1
Exp3	12	35	0	1	1	1
Exp4	31	0	16	1	1	1

Tableau 6 : Combinaisons testées pour l'évaluation de la pondération

La figure 5 montre que les meilleurs scores sont obtenus par l'expérience *Exp1*, qui pondère de façon équilibrée les différents ensembles. Au contraire, les expériences surpondérant les membres IFS-EPS (au détriment de ARPEGE-EPS, *Exp4*, ou d'AROME-EPS, *Exp3*) sont les moins performantes. C'est donc la pondération *Exp1* qui est choisie par défaut dans le système, et évaluée dans le paragraphe suivant à échéance plus longue (J à J+6).

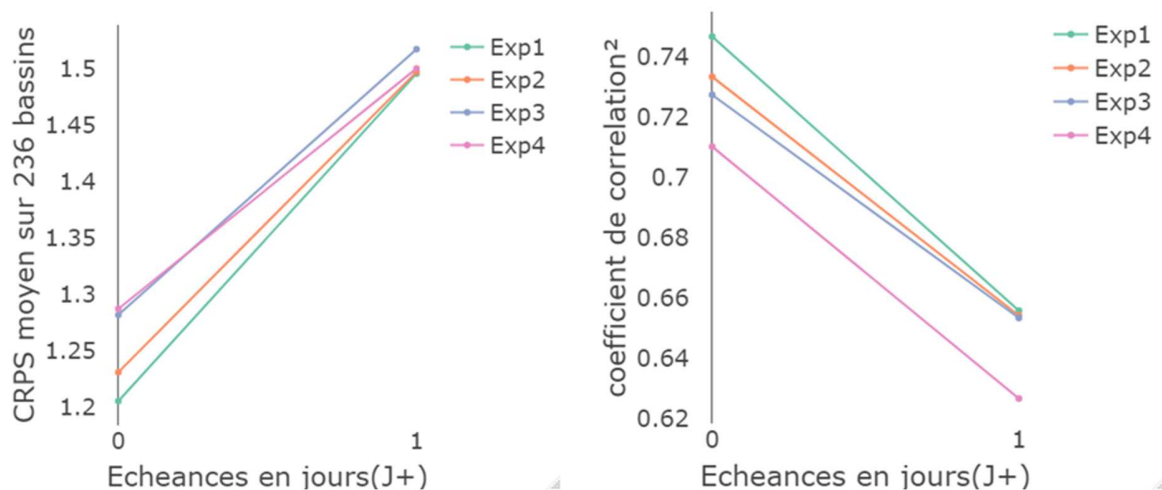


Figure 5. CRPS moyen sur 236 bassins à gauche et à droite coefficient de corrélation de la moyenne des ensembles du 01/01/2021 au 20/08/2023 des différentes combinaisons de pondération testées.

#### 4.3 Évaluation des ensembles produits

On compare (Figure 6) les performances des ensembles de prévision initiaux (AROME-EPS, ARPEGE-EPS, IFS-EPS) et finaux (ici noté Teahupoo).

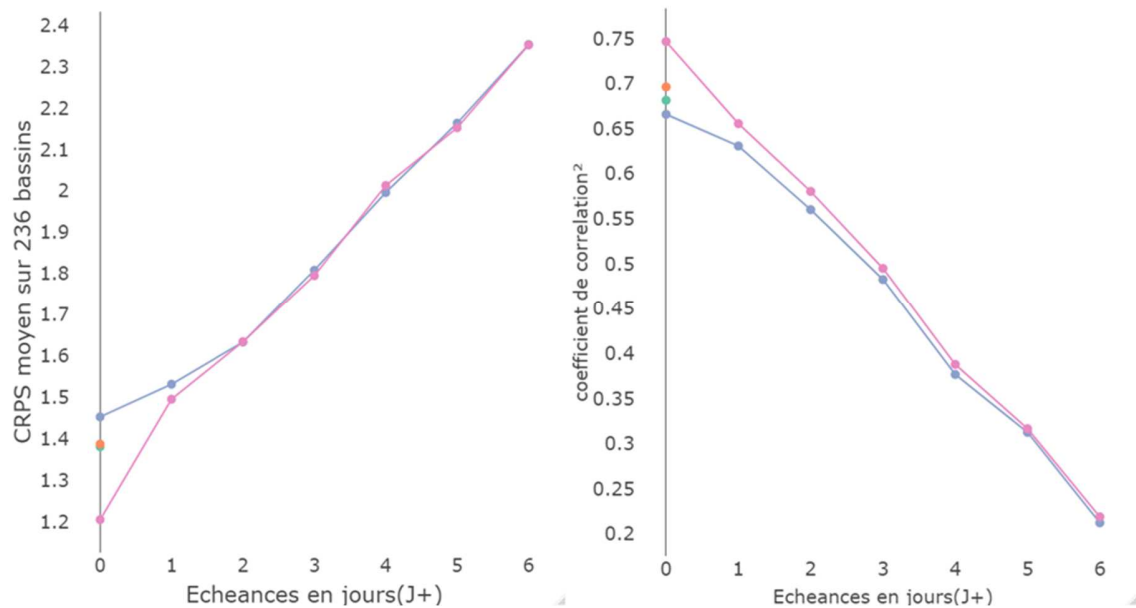


Figure 6. CRPS moyen sur 236 bassins à gauche et à droite coefficient de corrélation de la moyenne des ensembles du 01/01/2021 au 20/08/2023. En vert l'ensemble AROME-EPS, en rouge l'ensemble ARPEGE-EPS, en bleu l'ensemble IFS-EPS et en violet l'ensemble Teahupo (méthode décrite)

Les deux scores sont significativement améliorés sur les premières échéances (J à J+1) par rapport aux sources de prévisions probabilistes individuelles (AROME-EPS, ARPEGE-EPS, IFS-EPS), ce qui confirme la pertinence de la combinaison choisie. Pour les échéances suivantes, les gains tendent progressivement vers 0, puisque l'on revient petit à petit sur le modèle IFS-EPS. À noter que les gains de performances d'AROME-EPS sont plus faibles que ARPEGE-EPS, ceci est dû à la disponibilité des réseaux utilisés en opérationnel à EDF, le modèle AROME-EPS étant celui de la veille lors de l'évaluation.

## CONCLUSIONS

Dans les chaînes de prévisions hydrométéorologiques actuelles, le choix et la combinaison des nombreux modèles de prévision météorologique disponibles sont des gestes d'expertise naturels, que nous avons formalisés dans une méthodologie en cours d'expérimentation à EDF. L'approche proposée permet de construire des ensembles de forçages météorologiques continus jusqu'à 28 jours d'échéance, respectant la cohérence spatiale et temporelle portée par les modèles. Elle permet également de valoriser l'expertise météorologique des prévisionnistes, et montre des performances encourageantes.

En termes de perspectives, la méthode proposée peut s'enrichir d'autres sources de prévisions (autres modèles météorologiques, runs météorologiques plus anciens, analogues, etc.) et aussi être étendue à des échéances plus lointaines, en utilisant par exemple les modèles de prévision saisonnière. Une autre piste d'amélioration réside dans la sélection des membres lors de la construction des ensembles à 28 jours (paragraphe 3.1), la sélection des membres initiaux / finaux pouvant se faire par d'autres méthodes (déformation temporelle dynamique). Lors de cette construction, l'approche retenue dans la méthode présentée est univariée (précipitations), mais une extension à une approche multivariée (précipitations, températures) est envisageable.

## REFERENCES

- Aleksovska, I., Raynaud, L., Faivre, R., Brun, F., & Raynal, M. (2021). *Design and evaluation of calibrated and seamless ensemble weather forecasts for crop protection applications*. Weather and Forecasting, 36(4), 1329-1342.
- Buizza, R. (2001). *Chaos and weather prediction-A review of recent advances in Numerical Weather Prediction: Ensemble forecasting and adaptive observation targeting*. Il nuovo cimento C, 24(2), 273-302.
- Coron L., \*, Rinaldi F., Moulin L., Puygrenier D. (2023). *Méthodologie de construction de forçages météo probabilistes pour la prévision hydrologique* ; SHF 2023 Crue Inondation.
- Garavaglia F., Le Lay M., Gottardi F., Garçon R. (2017). *Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: from a lumped to a semi-distributed approach* ; Hydrology and Earth System Sciences 2017/8/1 3937-3952.
- Garçon R., (1996). *Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR* ; La Houille Blanche 5, 71–76.
- Hersbach, H. (2000). *Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems*. Weather and Forecasting, 15(5), 559-570.
- Hemri, S., Lisniak, D., & Klein, B. (2015). *Multivariate postprocessing techniques for probabilistic hydrological forecasting*. Water Resources Research, 51(9), 7436-7451.
- Hemri, S. (2018). *Applications of postprocessing for hydrological forecasts*. Statistical postprocessing of ensemble forecasts, 219-240.
- Kuhn, H.W. (1955). *The Hungarian method for the assignment problem* ; Naval Research Logistics Quarterly ; Wiley Online Library.
- Moulin L., Abonnel A., Puygrenier D., Valéry A. & Garçon R., (2018). *Prévision hydrométéorologique opérationnelle à EDF-DTG, Progrès récents et états des lieux* ; Communication orale SHF 2018 Crue Inondation.
- Puygrenier D., Coron L., Moulin L., Magry E., Courbier A., (2023). *Prévisions des crues à EDF : vers des outils permettant une meilleure prise de décision* ; Poster SHF 2023 Crue Inondation.