

ENM, Projet de Fin d'Études (PFE)
Août 2019

Les scénarios météorologiques dans la Prévision d'Ensemble AROME

Arnaud MOUNIER (1), encadré par Philippe ARBOGAST (2)

(1) : Élève IENM3 à l'ENM (École Nationale de la Météorologie), Toulouse, FRANCE

(2) : Responsable de la Prévision Générale à la Direction des Opérations de la Prévision (DIROP/PG/D), Toulouse, FRANCE

Contact : arnaud.mounier@meteo.fr

Mots clés : Scénarios --- Prévision d'Ensemble --- Objets

Résumé

La croissance exponentielle des données mises à disposition des prévisionnistes par l'intermédiaire des prévisions d'ensembles requiert une nouvelle approche pour extraire pleinement les informations contenues dans celles-ci. Cette nouvelle méthode basée sur des scénarios météorologiques a pour but d'ajouter un regard « physique » lors de l'analyse des prévisions d'ensembles, dans un monde où elles sont exploitées à l'aide de probabilités et de quantiles. Les scénarios météorologiques se définissent comme des regroupements de membres d'une prévision d'ensemble sur plusieurs échéances consécutives. Cette méthode a nécessité la construction d'une métrique pour comparer les membres et la définition de trajectoires pour ajouter une composante d'évolution. Les scénarios ont été évalués avec des comparaisons aux observations qui montrent des résultats très encourageants.

Introduction

Ce projet de fin d'études s'inscrit plus globalement dans une problématique liée à l'utilisation des prévisions d'ensembles en météorologie. Les prévisions d'ensembles tentent de générer un échantillon représentatif des possibles états futurs de l'atmosphère par l'intermédiaire de plusieurs membres perturbés. Ces membres perturbés permettent ainsi de rendre compte des incertitudes sur la prévision. L'atmosphère étant régie par des équations chaotiques, cette information est très importante.

Le problème de ces prévisions d'ensembles réside actuellement dans leur nécessaire synthèse. En effet, l'utilisation la plus fréquente se fait actuellement sous forme de quantiles ou de probabilités, approche purement statistique qui ne permet pas de représenter et de suivre les structures cohérentes présentes dans l'atmosphère comme les cellules orageuses ou les fronts, par exemple. L'objectif de ce projet était donc de développer une nouvelle méthode laissant transparaître ces structures qui sont fondamentales pour l'analyse de la situation par le prévisionniste et l'aider dans sa prise de décision.

Cette méthode a été développée sur la Prévision d'Ensemble Arome (PE Arome). Elle est constituée de 16 membres depuis juillet 2019 (12 auparavant) avec une résolution horizontale de 2,5 km. Elle a été développée pour traiter notamment les phénomènes convectifs (typiquement les orages) avec des échéances qui vont jusqu'à 51 h. Les problématiques liées aux fortes pluies et orages étant cruciales pour Météo-France (l'exemple le plus parlant étant les inondations dans l'Aude en octobre 2018), la bonne utilisation de la PE Arome est un enjeu majeur.

Pour repérer les structures dans l'atmosphère, une méthode objet sera utilisée. Cette méthode développée au sein de l'équipe RECYF¹ au CNRM² par Arbogast et al. (2016) et améliorée depuis, permet de définir des objets de pluies pour les cumuls sur 6 h. La Figure 1 est un exemple d'application de cette méthode sur un champ de pluie. Elle rend bien compte de la critique subjective que nous pouvons faire d'une carte de pluie avec 3 types d'objets (pluies totales en jaune, modérées en orange et fortes en rouge).

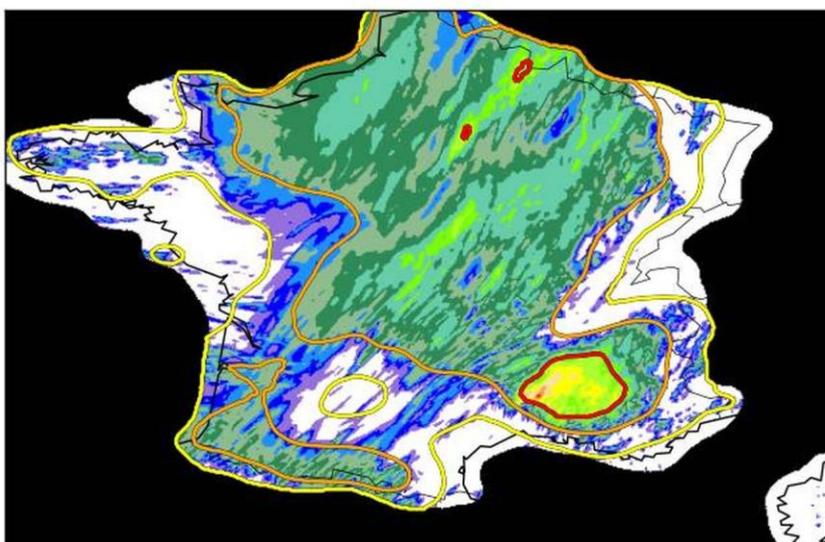


Figure 1. Illustration de la méthode objet en prenant comme exemple la prévision AROME du 8 Août 2018 à 00.00 UTC pour l'échéance + 36 h. 3 types d'objet sont alors définis : pluie totale (jaune), pluie modérée (orange) et pluie forte (rouge)

Ce projet de fin d'études a donc permis de développer une méthode pour extraire des scénarios météorologiques de la PE Arome en se basant sur les pluies cumulées sur 6 h et la méthode objet développée par RECYF.

Méthodologie

Pour aboutir à la création de scénarios météorologiques, deux grandes étapes ont été nécessaires : premièrement, la création d'une métrique permettant de discriminer les membres

¹ Recherche et Expérimentations sur les CYclogenèses et les Fronts

² Centre National de Recherches Météorologiques

entre eux à une échéance donnée et aboutissant à des classes, puis l'ajout d'une composante temporelle à ces classes pour parler de scénarios. Ces deux étapes vont être détaillées ci-dessous.

La métrique

La métrique (distance entre deux prévisions de deux membres) s'appuie sur les 3 types d'objets décrits dans la section précédente. On définit alors 3 distances : D_{LR} (pluie totale), D_{MR} (pluie modérée) et D_{HR} (pluie forte). La philosophie générale pour construire la métrique a été la suivante : pour les pluies peu intenses, la localisation des pluies est l'élément primordial. Pour les pluies fortes, la localisation est un élément important mais l'intensité exacte et l'étendue spatiale le sont également.

Les distances D_{LR} et D_{MR} se construisent avec la distance de Jaccard, idéale pour comparer des objets comme l'ont montré les travaux de Raynaud et al. (2019).

Distance et score de Jaccard

Le score de Jaccard s'écrit pour 2 objets A et B :

$$Jaccard = \frac{A \cap B}{A \cup B}.$$

C'est donc l'intersection des 2 objets sur leur union. Le score de Jaccard prend une valeur entre 0 et 1. Il est donc égal à 1 si les deux objets ou champs de pluies se superposent parfaitement, 0 s'ils n'ont aucun point d'intersection. La distance de Jaccard se déduit alors simplement :

$$D_{Jaccard} = 1 - Jaccard,$$

D_{LR} et D_{MR} ne se déduisent pas directement de la distance de Jaccard. En effet une fonction correctrice est appliquée mais elle ne sera pas détaillée ici.

Pour les précipitations fortes, l'approche est différente. On raisonne ici objet par objet. Les objets sont comparés entre eux et jugés « associables » ou non selon des critères de distances entre leurs centres de masse essentiellement. Si des objets sont associables, on compare alors leur étendue spatiale (aire des objets) et leur intensité (Quantile 90 % de la distribution à l'intérieur de l'objet). Ces objets « associables » donnent une première contribution à la métrique $D_{HR}^{Couples}$. Si un objet lié à un des deux champs de pluie n'a pas réussi à être associé à un autre objet de l'autre champ, on dit que cet objet est « isolé » ; on pénalisera alors fortement cet écart entre les 2 champs. Cette pénalité est d'autant plus grande que l'étendue spatiale et l'intensité de l'objet sont importantes. Ces objets isolés forment la deuxième contribution : D_{HR}^{Isol} .

La distance D_{HR} se déduit alors de ces deux contributions :

$$D_{HR} = \alpha \times D_{HR}^{Couples} + \beta \times D_{HR}^{Isol}.$$

Les coefficients α et β permettent de s'assurer que les termes $D_{HR}^{Couples}$ sont globalement plus petits que D_{HR}^{Isol} et d'un ordre de grandeur semblable à D_{LR} et D_{MR} .

On obtient alors la métrique suivante :

$$D_f = 1,5 \times D_{LR} + 1,5 \times D_{MR} + D_{HR}.$$

Cette métrique ne sera pas détaillée plus précisément. On retiendra cependant qu'elle permet de calculer une distance entre chaque membre de l'ensemble.

Élaboration des scénarios

A l'aide de la métrique précédente, on peut calculer toutes les distances entre les membres de l'ensemble pour former une matrice des distances. Ensuite, on peut appliquer une méthode de regroupement (clustering) pour former un dendrogramme comme dans la figure 2.

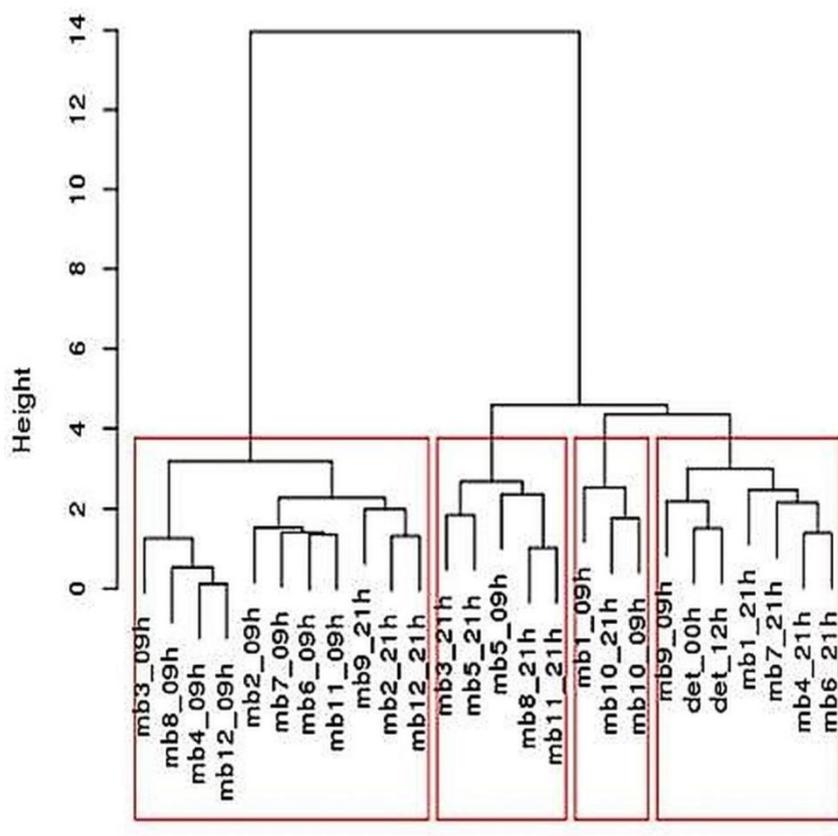


Figure 2. Exemple de dendrogramme obtenu en calculant les interdistances entre les membres des prévisions d'ensembles pour le 22 Juin 2017 à 18.00 UTC. Les membres sont repérés par leur numéro (ou det pour les déterministes) et leur réseau (09.00 UTC et 21.00 UTC pour la PE). Les branches représentent les rapprochements entre membres et les carrés rouges les groupes de membres obtenus.

Sur un dendrogramme, plus on remonte l'arbre, plus les distances sont grandes. Pour définir les classes, on donne une valeur au-delà de laquelle on arrête de remonter l'arbre comme dans l'exemple de la figure 2 où la limite est fixée à 4, les classes retenues étant encadrées en rouge.

On est maintenant capable de définir des classes à chaque échéance, mais pour parler de scénario il faut ajouter une composante d'évolution à nos classes. Pour ce faire, nous allons les regarder sur 4 échéances consécutives (choix issu de Raynaud et al. (2019)) comme sur la figure 3 où on retrouve une seule classe aux deux premières échéances et quatre aux deux dernières.

Nous allons étudier les trajectoires des membres qui se définissent comme les classes successives qu'elles traversent. Ces trajectoires sont représentées par des flèches sur la figure 3. Il est alors intéressant de regrouper les membres ayant exactement la même trajectoire pour former des scénarios, qui seront selon la taille des effectifs après regroupement, majoritaires, alternatifs ou minoritaires. Sur la figure 3, la flèche en gras (noir) représente un scénario majoritaire avec 10 membres. Les autres flèches en traits pleins sont des scénarios alternatifs avec 3 ou 4 membres et les flèches discontinues des scénarios minoritaires avec 1 ou 2 membres.

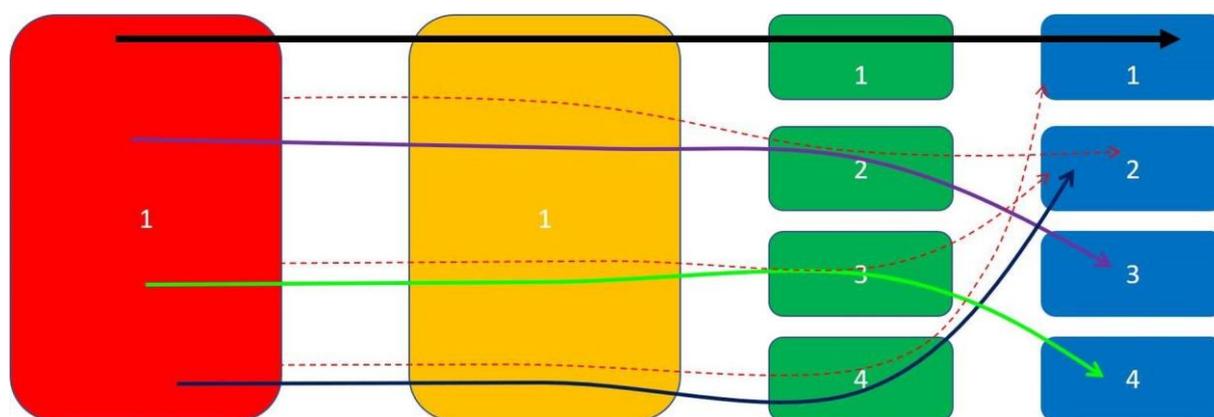


Figure 3. Représentation des trajectoires des membres de l'ensemble. On représente ici les 4 échéances par quatre couleurs différentes avec un nombre de classe variable (1 classe puis 4 classes). Les flèches représentent alors les différentes classes traversées par les membres : la flèche noire correspond au scénario majoritaire (celui qui comporte le plus de membres), les flèches continues d'autres scénarios avec au minimum 3 membres (1, 1, 4, 2 pour le bleu par exemple) et les flèches en pointillés les scénarios avec seulement 1 ou 2 membres.

On dénombre beaucoup trop de scénarios, c'est pourquoi une méthode de filtrage a été mise en place pour réduire ce nombre. Le premier filtre supprime les scénarios minoritaires à 1 ou 2 membres, le deuxième vérifie qu'il y a bien de la cohérence entre les membres d'un scénario. En effet, il est possible sous certaines conditions que le regroupement ne soit pas satisfaisant et conduise à former un scénario avec une grande dispersion entre les membres le constituant. Dans ce cas, le scénario est supprimé. Ce filtrage conduit mécaniquement à ne pas représenter certains membres dans la synthèse par scénarios, puisque celle-ci doit être représentative de la prévision d'ensemble, et non de la prévision de chaque membre la constituant.

La mise en place de ce filtrage permet ainsi de ne retenir que les scénarios les plus représentatifs. Ils se présentent alors comme sur la figure 3 avec une succession de cartes de pluies pour 4 échéances consécutives. L'ensemble de la méthodologie va maintenant être

évalué objectivement au moyen de la lame d'eau du système « Antilope », qui est un produit d'observation des pluies spatialisées mélangeant les données des pluviomètres et des radars.

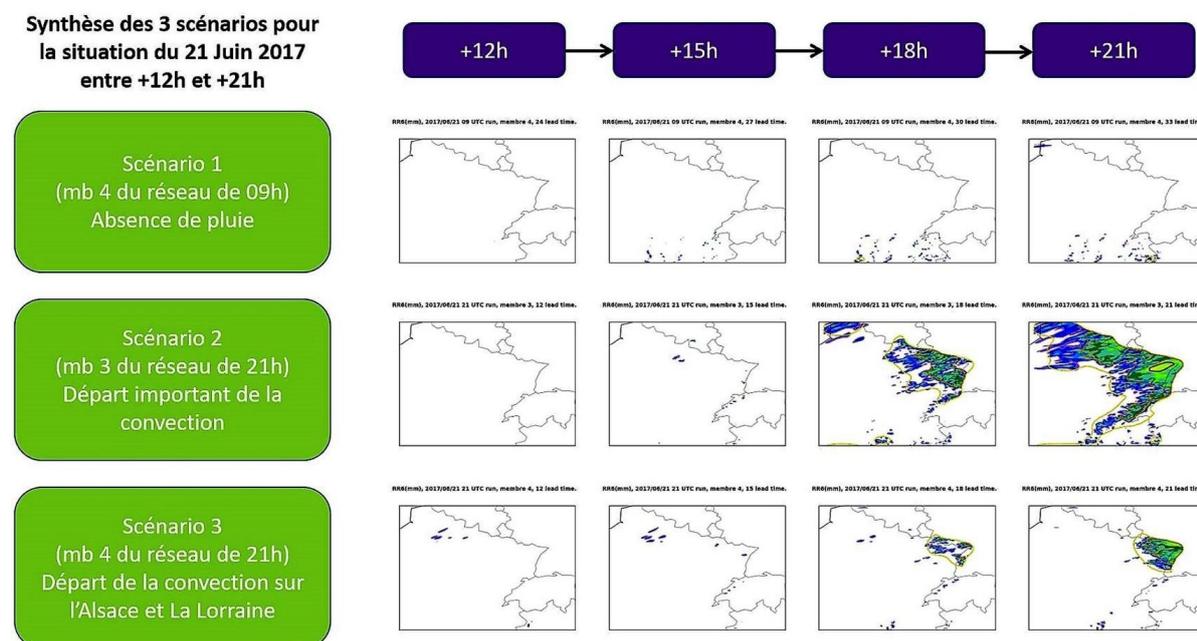


Figure 4. Exemple de synthèse par scénarios pour la situation du 22 Juin 2017 entre 09.00 UTC et 18.00 UTC (correspondant aux échéances entre + 12 h et + 21 h pour la PE Arome du 21 Juin 2017 à 21.00 UTC).

Évaluation de la méthode

L'évaluation de la méthode a été faite au moyen du produit Antilope sur 16 cas d'études. Parmi ces 16 dates, 11 sont des cas de vigilance orange ou rouge pour « pluie-inondation » ou « orages violents ». Les scores globaux vont être présentés, puis un point plus précis sera fait pour évaluer l'intérêt d'utiliser ces scénarios pour des prévisions à très courtes échéances (+ 6 h ou + 9 h).

Scores globaux

Il convient tout d'abord de préciser que l'étude ne se limite pas à une seule prévision de la PE Arome. Le nouvel ensemble est en effet constitué de modèles déterministes (avec donc une unique prévision et non pas plusieurs membres) qui ont été ajoutés pour les comparer aux membres de la prévision d'ensemble. De plus, un autre réseau (une prévision plus ancienne) de la PE Arome est aussi ajouté, les prévisions plus anciennes ayant un intérêt comme l'article de Raynaud et al. (2015) l'avait montré.

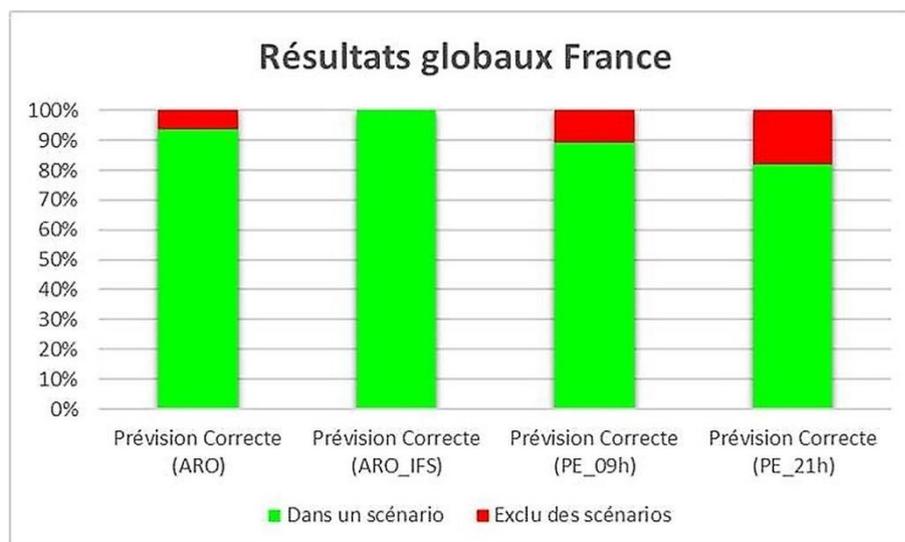


Figure 5. Scores comparant les performances des modèles déterministes ARO et ARO-IFS ainsi que les 2 réseaux de la PE Arome 09.00 UTC et 21.00 UTC. Il n'y a pas de distinction entre les réseaux pour les modèles déterministes car les scores étaient très similaires (la moyenne de ces 2 scores est représentée). Il s'agit ici de vérifier qu'un membre de la PE ou d'une prévision déterministe fait rarement une prévision correcte en étant totalement isolé (partie rouge).

Sur la figure 5, on se place donc dans la situation où le modèle choisi a fait une prévision correcte. On se demande alors si ce modèle (ou le membre de la prévision d'ensemble) était classé dans un scénario ou s'il avait été rejeté par l'algorithme.

De gauche à droite, on trouve les scores pour le modèle déterministe Arome (ARO), l'autre modèle déterministe Arome-IFS (ARO-IFS qui est couplé au modèle du CEPMMT plutôt qu'à ARPEGE), la PE Arome du réseau de 09.00 UTC (PE_09 h) et la PE Arome de 21.00 UTC (PE_21 h). On remarque que les scores sont globalement très bons (le plus souvent autour de 90 %) avec un avantage pour les modèles déterministes Arome et Arome-IFS. La différence entre la PE de 09.00 UTC et la PE de 21.00 UTC s'explique par le choix des dates : la PE de 09.00 UTC est plus souvent le réseau le plus récent que l'inverse.

Sur la figure 6, on calcule les scores en prenant le problème dans le sens inverse, on s'interroge sur le taux de réussite du modèle si celui-ci est situé dans un scénario. Autrement dit, on s'intéresse au ratio présence dans un scénario correct sur présence dans un scénario quelconque. On remarque encore un avantage pour les modèles déterministes avec un taux de réussite autour de 50 % alors qu'il tombe à 35 % et 25 % pour les 2 réseaux de la prévision d'ensemble.

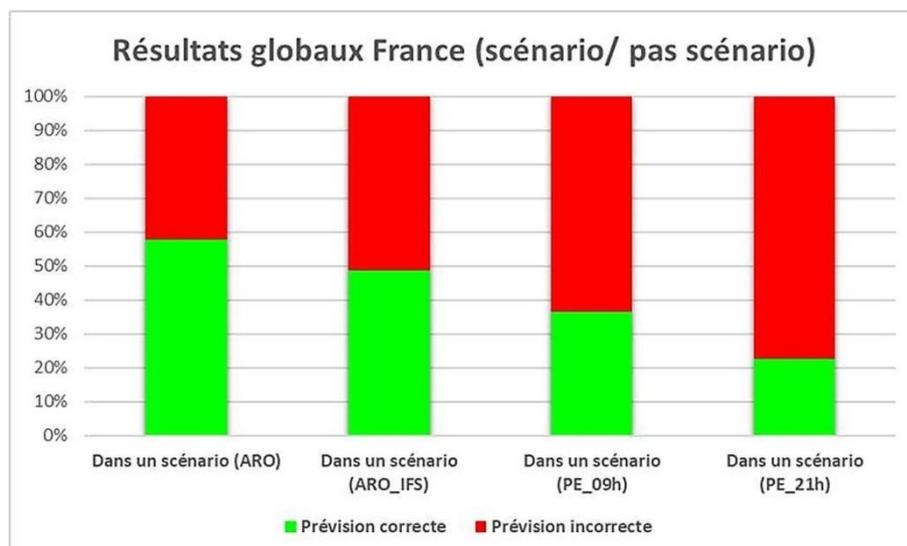


Figure 6. Scores similaires à ceux présentés dans la figure 5. Il s'agit ici d'évaluer les performances d'un modèle déterministe ou d'un membre de la PE lorsque celui-ci est présent dans un scénario.

On peut tirer comme conclusion de ces deux figures que même si les modèles déterministes présentent des scores bien meilleurs qu'un membre moyen de la PE Arome, ces membres de la PE peuvent conforter ou au contraire mettre en doute une prévision déterministe. En effet d'après la figure 5, un modèle déterministe a rarement raison en étant isolé et exclu des scénarios (partie rouge inférieure à 10 % pour les déterministes). Nous allons voir maintenant une autre application possible de ces scénarios.

Utilité des scénarios pour les prévisions à très courtes échéances

La question qui se pose pour pouvoir aller plus loin dans l'exploitation de ces scénarios est de savoir si un scénario qui est proche de l'observation à l'instant t , comme le scénario rouge sur la figure 7, le restera 3 h, 6 h ou 9 h plus tard comme sur le schéma. Si c'est le cas, nous pouvons alors espérer améliorer nos prévisions en comparant les premières échéances du modèle avec les observations disponibles afin de déterminer le scénario le plus proche de ces observations et de suivre son évolution au cours du temps.

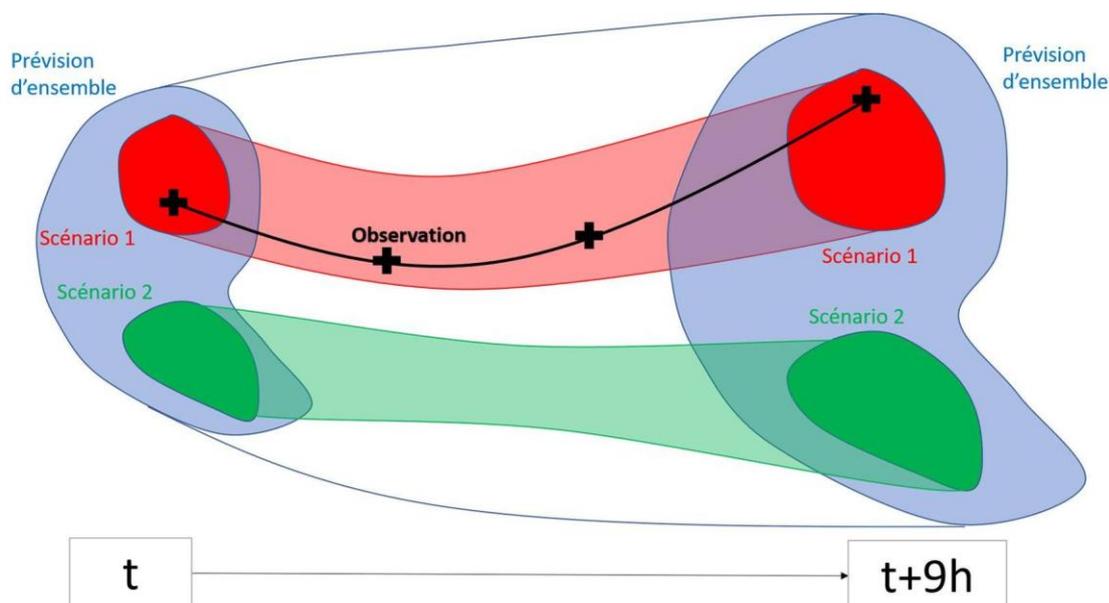


Figure 7. Représentation schématique des scénarios et de l'observation dans le temps.

Pour répondre à cette question, nous allons nous intéresser aux corrélations entre les distances scénarios/Antilope. Les corrélations permettront de voir si les distances faibles (fortes) à l'instant t restent faibles (fortes) aux échéances suivantes.

Effectif	4 membres	7 membres
$t \rightarrow t+3h$	0.82	0.88
$t \rightarrow t+6h$	0.4	0.68
$t \rightarrow t+9h$	0.26	0.52

Table 1. Tableau récapitulatif des corrélations entre les distances à l'observation espacées de 3 h, 6 h et 9 h. On considère l'ensemble des scénarios avec plus de 4 membres dans la colonne centrale et ceux avec plus de 7 membres dans la colonne de droite.

Les corrélations sont données dans la table 1, avec à gauche tous les scénarios constitués d'au minimum 4 membres et à droite ceux constitués d'au minimum 7 membres. On constate naturellement que les corrélations diminuent avec les échéances, mais elles restent malgré tout non nulles à $t + 9$ h. On remarque surtout des corrélations très intéressantes si on considère les scénarios constitués d'au moins 7 membres. Ces résultats montrent donc que si un scénario est proche de l'observation à l'instant t , notre confiance pour le prolonger dans les échéances suivantes sera fonction de son effectif : plus il sera peuplé, plus nous pourrons lui faire confiance. Cette utilisation originale de la prévision d'ensemble pour les échéances à + 6 h/+ 9 h prolonge alors naturellement les produits à échéances encore plus courtes de la Prévision Immédiate (PI).

Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était de développer une approche par scénarios de la prévision d'ensemble Arome à l'aide de la méthode objet appliquée au paramètre pluie. Une métrique a été développée en ce sens à partir des attributs des objets, puis cette métrique a été utilisée pour définir des scénarios météorologiques sur un intervalle de temps de 9 h. L'évaluation a montré de bons résultats pour les scores globaux et d'intéressantes perspectives pour

l'utilisation de ces scénarios en prévision à très courtes échéances (+ 6 h/+ 9 h), en particulier pour les scénarios suffisamment peuplés.

Pour poursuivre ces travaux, la synthèse par scénarios pourra être étendue à des objets plus complexes qui prendront en compte plusieurs paramètres météorologiques ; on parlera alors d'objets multivariés. Ces objets plus complexes (e.g. objet « orages ») permettront d'appliquer l'approche par scénarios à des paramètres de temps sensible facilitant ainsi la prise en compte des prévisions d'ensembles par les prévisionnistes dans le processus de prise de décision.

Remerciements

Je tiens à remercier mon encadrant Philippe Arbogast pour son aide, Laure Raynaud et Iseline Pechin pour leurs explications sur la méthode objet et son utilisation. Je remercie également les équipes PG/Labo et PG/Dev pour leur aide et leur accueil.

Références

Arbogast, P., Pannekoucke, O., Raynaud, L., Lalanne, R. and Memin E. (2016) Object-oriented processing of CRM³ precipitation forecasts by stochastic filtering. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 2827-2838.

Raynaud, L., Pannekoucke, O., Arbogast, P. and Bouttier F. (2015). Application of a Bayesian weighting for short-range lagged ensemble forecasting at the convective-scale. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 459-468.

Raynaud, L., Pechin, I., Arbogast, P., Tottner, L., and Destouches M. (2019). Object-based verification metrics applied to the evaluation and weighting of convective-scale precipitation forecasts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **145**, 1992-2008.

³ Cloud Resolving Model