

VERS UNE ANTICIPATION A 1-6H DES RISQUES DE PLUIES INTENSES QUASI STATIONNAIRES

Prediction of quasi-stationary intense precipitation risks at 0-6h lead times

Auteurs : BOUTTIER François^{1*}, MANDEMENT Marc¹

** auteur correspondant*

¹CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

francois.bouttier@meteo.fr

Résumé : La prévision numérique des précipitations intenses souffre encore fréquemment d'incertitudes, même à des échéances inférieures à 6 heures. Nous proposons ici une méthode d'amélioration de ces prévisions, fondée sur une adaptation originale de la technique de sensibilité ensembliste appliquée à un système de prévision météorologique opérationnel (PE AROME de Météo-France). Cela inclut un diagnostic automatique des sources d'erreurs lors d'épisodes convectifs méditerranéens quasi-stationnaires. Sur des situations catastrophiques passées, nous mettons en évidence le rôle de différents paramètres atmosphériques peu prévisibles, en amont et quelques heures avant le déclenchement des pluies les plus intenses. Cela corrobore des travaux précédents : les paramètres incriminés sont notamment le vent, la température et l'humidité de basses couches sur la Méditerranée. L'apport de notre méthode est l'identification en temps réel de ces sensibilités, qui dépendent beaucoup du cas considéré. Nous testons ensuite la faisabilité d'une repondération bayésienne des membres des prévisions d'ensemble à l'aide des observations les plus récentes, qui dans une mise en oeuvre temps réel permettrait de sélectionner les scénarios météorologiques les plus probables afin d'améliorer la pertinence des alertes de pluie/inondation à courte échéance.

Mots-clefs : modélisation numérique de l'atmosphère, prévision d'ensemble, modèle AROME, pluies intenses

Abstract : Forecast uncertainties frequently plague numerical predictions of high impact precipitation events, even at ranges shorter than 6 hours. A way to improve them is proposed here, based on an original adaptation of the ensemble sensitivity technique to the Météo-France operational AROME EPS system. On quasi-stationary Mediterranean convective events, a by-product is the automatic diagnosis of error sources. In past catastrophic events, several hard to predict atmospheric parameters are found to be relevant, they are located upstream a few hours before the onset of the highest precipitation. In accordance with previous studies, low-level wind, temperature and humidity on the Mediterranean sea are frequent culprits. Our approach allows one to identify in real time which one is most relevant, in a case-dependent manner. Then, a Bayesian member weighting technique is explored, in which the most likely forecast scenarios are identified using the latest available observations. In a real time setting, such a tool would be expected to improve the relevance of short term warnings of high precipitation and flood hazards.

Keywords: atmospheric numerical modelling, ensemble prediction, AROME

1. Introduction et objectifs

La prévision numérique des précipitations est un axe important d'amélioration de l'anticipation des crues et des inondations. Les prévisions numériques opérationnelles fournissent désormais une anticipation utile de la plupart des épisodes de fortes pluies. Mais certains épisodes s'avèrent encore mal prévus jusqu'à quelques heures avant leur déclenchement : les prévisions numériques peuvent soit les sous-estimer, soit susciter des fausses alarmes.

Les progrès techniques récents incluent la mise au point de modèles numériques atmosphériques à maille kilométrique tel qu'AROME (Termonia *et al*, 2018), leur déploiement dans des systèmes de prévision d'ensemble aidant à quantifier les incertitudes de prévision avec une anticipation d'environ 6 à 48 h (Bouttier *et al*, 2016), et les améliorations des systèmes de prévision immédiate ciblant les échéances de 0 à 2 h environ, par extrapolation des observations (Sideris *et al*, 2020) et/ou des mises à jour fréquentes de prévisions numériques (Hagelin *et al*, 2014).

L'objectif de la présente étude est d'améliorer l'utilisation de ces outils pour anticiper les pluies intenses aux échéances de 1 à 6 h, l'expérience montrant que ces dernières sont imparfaitement traitées à la fois par les extrapolations d'observations (l'extrapolation lagrangienne des pluies pouvant être défaillante lors de systèmes orageux quasi-stationnaires) et par les outils de prévision numérique (qui ne convergent généralement pas à très courte échéance vers les structures précipitantes observées). On s'intéresse ici à des épisodes récents de pluies intenses méditerranéennes associés à des systèmes convectifs quasi-stationnaires. Ces épisodes sont intéressants par leurs forts impacts (Ducrocq *et al*, 2016).

Nous avons cherché à y identifier, par la technique de sensibilité ensembliste décrite en section suivante, les sources d'erreurs de prévision des pluies intenses, afin (1) de caractériser les processus de propagation d'erreur responsables des incertitudes sur les prévisions, et (2) de tester la faisabilité d'améliorer ces dernières aux échéances de 1 à 6h par une utilisation ciblée des observations les plus récentes. Ce travail s'intéresse à la jonction entre les échéances actuellement couvertes par les extrapolations d'observation de pluie, et celles de la prévision numérique de l'atmosphère.

2. Méthode, données et outils

La méthode proposée est une extension de la sensibilité ensembliste (Ansell et Hakim, 2007; Hanley *et al*, 2013), originellement développée pour le ciblage d'observations et les analyses de corrélations physiques. Nous l'étendons ici sur deux aspects originaux: (1) l'introduction d'une approche objet permettant d'identifier la propagation des erreurs le long du flux d'alimentation des systèmes convectifs précipitants, ce qui a été précédemment identifié comme un mécanisme clé dans les épisodes de pluies intenses méditerranéennes (Ducrocq *et al*, 2016), et (2) l'utilisation des sensibilités ainsi identifiées pour effectuer une pondération bayésienne (Raynaud *et al*, 2014) sélectionnant les membres les plus probables dans les ensembles de prévision numériques à partir d'observations récentes.

La sensibilité ensembliste utilise ici les prévisions numériques du système opérationnel de prévision d'ensemble AROME (PE AROME), sachant que ces dernières pourront être dans le futur complétées par les prévisions déterministes AROME les plus récentes (celles couplées aux modèles ARPEGE et IFS, et celles à rafraîchissement fréquent AROME-PI). A chaque

instant, toutes ces prévisions peuvent être vues comme des membres d'un ensemble hétérogène, constitué de toutes les prévisions assez fraîches pour constituer des scénarios météorologiques vraisemblables durant les heures à venir.

AROME (Termonia et al, 2018) est un modèle numérique non-hydrostatique actuellement exploité opérationnellement par Météo-France à maille horizontale 1,3km sur la métropole et ses environs, avec des paramétrisations détaillées de la microphysique nuageuse, de la turbulence, du rayonnement et des surfaces. AROME est actuellement initialisé par un système d'assimilation 3D-Var et couplé au système de prévision global ARPEGE. La PE AROME (Bouttier *et al*, 2016) simule, par 16 membres calculés 4 fois par jour à échéance d'environ 48 h, les incertitudes des prévisions AROME via des perturbations du modèle, des surfaces, des conditions initiales et des couplages ARPEGE. Ce système est capable de simuler explicitement les principaux mécanismes physiques des épisodes de précipitations intenses, mais avec des délais de production de plusieurs heures, liés à son coût numérique élevé.

La technique de sensibilité ensembliste repose sur le calcul de corrélations, dans l'échantillon constitué par une prévision d'ensemble, entre des paires de variables x et y de l'atmosphère à des instants généralement différents :

- x est une mesure de la sévérité des précipitations prévues par la PE AROME, cumulées dans une zone où un risque significatif d'inondation a été préalablement identifié. Dans cette étude, il s'agit du quantile spatial Q99 des cumuls sur 3h des pluies dans une période et une zone préalablement cadrées sous forme d'un rectangle dessiné subjectivement, de côté de l'ordre 100 km et valable durant une fenêtre temporelle de 6 h, puis localement restreinte automatiquement à l'enveloppe spatiale des pluies dépassant un certain seuil d'intensité, avec une marge spatiale de 20km. Cette définition de x identifie un objet précipitant "à enjeu", c'est à dire ayant une probabilité significative de provoquer des impacts s'il se concrétise, mais avec une incertitude sur sa localisation et son intensité. La Figure 1 présente en bleu marine un exemple d'un tel objet. Notre but est de déterminer à quoi la prévision de x est sensible, et si possible de réduire l'incertitude sur cette prévision.
- y est un champ météorologique prévu à un instant situé de 1 à 6 heures avant celui auquel x est prévu, et susceptible d'y être corrélé.

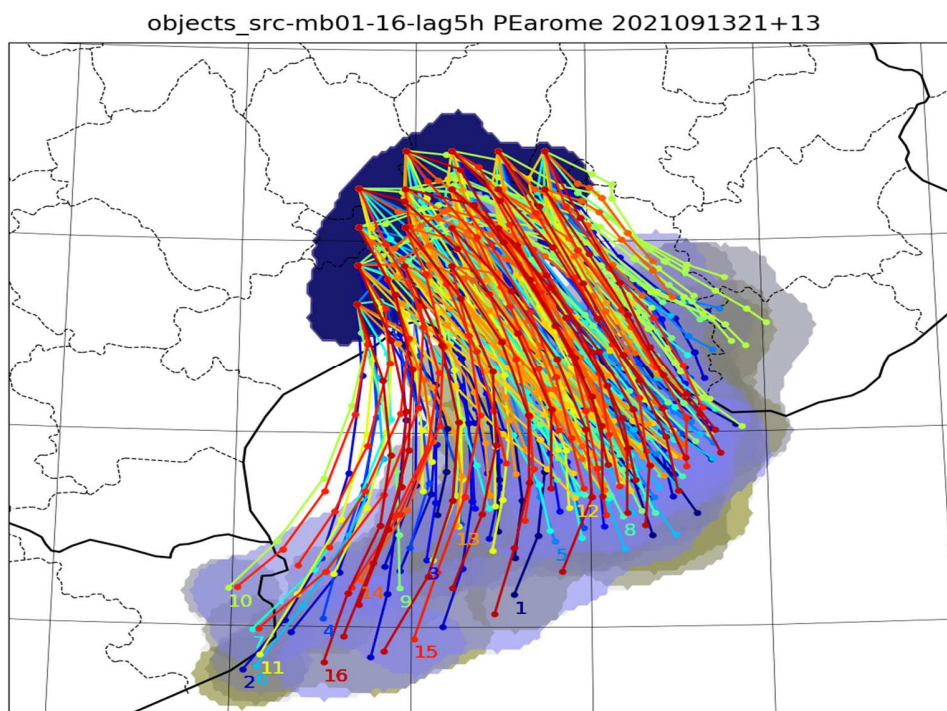


Figure 1 : Exemple d'objet précipitant x (en noir) et zone amont y (en violet) calculés sur un intervalle de 5 heures précédant l'épisode de pluies intenses du 14 septembre 2021. Les lignes en couleur sont des rétrotrajectoires selon la PE AROME.

La variable x étant un scalaire et y un champ, la corrélation $\text{cor}(x,y)$ entre x et y , sur les 16 membres de la PE AROME, est un champ qui représente la relation statistique empirique de y avec les pluies attendues. Compte tenu du petit nombre de membres de l'ensemble, cette statistique souffre d'un bruit d'échantillonnage très important pouvant masquer l'information physiquement significative. Un filtrage du bruit de corrélation est donc effectué à partir d'arguments physiques qui permettent de restreindre l'espace de calcul et donc de réduire le bruit statistique. Ce filtrage fonctionne en deux étapes :

- les points du champ $\text{cor}(x,y)$ associés à des écart-types de prévision de la PE AROME (c'est à dire, des incertitudes) inférieures à un certain seuil sont mises à zéro : on ne tient pas compte des corrélations associées à des incertitudes si faibles que les observations ne permettront pas de distinguer entre les meilleurs et les moins bons membres de l'ensemble.
- à chaque instant, le champ $\text{cor}(x,y)$ est remplacé par sa moyenne spatiale dans la "zone amont" de l'objet précipitant, définie comme l'enveloppe convexe des rétrotrajectoires de tous les points de l'objet précipitant, rétroadvectés par les vents de la PE AROME à altitude 500 m (les résultats ne sont pas sensibles au choix précis de l'altitude). Cela permet de filtrer le bruit d'échantillonnage tout en ciblant l'étude de sensibilité sur les zones pertinentes pour la prévision des pluies.

Dans les cas sélectionnés, les pluies sont associées à de forts vents en basse altitude, ce qui est typique des épisodes de fortes pluies sur le sud-est de la France. Cela rend probable

l'existence d'un lien de causalité entre y et x : améliorer y est susceptible d'améliorer la prévision de x .

Physiquement, les objets y caractérisent les propriétés de masses d'air qui influencent les épisodes de pluie via leur alimentation par un jet de basses couches. Cette notion de contrôle à distance des pluies quasi-stationnaires méditerranéennes a été confirmée expérimentalement dans le cadre du programme de recherches HyMeX (Khodayar *et al*, 2021). Cette approche n'est *a priori* pas valable là où les systèmes précipitants sont déjà établis et modifient leur environnement, par exemple en zone de plage froide, ou dans des systèmes convectifs se propageant à une vitesse comparable à leur environnement, comme les *derechos* ou la plupart des orages de plaine. On note cependant que ces derniers, même violents, produisent rarement des cumuls de pluie catastrophiques du fait même de leur mobilité.

Nous avons appliqué cette méthode à 7 épisodes de fortes pluies en 2021 et 2022 sur le sud-est de la métropole, dont certains sont d'intensité exceptionnelles et d'autres sont modérés. Leurs dates (avec entre parenthèses leurs dénominations usuelles) sont: 19/09/2020 (Gard1), 02/10/2020 (Alex), 03/09/2021 (Sète), 14/09/2021 (Gard2), 04/10/2021 (Marseille), 06/09/2022 (Montpellier1), 07/09/2022 (Montpellier2).

Dans chaque cas, après cadrage manuel, l'algorithme automatique a été appliqué sur les 9h précédant le déclenchement des pluies intenses, dans la PE AROME la plus récente. Les corrélations $\text{cor}(x,y)$ ont été calculées à chaque heure, avec pour y les paramètres suivants:

- T à 2 m (hauteur au-dessus du sol), T de surface, température potentielle pseudo-adiabatique du thermomètre mouillé θ'_w à 500 m.
- humidité spécifique à 500m et eau précipitable totale (TCWV: *total column water vapour*).
- vents: vitesse du vent moyen à 10m, convergence horizontale du vent à 500 m.
- énergie convective CAPE et flux horizontal d'humidité à 500 m (les deux variables ont été examinées séparément).

Les conclusions sont peu sensibles aux choix des hauteurs de calcul de y tant qu'elles se situent dans le jet de basses couches (0 à 800m).

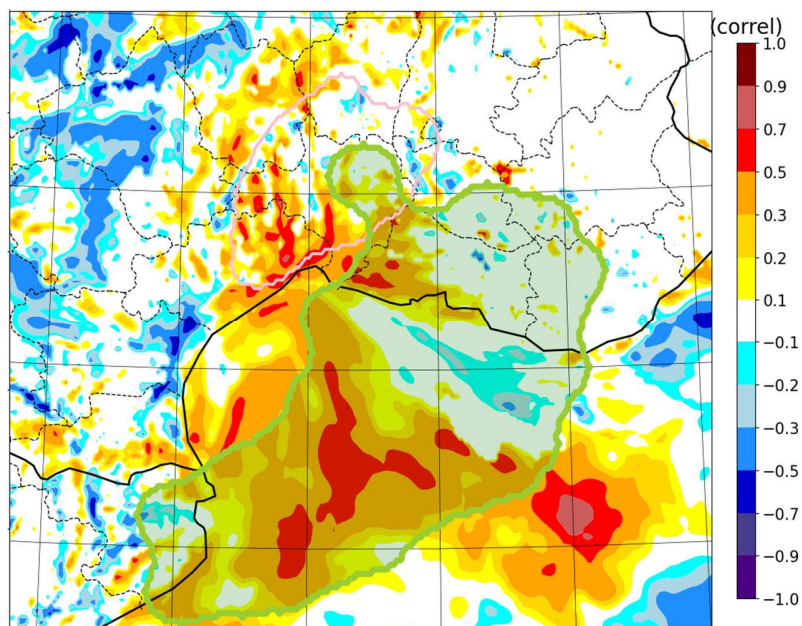


Figure 2 : Champ de corrélations entre les objets précédents, qui montre la sensibilité des pluies au champ de vitesse du vent à 10m, 5h avant le début des pluies intenses. La zone rouge indique qu'un vent plus intense provoque des pluies plus fortes. La région teintée de vert indique la zone amont y des rétrotrajectoires décrite en figure 1.

3. Résultats sur l'identification des paramètres sensibles

La première étape est l'identification des paramètres y qui présentent les plus fortes corrélations avec les pluies x , en vérifiant si ces corrélations sont significatives. Les principales conclusions sont les suivantes :

- tous les cas étudiés comportent des sensibilités importantes (corrélations dépassant 0,5 voire 0,6) sur certains paramètres, et cela plusieurs heures (0-6 h) avant l'apparition des pluies intenses. La figure 2 illustre la sensibilité au vent sur le cas du 14 septembre 2021.
- comme physiquement attendu et en accord avec la littérature scientifique sur les épisodes méditerranéens, les zones les plus sensibles se situent le long du jet de basses couches, sur la mer Méditerranée.
- les paramètres présentant des sensibilités importantes varient d'un cas à l'autre. Certains épisodes sont uniquement sensibles au vent, d'autres à l'humidité ou à la température. Cela indique que les modèles conceptuels communément utilisés pour expliquer les précipitations intenses méditerranéennes (importance de la CAPE, de la convergence, de l'alimentation en humidité, etc.) ont des limites. La méthode proposée ici permet d'identifier en temps réel quels paramètres sont les mieux corrélés aux pluies du jour.
- certains paramètres dont l'importance est habituellement admise (Khodayar *et al*, 2021; Lee *et al*, 2018) n'ont, en fait, quasiment aucune influence selon notre diagnostic. Il s'agit notamment

de la CAPE, de θ'_w et de la convergence de vent aux niveaux étudiés. La figure 3 illustre ce point sur le cas du 14 septembre 2021. Cela suggère que ces paramètres sont dans l'absolu importants pour la production de pluies intenses, mais qu'améliorer leur analyse¹ n'est pas prioritaire pour mieux prévoir les pluies, vraisemblablement parce que leurs analyses présentent relativement peu d'incertitudes par rapport à leur influence sur les prévisions. Concernant la convergence de vent, la méthode de calcul employée ici étant assez fruste, on ne peut exclure qu'un mode de calcul différent en aurait révélé une importance plus significative.

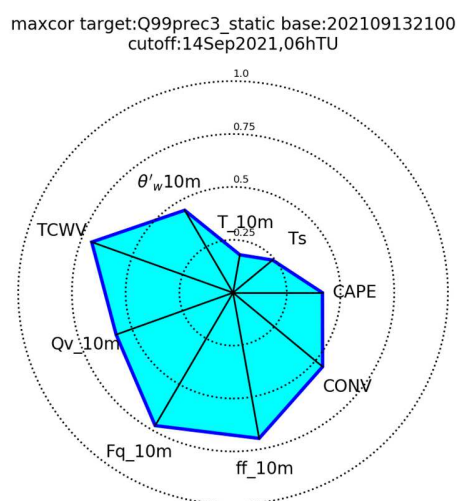


Figure 3 : Comparaison des corrélations entre les pluies prévues x (comme défini précédemment) et plusieurs paramètres atmosphériques y en amont (T_{10m} : température à 10 m ; T_s : température de surface ; CAPE: énergie convective potentielle disponible ; CONV: convergence du vent à 10 m ; ff_{10m} : vitesse du vent à 10 m ; Fq_{10m} : flux horizontal d'humidité à 10 m ; Qv_{10m} : humidité spécifique à 10 m ; TCWV: eau précipitable totale ; θ'_w : température potentielle à 10 m.) Chaque cercle concentrique indique le maximum de la valeur absolue de la corrélation avec la moyenne spatiale de y , jusqu'à au moins 2 h avant l'établissement des pluies intenses.

4. Résultats sur la pondération bayésienne des prévisions

La question suivante est le potentiel de ces informations pour améliorer les prévisions. La technique testée consiste à effectuer une pondération bayésienne des membres de la PE AROME (initialement équiprobables), en accordant plus de poids aux membres les plus cohérents avec les analyses 3DVar AROME, qui sont ici utilisées comme substitut à des observations (les analyses sont techniquement plus faciles à comparer à des champs de modèle numérique, même

¹ en modélisation numérique de l'atmosphère, "analyse" désigne la production, à partir d'observations, d'un état de modèle numérique (variables physiques sur une grille de discrétisation) approximant l'état réel de l'atmosphère, et servant de condition initiale à une prévision par application de l'évolution temporelle simulée par ce modèle.

si elles présentent l'inconvénient de ne pas être toujours très fidèles aux observations; elles sont disponibles quelques minutes après les observations).

Les méthodes de pondération bayésienne des ensembles reposent sur l'hypothèse que les membres qui sont les plus fidèles aux observations, quelques heures après leur calcul, resteront ultérieurement les meilleurs, et qu'il faut donc leur accorder une confiance plus élevée qu'aux autres membres. Cette idée est subjectivement appliquée par de nombreux prévisionnistes humains pour identifier quel est leur "scénario préféré" parmi les modèles numériques à leur disposition. Cependant, elle est d'une efficacité très limitée lorsqu'on l'applique brutalement à l'ensemble des variables atmosphériques (Raynaud *et al*, 2014). Elle est souvent prise en défaut si on utilise les champs de pluie observés pour prévoir les pluies futures lors d'épisodes méditerranéens, car ces derniers doivent leur imprévisibilité à des déclenchements rapides de systèmes convectifs quasi-stationnaires, et non à la propagation d'objets précipitants dont les observations pourraient être facilement extrapolées. La méthode de sensibilité ensembliste proposée ici vise à contourner cette difficulté en se fondant sur la cohérence avec les analyses, non pas des pluies, mais d'une famille de variables y sélectionnées pour leur corrélation avec l'événement précipitant x .

Cette cohérence est quantifiée au travers du paramètre y le mieux corrélé en amont avec (et plusieurs heures avant) x . Chaque membre i de la prévision d'ensemble est affecté d'un poids $w(i) = \exp(-[m(y_i) - m(y_a)]^2 / s^2)$ où $m(y_i)$ est la moyenne spatiale du champ y de ce membre dans la "zone amont" définie plus haut, $m(y_a)$ la même fonction appliquée au champ analysé à cette heure de prévision, et s est un facteur de réglage empirique pilotant la dispersion entre les poids w . Ces poids augmentent d'autant plus la confiance accordée au membre i que sa prévision de y est cohérente avec les observations. Les poids $w(i)$ sont alors utilisés pour définir la distribution de probabilité des pluies prévues en pondérant les valeurs de x correspondantes. En résumé, notre algorithme augmente la confiance dans les prévisions les plus cohérentes avec les observations en amont de la zone susceptible d'être touchée par des pluies intenses.

Sur le cas d'étude du 14 septembre 2021, cette pondération permet d'améliorer la prévision probabiliste des pluies, au sens où la pondération réduit la dispersion des pluies prévues, et rapproche les intervalles de confiance des valeurs prévues de ce qui s'est effectivement produit (Figure 4). Autrement dit, sur ce cas, la pondération en temps réel de l'ensemble par les observations récentes (disponibles après la production PE AROME) aurait permis de faire une prévision à la fois plus confiante et plus réaliste du scénario de pluies intenses attendues quelques heures plus tard. Ce résultat prometteur reste à être consolidé sur un grand nombre de cas avec des évaluations des taux d'échecs (proportions des non-détections et fausses alarmes, à comparer avec ce qui est admissible dans les alertes)

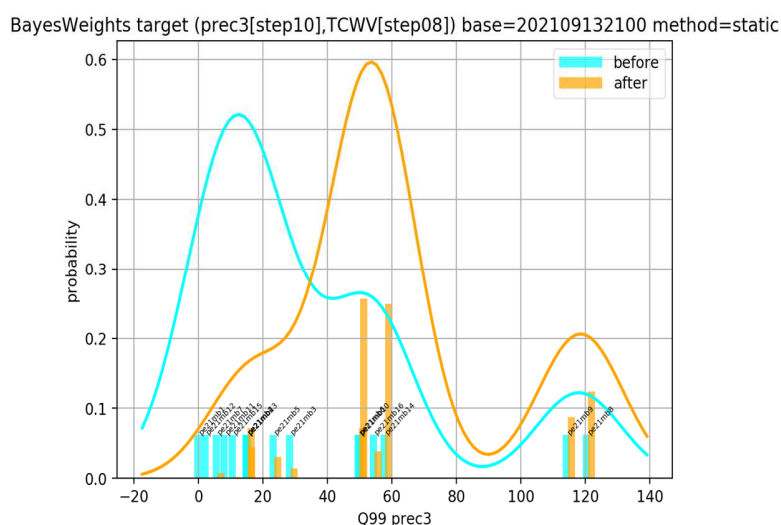


Figure 4 : Comparaison des distributions prévues par l'ensemble PE AROME opérationnel en supposant les membres équiprobables (en bleu), et en accordant un poids plus élevé (en orange) aux membres dont l'eau précipitable TCWV était plus proche des analyses disponibles 2 h avant l'établissement des pluies intenses (même cas et objets x et y que précédemment ; la pluie x observée a posteriori était, en fait, de 85 mm sur 3 h). Les histogrammes montrent les distributions des 16 membres (valeur de x en abscisse, probabilité normalisée en ordonnée), les courbes montrent les mêmes distributions lissées par un noyau gaussien. Cette figure montre que la pondération bayésienne par les TCWV analysés après la production de l'ensemble aurait pu permettre d'augmenter la confiance dans les scénarios les plus réalistes de l'ensemble.

5. Conclusions

En conclusion, nous avons montré la faisabilité d'une amélioration des prévisions probabilistes de pluie par post-traitement de prévisions d'ensemble à l'aide d'observations disponibles en temps réel, quelques heures avant la survenue d'épisodes de pluies méditerranéennes intenses. L'espace disponible pour cet article étant limité, nous n'avons illustré la méthode que sur un seul cas parmi 7, mais les 6 autres produisent des résultats comparables.

Cet algorithme s'accompagne d'une visualisation originale des mécanismes responsables des incertitudes sur les pluies prévues, qui ont pour but de permettre à un(e) prévisionniste sous pression d'identifier d'un coup d'oeil les paramètres les plus suspect et donc, on l'espère, de lui faciliter l'estimation de la vraisemblance des scénarios proposés par les prévisions numériques, lors de l'élaboration d'alertes aux fortes pluies. Pour remplir pleinement cet objectif, il faudrait compléter les cartes présentées dans cet article par une visualisation convaincante de la cohérence des prévisions avec des observations brutes de vent, humidité, etc, dans les zones sensibles, ce qui reste un objectif difficile en raison de la rareté des observations de basses couches sur mer. Il est possible que les futures acquisitions de mesures par satellite, radar doppler ou bouées permettront de progresser dans ce domaine.

Les travaux prévus pour continuer à améliorer notre approche concerneront :

- un usage plus direct des observations, incluant des satellites, et d'autres variables que celles présentées ici,
- l'estimation de l'intérêt de déployer sur le terrain des observations supplémentaires ciblées pour améliorer les prévisions de pluies,
- la fusion entre les outils de prévision immédiate, de prévision numérique, et d'hydrologie, pour présenter des scénarios temporellement sans couture faciles d'emploi pour les non-experts,
- des tests d'applicabilité à d'autres types de phénomènes, notamment les orages non-stationnaires et les précipitations orographiques non-méditerranéennes.

6. REFERENCES

- Ancell, B. et G.J. Hakim, 2007. Comparing Adjoint- and Ensemble-Sensitivity Analysis with Applications to Observation Targeting. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 4117–4134.
<https://doi.org/10.1175/2007MWR1904.1>
- Bouttier F., L. Raynaud, O. Nuissier et B. Ménétrier, 2016. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX.. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 142: 390–403. <https://doi.org/10.1002/qj.2622>
- Ducrocq, V., S. Davolio, R. Ferretti, C. Flamant, V. Homar Santaner, N. Kalthoff, E. Richard et H. Wernli, 2016. Introduction to the HyMeX Special Issue on ‘Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation in the Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign’. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 142(S1): 1–6.
<https://doi.org/10.1002/qj.2856>
- Hagelin, S., L. Auger, P. Brovelli et O. Dupont, 2014. Nowcasting with the AROME Model: First Results from the High-Resolution AROME Airport. *Wea. Forecast.*, 29:773-787.
<https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00083.1>
- Hanley, K. E., D. J. Kirshbaum, N. M. Roberts, G. Leoncini, 2013. Sensitivities of a Squall Line over Central Europe in a Convective-Scale Ensemble. *Mon. Wea. Rev.*, 141: 112–133. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00013.1>
- Khodayar, S., et collaborateurs, 2021. Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the Western Mediterranean: lessons learned from HyMeX. *Atmos. Chem. Phys.*, 21: 17051–17078.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-17051-2021>
- Lee K.-O., C. Flamant, F. Duffourg, V. Ducrocq, and J.-P. Chaboureaud, 2018. Impact of upstream moisture structure on a back-building convective precipitation system in south-eastern France during HyMeX IOP13, *Atmos. Chem. Phys.*, 18: 16845–16862.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-16845-2018>
- Raynaud, L., O. Pannekoucke, P. Arbogast et F. Bouttier, 2014. Application of a Bayesian weighting for short-range lagged ensemble forecasting at the convective scale. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 141:459-468. <https://doi.org/10.1002/qj.2366>

- Sideris, I., L. Foresti, D. Nerini et U. Germann, 2020. NowPrecip: localized precipitation nowcasting in the complex terrain of Switzerland. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, 146: 1768-1800. <https://doi.org/10.1102/qj.3766>
- Termonia P., C. Fischer , E. Bazile , F. Bouyssel , R. Brozková , P. Bénard , B. Bochenek, D. Degrauwe , M. Derková, R. El Khatib, R. Hamdi, J. Masek, P. Pottier , N. Pristov, Y. Seity, P. Smolíkova, O. Spaniel, M. Tudor, Y. Wang, C. Wittmann and A. Joly, 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geophys. Model Dev.* 11:257–281 <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>