

# Atelier sur les post-traitements en sortie de prévisions d'ensemble du temps et la génération automatique de produits : compte-rendu, orientations de Météo-France

*Alain Joly*

*Météo-France*

version 1.0 du 15 mai 2018

## Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2 Vers une synthèse de l'atelier</b>	<b>4</b>
2.1 Rappel de quelques notions . . . . .	4
2.2 Groupe de travail numéro 1 . . . . .	6
2.3 Groupe de travail numéro 2 . . . . .	7
2.4 Groupe de travail numéro 3 . . . . .	8
2.5 Groupe de travail numéro 4 . . . . .	9
2.6 Points forts des présentations des invités extérieurs . . . . .	10
2.6.1 Post-traitement probabiliste outre-Atlantique . . . . .	10
2.6.2 Post-traitement probabiliste outre-Manche et Mer du Nord . . . . .	12
2.6.3 Post-traitement probabiliste outre-Rhin . . . . .	15
2.7 Synthèse . . . . .	17
<b>3 La nouvelle organisation de la production de prévisions à Météo-France : le programme 3P</b>	<b>19</b>
3.1 Les projets de 3P . . . . .	19
3.2 Principes de la nouvelle chaîne de production . . . . .	20
3.3 Calendrier et cible technique principale . . . . .	21
3.4 Cas particulier du temps qu'il fait, le « <i>t<sub>0</sub></i> » . . . . .	23
3.5 Paramètres prévus, méthodes statistiques opérationnelles . . . . .	23
<b>4 Perspectives et innovations en matière d'utilisation de prévisions d'ensemble</b>	<b>24</b>
4.1 Prévisions d'ensemble et activités météosensibles . . . . .	25
4.2 Indicateurs d'événements intenses . . . . .	26
4.3 Représentation en objets stochastiques . . . . .	27
<b>5 Et pour finir</b>	<b>30</b>
<b>6 Quelques sites utiles</b>	<b>31</b>
<b>7 Quelques références bibliographiques</b>	<b>31</b>

### Résumé

Lors de la réunion de 2016 du COMSI, la Direction Générale de Météo-France et les représentants du personnel au sein du comité ont souhaité que les orientations nouvelles voulues pour la production de prévisions soient examinées. Le sujet dépasse de beaucoup le cadre de la recherche à Météo-France, puisqu'il concerne des activités opérationnelles et des services, avec aussi des questions d'organisation. Une première étape a consisté à réunir, dans le cadre d'un COMSI élargi, des experts internationaux susceptibles de donner une image représentative des pratiques et des évolutions en cours en matière de prévisions opérationnelles dans des services comparables à Météo-France. La deuxième étape sera la discussion du présent document.

Les évolutions que doit mener à bien Météo-France sont assez complexes, d'autant plus que le contexte a changé et conduit à de nouvelles impulsions, ceci depuis la fin de 2017. Ces évolutions ont des implications sur le budget, les effectifs et leur répartition entre les différents métiers, les différents sites, les moyens d'infrastructures ainsi que les produits, les méthodes de travail, leur ancrage scientifique et les outils techniques associés. Seuls ces derniers aspects sont en discussion ici, avec quelques remarques sur les infrastructures de gestion de données. Les principaux objectifs de la nouvelle orientation en débat consistent à (1) réorienter le savoir-faire des prévisionnistes vers des activités à forte valeur ajoutée dans les domaines de la sécurité et des services auprès d'utilisateurs météosensibles ; (2) pour cela, fluidifier la chaîne de fabrication actuelle des produits et automatiser une production de base à faible valeur ajoutée, mais néanmoins informative, d'aussi bonne qualité que possible. Il est de plus proposé d'ancrer cette évolution en s'appuyant davantage sur des prévisions d'ensemble et des approche probabilistes.

L'atelier a confirmé que ces orientations sont déjà prises ou en voie d'être prises par les services comparables Météo-France. Le seul exemple du DWD montre (1) des prévisions d'échelle fine faites de manière probabiliste depuis qu'elles existent ; (2) la faisabilité d'une production de base automatique, qui va même très loin, plus loin que ce qui est envisagé à Météo-France, en matière d'automatisation des alertes ; (3) la réalité de l'apport d'approches probabilistes dans le cadre des services sur mesure au profit d'acteurs économiques météosensibles. L'atelier a aussi permis de vérifier que les techniques et méthodes que les ingénieurs et chercheurs concernés de Météo-France utilisent ou envisagent d'utiliser sont pertinentes, au niveau de l'état de l'art et dans certains cas, innovantes. Pour autant tout n'est pas défini, écrit, clarifié. L'atelier a permis d'identifier aussi des difficultés plus ou moins bien maîtrisées, des questions ouvertes, mais toutefois, communes ou partagées, ainsi que l'importance de pré-requis tels que (1) la formation et l'adhésion des parties prenantes (prévisionnistes, utilisateurs) ou encore, (2) du fait d'un énorme besoin en données lié à ces approches, la nécessité de bien organiser celles-ci et d'en faciliter l'accès.

Le document rappelle le contexte et son évolution. Il résume les principales idées exprimées lors de l'atelier par les groupes de travail et les invités extérieurs. Il présente ensuite les grands traits du programme de Météo-France destiné à mener à bien une première étape d'évolution, d'ici à 2021. Il se termine par un résumé des travaux de recherche en cours conduits pour servir ce programme ou destinés à des améliorations dans une phase ultérieure. Un cadre européen possible susceptible de permettre des progrès collectifs dans des services basés sur des prévisions d'ensemble est mentionné en guise de conclusion.

## 1. Introduction

À la fin de l'année 2015, Jean-Marc Lacave, président et directeur général de Météo-France, a demandé aux services concernés par la production de prévisions d'en repenser l'organisation. Cette demande était en partie fondée sur la difficulté de maintenir sur la durée les effectifs nécessaires au fonctionnement de l'organisation historique de l'établissement au détriment d'autres activités. Pour une autre partie, elle se fondait sur une analyse de la forme récente de cette organisation réalisée par le CNAM en 2014–15 « *La qualité du travail dans les métiers de la prévision* ». Cette étude de l'équipe ergonomie du *Centre de recherche sur le travail et le développement* soulignait la difficulté de faire vivre la distinction entre « prévision amont » et « prévision conseil », distinction introduite dans les dernières réformes autour d'un outil, « *Symposium* » (version 2). Sans entrer dans davantage de détails, cet outil, conçu dans un tout autre contexte, tend à couper le flux de données entre une partie automatique, dont la visualisation est le principal usage, et une partie expertisée, base de l'information envoyée vers les utilisateurs finaux, en particulier le site Internet et l'appli Météo-France. Les sens de la nouvelle organisation devaient consister (1) à mettre fin à cette coupure en adossant une partie de la production de façon plus directe aux chaînes numériques ; (2) à réorienter le travail de prévision expertisée vers le conseil, suivant en cela une des recommandations du CNAM. Ces orientations ont été traduites dans la maison, de façon un peu rapide, en « automatisation de la production », avec un a priori assez négatif. Interrogés à brûle pourpoint par la nouvelle présidente du COMSI, les représentants du personnel au sein de ce comité ont exprimé leurs inquiétudes et leurs doutes sur ces orientations. C'est ce qui a conduit à inscrire le sujet dans le programme de travail du comité scientifique. Cette démarche a reçu le soutien de Jean-Marc Lacave, désireux d'avoir l'opinion de la communauté scientifique sur celles-ci. En parallèle, la réflexion s'amorçait, et l'année 2016 a vu deux autres évolutions venir compléter la future organisation : (1) baser la production sur des approches probabilistes et, de façon cohérente avec ce choix, (2) mettre en place sur le prochain ordinateur une chaîne opérationnelle dont les éléments clés seront des ensembles, qui ne seront plus comme aujourd'hui, des annexes ou des suppléments.

L'analyse et la discussion de telles questions dépasse le cadre traditionnel du COMSI. D'une part, et à l'évidence, le service de recherche n'est pas le seul concerné. Loin d'être remise en cause, sa principale activité de transfert, la mise en place et l'évolution de chaînes de prévision numérique du temps, est appelée à se poursuivre. Le rôle de cette partie automatique par construction est destiné à s'étendre, pour aller irriguer de façon plus directe une partie de la production finalisée. Mais nombre de ces questions portent sur des aspects d'organisation, d'ergonomie, d'infrastructures qui se mêlent de manière étroite aux questions scientifiques, sans parler de la profonde orientation opérationnelle de toutes les discussions.

A sujet inhabituel, solution inhabituelle. Il a été proposé, fin 2016 - début 2017, de le traiter dans le cadre d'un atelier ouvert aux membres du COMSI qui le souhaiteraient, complétés par des participants en prise directe avec ces sujets.

Cet atelier s'est tenu les 23 et 24 mai 2017. Il a rassemblé une trentaine de participants, membres du COMSI, des services concernés de Météo-France, et d'une dizaine d'invités venus de services comparables à Météo-France (NOAA, DWD, Met Office, CEPMMT), un universitaire, un représentant de Météo Schweiz. On a compté 14 exposés présentés sur deux demi-journées. La dernière demi-journée a été consacrée à des discussions, réparties en quatre groupes thématiques, chaque participant allant dans deux des groupes : (1) méthodes statistiques de post-traitements, pour tous usages ou orienté utilisateur, vérification ; (2) extraction d'un scénario ou d'une trajectoire de référence ; (3) aide à la gestion de crise, aide à la décision face aux événements rares, tant sous le point de vue de la « vigilance » que celui des « situations de

crise spécifiques d'un utilisateur», rôle du météorologiste dans ce contexte ; (4) infrastructures techniques et scientifiques nécessaires pour tirer le meilleur parti de prévisions d'ensemble, besoins en ré-analyses, en postvisions (parfois appelées prévisions rétrospectives), existence d'alternatives en particulier pour les modèles d'échelle convective.

Depuis l'atelier, le gouvernement a lancé une révision des pratiques et du périmètre de l'action publique. Le principal ministre de tutelle de Météo-France a demandé, dans une lettre du 17 novembre 2017, à son PDG, de concevoir un nouveau «projet global d'établissement» sur la base d'une trajectoire imposée à la baisse du plafond de la subvention pour charges de service public et du cadre des effectifs. La lettre confirme toutefois les axes stratégiques du contrat d'objectifs et de performances 2017–2021, ainsi que certaines de ses ambitions. Aussi, pour le moment, en matière de prévisions, le projet d'établissement tend plutôt à renforcer les orientations prises en 2016 et 2017 c'est à dire :

- une prévision expertisée toute tournée vers le conseil, en particulier le conseil en matière de gestion de crise face à un événement météorologique intense ou à forts enjeux ;
- une production de base d'informations météorologiques automatique de bout en bout. La «production de base» n'est pas toute la production, loin de là, mais celle dont les enjeux sont, par définition, peu ou pas quantifiables, ou bien peuvent être quantifiés de façon large, globalisée par secteurs économiques. Il s'agit aussi d'une production de base centrée en premier lieu sur les conditions ressenties près de l'interface sol-atmosphère ;
- des chaînes de traitement numérique centrées de bout en bout sur la prise en compte aussi explicite que possible des différentes sources d'incertitudes, observations, hypothèses de modélisation et de numérisation, et surtout, prévisibilité intrinsèque.

Le présent document se poursuit par une sélection des principales informations recueillies lors de l'atelier, d'abord au sein des groupes de travail. Les principales idées des interventions extérieures suivent. Viendra ensuite la présentation du programme de Météo-France de mise en place d'une première forme de la nouvelle organisation de la prévision (2018–2021). Il se termine par une évocation des pistes explorées par le service de recherche, au service de ce programme ou et qui pourraient conduire à des améliorations dans le cadre des suites de cette évolution.

## 2. Vers une synthèse de l'atelier

### 2.1 Rappel de quelques notions

Une prévision numérique dite *déterministe* construit, au moyen d'une intégration temporelle, une unique séquence d'états atmosphériques futurs. Elle est censée traduire l'idéal Laplacien ou positiviste, c'est à dire que si l'état initial, le temps qu'il fait, est connu partout à un moment donné, les lois de la physique (classique) permettent d'en déduire cette séquence unique. L'expérience montre qu'en dépit de progrès parfois considérables, les erreurs sont omniprésentes. Surtout, jusque dans les années 2000, les météorologistes se trouvaient de loin en loin pris de court par l'occurrence d'une forte tempête. Encore aujourd'hui, donner à l'avance l'horaire des différentes manifestations du passage d'une telle tempête à un endroit donné reste une gageure. Et par ailleurs, les météorologistes restent à la merci de systèmes convectifs intenses qui s'organisent en très peu de temps ou encore ils sont plongés dans le doute face à deux, trois, quatre prévisions «déterministes» successives qui décrivent, par tel ou tel aspect, des futurs qui ont peu en commun.

En termes de production pour les utilisateurs de l'information, les météorologistes donnent l'apparence de communiquer «la» séquence d'évolution du temps qui, compte tenu des in-

formations dont ils disposent, semble la plus naturelle. Toutefois, parfaitement conscients des limites de cette approche, ils assortissent de longue date cette présentation d'indications nombreuses et variées, qualitatives, des incertitudes.

On peut croire, dans un premier temps, que «le progrès» viendra à bout des différentes sources d'erreurs dues à des limites technologiques : observations lacunaires et pas toujours précises, hypothèses de modélisation, effets de la numérisation, etc. De fait, les progrès enregistrés sont réels, réduire ces sources d'erreurs reste indispensable. Mais la découverte de l'existence d'une cause profonde d'erreurs, non technologique mais propre au milieu dont on cherche à prévoir l'état, a été remise cette vision en cause. Cette (re)découverte est intervenue dix ans à peine après les premières prévisions numériques du temps en 1950. Les physiciens retrouvaient des travaux de mathématique du début du 20<sup>e</sup> siècle, les étoffaient. D'où il ressort qu'il existe une vaste classe de milieux qui parcourent leur espace de phases selon une géométrie très particulière, pour le moins complexe, ce qui conduit à une conséquence pratique très simple : l'impossibilité de la prévision déterministe, sauf à la réaliser avec un modèle exact du milieu en question, à partir de la connaissance exacte de son état. Ces conditions ont les mêmes chances d'être réunies que le démon de Laplace de fournir la position et la vitesse exactes de tous les astres à l'astronome. A des régions de l'espace des phases où, quoi qu'on fasse, on aboutit à une série d'états très bien identifiés succèdent d'autres régions où, quoi qu'on fasse, un vaste éventail de possibilités très différentes se présente que seule l'observation dont on ne dispose pas encore permettra de discriminer. L'existence de tels états (ou de tels instants) de totale imprévisibilité pratique, indépendante de nos moyens technologiques, d'où vont naître (ou pas) des «*structures cohérentes*» n'a pas à être qualifiée, c'est un fait. Au passage, les météorologistes ont appréhendé le concept de structure cohérente bien avant les physiciens. Bref, l'existence de ces états à horizon de prévisibilité quasi-nul constitue la clé, le ressort, de la variabilité, la richesse d'évolution observée dans nombre de branches de la physique, la chimie, la biologie, etc.

La prévision d'ensemble est *un échantillon de prévisions constitué en prenant en compte au mieux les différentes sources d'erreurs «technologiques»*, voire dans certains cas, en essayant d'identifier l'existence de trajectoires divergentes dans l'espace des phases. Depuis bientôt 30 ans que cette orientation a été prise, beaucoup de mots ont été dits pour la justifier. Au bout du compte, il existe deux raisons fondamentales d'en faire un choix rationnel. Sur le plan historique, la première apparue est qu'on n'a pas trouvé mieux pour tenter de repérer à l'avance la possibilité de la formation et du développement rapide de telle ou telle structure cohérente, tempête, averse qui tourne au déluge, neige qui recouvre tout, etc. Toutefois, cela reste un pari difficile quand on met en regard la variabilité avec les tailles des échantillons accessibles. Mais il existe une autre raison, bien étudiée et documentée, depuis le 17<sup>e</sup> siècle : l'incertitude peut se quantifier, et dès lors qu'on en dispose, on se trouve à même de prendre de meilleures décisions. Et cela dans un sens lui aussi quantifiable. Sur ce plan, il est certain que la prévision probabiliste a le potentiel d'améliorer le service attendu de la prévision.

Le *post-traitement* est la fonction qui, dans une chaîne numérique, consiste à calculer les paramètres demandés par les utilisateurs dans l'espace qui leur convient à partir des paramètres d'état représentés dans les modèles numériques dans leur espace de discretisation. Le post-traitement est donc à la fois un *enrichissement* de la prévision numérique brute (calcul de nouveaux paramètres) et *une source d'erreurs supplémentaire* (changements d'espace impliquant une perte d'information, nouvelles approximations).

Une étape du post-traitement consiste à corriger la prévision numérique brute au moyen d'autres sources d'informations, par exemple de longues séries d'observations. Il s'agit de l'*adaptation statistique*. Elle corrige de façon effective une partie des erreurs systématiques de modélisation (biais) ainsi qu'une partie des erreurs de représentativité.

Le terme de *calibration* est utilisé pour désigner une étape un peu semblable du traitement d'une prévision d'ensemble. Il faut toutefois reconnaître que le champ couvert, dans ce cas, est plus vaste, les objectifs peuvent varier. Du coup, tant les algorithmes que les moments de les appliquer, sont divers. Dans le sens le plus élémentaire, la calibration consiste à utiliser un échantillon d'apprentissage pour imposer au moins une propriété statistique aux distributions prévues. Celle-ci est souvent la «*fiabilité*», c'est à dire l'existence d'une relation forte et simple entre probabilités prévues et fréquences observées. Mais bien d'autres types de corrections peuvent être rangés sous ce terme. Noter que le passage de la prévision déterministe à la prévision d'ensemble (1) n'élimine pas les biais du modèle sous-jacent, donc des corrections d'erreurs systématiques restent utiles et (2) il s'ajoute une toute nouvelle source d'erreur à corriger, disons liée à la forme ou la nature statistique des distributions prévues. Bref, *la calibration est une étape, ou plutôt une séquence d'étapes, indispensable à toute utilisation effective d'une prévision probabiliste.*

En effet, comme dans toute approche statistique, le besoin en données *a priori* pour tirer de réels bénéfices des prévisions probabilistes est considérable. On peut citer trois sources de telles données : les *séries temporelles d'observations*, celles de *réanalyses* et les prévisions rétrospectives ou disons plutôt *postvisions*. Les observations restent bien entendu la meilleure source de connaissance de la réalité mais elles sont lacunaires, dans l'espace comme dans le temps, elles manquent d'homogénéité. Les réanalyses peuvent être vues comme une forme très élaborée d'observation de l'évolution du réel passé, mise sous une forme très voisine de celle d'un modèle récent. Elles constituent un échantillon plus homogène (au sens statistique), avec une information homogène aussi dans l'espace. Du même coup, elles ne sont ni aussi justes, ni aussi précises que des observations, en particulier des observations in-situ. Les réanalyses sont affectées par les défauts du système d'assimilation de données utilisé pour les réaliser. Les postvisions consistent à utiliser un modèle récent pour effectuer des «*prévisions*» sur des dates anciennes. Leurs conditions initiales peuvent être soit recalculées aussi avec les observations de l'époque, plus ou moins restaurées, soit tirées d'une réanalyse. L'intérêt est qu'elles permettent d'utiliser, en tout point (pas de trou) du domaine couvert, des algorithmes d'extraction de signal au sein d'un même espace des phases, celui du modèle sous-jacent. Ceci donne une chance de neutraliser les biais de ce modèle et de réaliser des anamorphoses maîtrisées sur sa variabilité. Ce type de donnée est, par exemple, indispensable à l'utilisation de la prévision saisonnière : on attend de cette dernière une indication des anomalies par rapport à un «*climat*» de référence. Les postvisions permettent de définir ce climat. Leur réalisation, qui peut et doit balayer la plus grande variabilité connue possible, constitue désormais la part essentielle du coût tout compris (mise au point et exploitation) d'une nouvelle version.

D'une certaine manière, l'objet de l'atelier était d'une part de faire le point sur les méthodes et pratiques permettant de combiner au mieux ces différentes sources de données (prévision d'ensemble «*du jour*», observations «*du jour*», données de calibration). D'autre part, face à la double contrainte d'une inflation rapide de la quantité de données à traiter et d'une déflation non moins rapide du volume d'heures de travail pour en tirer des informations utiles, où, sur quels aspects, concentrer au mieux le temps de travail disponible pour mettre en œuvre ces méthodes et améliorer les services rendus?

## 2.2 Groupe de travail numéro 1

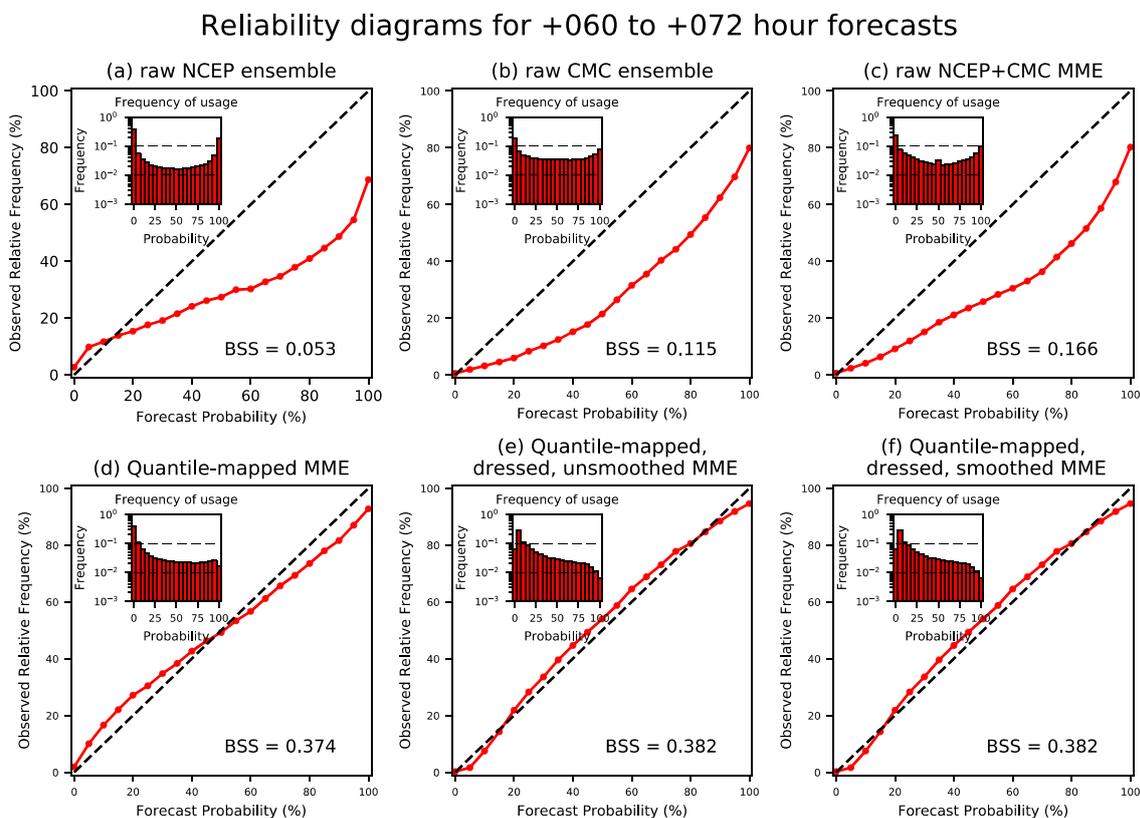
Le groupe de travail 1 se focalisait sur les méthodes statistiques à appliquer dans les situations les plus courantes, soit dans un but de prévision générale, soit au service d'un utilisateur particulier. Il devait aussi essayer d'aborder les questions de vérification, de partage de logiciels. Ces sujets sont en fait très vastes, le groupe a rapidement fait le constat qu'il y avait beaucoup à faire, dans des domaines très variés, et trop peu de ressources pour cela. Et en

particulier pas du tout assez de temps pour aborder tous les aspects au sein de l'atelier lui-même. La principale recommandation du groupe est d'encourager une approche pragmatique dans les domaines de la calibration et de l'agrégation : sous contrainte de temps, ne pas hésiter à fournir une première solution basée sur des approches simples, bien connues. Travailler en parallèle sur des méthodes plus avancées, ne remplacer la première méthode que si une valeur ajoutée de ces méthodes peut être démontrée. Face au raffinement spatial qui ne cesse de croître, la pertinence des détails qui paraissent ainsi fournis doit toujours être discutée, en particulier à mesure que l'échéance s'étend. Pour le groupe il ne faut pas hésiter à tronquer cette information de façon à extraire un signal qui dépend du paramètre et de l'échéance. Le groupe encourage le partage d'expériences, la poursuite des échanges par l'intermédiaire de listes de messagerie. Pour ce qui est du partage des logiciels, si le principe général en est excellent, en pratique, les détails techniques des plates-formes sur lesquelles ces logiciels sont mis en œuvre constituent des obstacles majeurs. Aussi, une approche possible consiste à enrichir de ses propres contributions des bibliothèques connues déjà existantes telles que *R*.

### 2.3 Groupe de travail numéro 2

Le sujet de ce groupe de travail était l'extraction d'un scénario de référence ou d'une prévision pseudo-déterministe. Un grand nombre d'utilisateurs, la plupart en fait aujourd'hui, méconnaissent les enjeux de leurs décisions météosensibles. Le choix est d'ailleurs souvent de peu de conséquences. Pour une telle utilisation, fournir une information probabiliste est

**Figure 1:** Les étapes successive de la calibration de la probabilité de précipitations sur les Etats-Unis, depuis les deux ensembles bruts, leur combinaison et le traitement statistique. Figure extraite de la présentation de T.Hamill, NOAA.



superflu : le produit à fournir doit avoir l'apparence actuelle d'une prévision déterministe, assortie le cas échéant, d'informations d'incertitudes élémentaires (intervalle de confiance, barre d'erreur voire scénario alternatif).

Une solution en apparence évidente consiste à utiliser une prévision déterministe qui serait disponible en même temps que l'ensemble. Une telle prévision est toutefois entachée d'erreurs, erreurs connues seulement par l'expérience passée. En pratique, extraire un scénario d'une prévision d'ensemble donne, sur un champ donné, un résultat plus juste : la prévision d'ensemble contient en effet une estimation de l'erreur liée à la situation en cours. De plus, identifier une telle prévision déterministe ne sera bientôt plus possible, en tout cas au sein des services météorologiques représentés à l'atelier. En revanche, le choix le plus juste pour un champ ne sera pas le même pour un autre : ce que la prévision va gagner en justesse, elle va le perdre en cohérence. Là est toute la difficulté du sujet. La discussion du groupe a tourné autour de ces points. La nécessité de disposer d'un tel scénario est reconnue de la plupart des participants, en particulier le DWD et le Met Office.

Les points suivants sont soulignés. Toutes les corrections de biais et de calibration doivent bénéficier au scénario : il sera intéressant de ne réaliser l'extraction qu'après une telle étape. Un niveau raisonnable de cohérence est celui qui permet au scénario d'être présenté, expliqué, donc compris par un prévisionniste. Il doit conserver l'allure d'une histoire que l'on peut dérouler. A ce titre, il ne peut s'affranchir de points forts de physique de l'atmosphère. Les discussions constatent toutefois la possibilité de tolérer un certain niveau d'incohérence. A l'intérieur du scénario, les éléments les moins prévisibles doivent faire l'objet d'un traitement particulier : par exemple, être rendus sous forme de zones plus ou moins floues, dotées de textures. Enfin, il y a un niveau de détail en dessous duquel on ne peut aller sans en savoir plus sur, par exemple, la sensibilité de l'utilisateur aux non-détections, ou aux fausses alertes. Ceci pose les bases d'une approche intéressante sur laquelle on reviendra, celle de l'utilisation d'objets.

### 2.4 Groupe de travail numéro 3

Ce groupe discutait d'aide à la décision en présence d'incertitude et en situation de crise, c'est à dire d'événements météorologiques intenses ou exceptionnels (au sens d'un utilisateur donné). Les participants ont considéré que, même sur un tel sujet, un scénario déterministe de base avait son utilité. De fait, la littérature disponible sur de tels sujets insiste sur le caractère essentiel du travail par scénario, une poignée d'entre eux, hiérarchisés en fonction de leur cohérence avec les informations disponibles. Le groupe a aussi pointé le danger d'introduire trop d'incohérences par excès de calibration. Enfin il s'agit d'un sujet qui pousse plutôt à favoriser la résolution spatiale au détriment de la taille de l'ensemble. L'expérience de la prévision numérique du temps, en effet, montre que l'amélioration de la résolution spatiale a été le principal facteur d'amélioration de la prévision des intensités des événements marquants/exceptionnels. Comme le développement rapide des systèmes météorologiques intenses est, presque par essence, peu prévisible, on doit reconnaître que les attentes en la matière sont contradictoires. Le groupe a formulé des recommandations très claires :

- bâtir des méthodologies d'exploration des ensembles à partir de tableaux de bord. Ceux-ci doivent donc restituer de façon simple l'existence de risques d'alerte, risque déterminé de façon algorithmique. La présentation peut se faire sous forme de tableaux, en effet, ou sous forme cartographique, orienté phénomènes. Dit autrement, même si la vigilance, dans son sens de produit d'alerte partagé par les autorités et le public, reste la production expertisée par excellence, le travail gagnera à s'appuyer sur des vigilances de travail issues d'algorithmes ;

- la barrière psychologique face à des incertitudes rendues explicites par les prévisions d'ensemble n'existe pas que chez les utilisateurs, elle existe aussi chez les météorologistes. Aussi, pour la vaincre au moins au sein de l'établissement, le groupe recommande que les développements des outils, voire des systèmes de prévisions, soit réalisée par des équipes mixtes de prévisionnistes et de scientifiques/ingénieurs. À dire vrai, c'est l'expérience directe du DWD.

De façon remarquable, ces deux propositions s'inscrivent bien dans les bonnes pratiques que l'on peut déduire de la littérature.

## 2.5 Groupe de travail numéro 4

Ce groupe se concentrait sur les implications sur le système de traitement de l'information de la nécessité de s'orienter vers la valorisation de prévisions d'ensemble. Ceci concerne la gestion des données, ainsi que le temps de calcul dès lors que des réanalyses ou des postvisions deviennent incontournables.

L'infrastructure de gestion de données est essentielle pour pouvoir exploiter la masse d'informations colossale produite par des prévisions d'ensemble. Deux concepts sont mis en avant : (1) l'administration et la gestion des données à partir de leur contenu, de manière indépendante de leur rangement physique. L'acquisition de données se fait donc en les décrivant et non plus en ayant à savoir à l'avance où elles sont et comment elles sont organisées; (2) l'évolution du calcul ayant un intense besoin de gros volumes de données vers un concept de calcul « *données-centré* » : rapprocher le plus possible le traitement des données de l'endroit où elles sont stockées ou produites, de façon à les déplacer le moins possible. La pratique actuelle consiste à faire l'inverse, collecter et transférer les données là où elles vont être traitées. Mais déplacer des données reste lent (c'est le domaine où la progression technologique est la plus lente) et coûteux en énergie. Le groupe souligne que les solutions efficaces reposent sur une combinaison indissociable de logiciels et de matériels. Le recours à des mémoires à la place de disques, en vue d'accéder rapidement aux états fraîchement calculés, à la disposition du post-traitement, est une solution qui va se généraliser. Le CEPMMT est très actif sur ces sujets. La difficulté, encore une fois, ne vient pas seulement des données qui viennent d'être produites par les dernières prévisions, ou par le besoin en observations des dernières assimilations. Elle provient aussi de la nécessité de calibration.

Pour ce qui est des données nécessaires à celles-ci, un accès simple et uniforme aux données passées comme aux dernières observations apparaît comme un minimum. Ce minimum n'est pas acquis, les données à vocation de conservation le sont souvent avec une vision « suivi du climat », avec des changements d'organisation et de format. Les centres qui pratiquent des réanalyses matérialisent de manière naturelle ce minimum, ce qui leur confère un avantage supplémentaire enviable. L'accès à des réanalyses, même si elles viennent d'ailleurs, apparaît quasi indispensable. Le groupe fait le constat que les postvisions apparaissent de leur côté, à la fois de plus en plus souhaitables et utilisées mais restent d'un coût très élevé. La possibilité d'en réaliser avec des modèles de la classe Arome apparaît éloignée. Face à ces contradictions, les approches varient. Le CEPMMT consacre ainsi une part très importante du temps de calcul de sa chaîne opérationnelle aux postvisions. La NOAA utilise pour sa part sa chaîne en double pour constituer sa base de postvisions. Le DWD réalise un an de postvisions à chaque nouvelle version de ses ensembles. Le Met Office considère que les postvisions sont trop chères pour être réalisées dans un cadre opérationnel.

### 2.6 Points forts des présentations des invités extérieurs

#### 2.6.1 Post-traitement probabiliste outre-Atlantique

Thomas Hamill (NOAA ESRL) a construit sa présentation en fonction des échanges préalables avec nous. Une première partie était consacrée aux défis que le post-traitement probabiliste doit relever. On peut le voir comme la liste des principaux pièges dans lesquels il semble difficile de ne pas tomber.

##### *la question du compromis biais-variance*

Le défi ultime autour duquel tourne la calibration de prévision d'ensemble est le compromis entre correction de biais et les estimations de variance. Un exemple simple lui permet de critiquer de façon très rude l'un des algorithmes utilisés par la NOAA, la correction de biais glissante. Il reste un message assez général : la correction de biais se paye par une augmentation de variance. Le recours à des postvisions lui semble difficile à éviter, quoique coûteux et pas si simple. Il montre par exemple qu'un changement marqué dans le système de réanalyses dont on tire les conditions initiales se propage directement aux postvisions, qui ne sont pas homogènes, même faites avec le même modèle.

##### *un produit de base peut réclamer une élaboration complexe*

T. Hamill a ensuite détaillé la palette de techniques mises en œuvre pour améliorer un unique produit simple, la probabilité de précipitations (Hamill *et al.*, 2017). Cette palette est bien large : pour la prévision d'aujourd'hui, la base est la combinaison des ensembles mondiaux canadiens et états-uniens à laquelle on ajoute : (1) les prévisions des 60 jours précédents, ainsi que (2) l'analyse de précipitations ; (3) une correction par quantile en chaque point, en augmentant la taille des échantillons avec des points voisins ; (4) un habillage de chaque membre au moyen de ses erreurs passées ; (5) en effectuant à la fin à lissage spatial. Un point clé est l'introduction de (6) localisations additionnelles : *adjoindre à chaque point de la grille finalisée* non pas un point de la grille de calculs mais *un jeu dont les caractéristiques géographiques et physiques sont très proches* (les points pouvant être très distants), toujours dans le souci d'augmenter les tailles des échantillons (*figure 1*). Cet exemple détaillé dans la présentation apparaît emblématique de la complexité d'un post-traitement, ici pour un produit de base grand public.

##### *les réflexions sont les mêmes aux Etats-Unis*

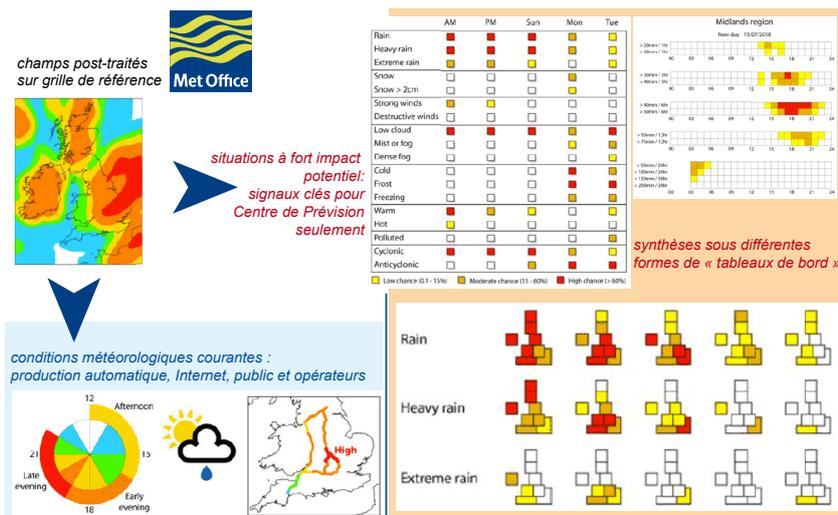
La dernière partie faisait le point sur la réflexion en cours aux Etats-Unis, qui ressemble en tous points à celle objet de l'atelier de Saint-Mandé. T. Hamill notait le besoin d'intégrer dans les équipes de production davantage de statisticiens de profession. Il a cherché à promouvoir des intercomparaisons d'algorithmes de post-traitement comme on intercompare des parties de modèles comme de modèles entiers. Il était déjà convaincu de la nécessité du calcul « donnée-centré », il aurait souhaité formaliser des échanges de logiciels.

##### *description d'une chaîne de traitement probabiliste systématique*

Zoltan Toth (NOAA ESRL) représente une vision assez différente de problèmes très proches. Son sujet est la mise en place d'un cadre approprié pour un traitement basique mais massif. Il conçoit un traitement centralisé dont les données peuvent ensuite être utilisées soit pour des usages locaux, soit pour des utilisateurs spécialisés. L'ambition est bien de produire des prévisions automatiques, mais l'exposé indique que le cadre laisse la possibilité d'une intervention des prévisionnistes. Cette intervention est censée permettre d'agir sur des données déjà modifiées, sous forme de distributions, sur une base de données à six dimensions, abstraite et complexe. Le cadre se présente par ailleurs comme un jeu de six boîtes à outils :

(1) calibration des variables pronostiques des modèles (avec des analyses); (2) calcul des variables diagnostiques avec les variables modèle corrigées; (3) fabrication de réanalyses de ces variables utilisateurs; (4) constitution de la base de données 6D sans couture (grille de sortie finale unique). Une des dimensions reste celle des ensembles, élément par élément; (5) l'éditeur permettant l'intervention; (6) le service d'accès. Le cœur algorithmique est le «*processeur d'ensemble Bayésien*». Il s'applique à toutes les variables continues (température, vent, etc), au moyen de distributions paramétrées, de transformées et utilise des données climatologiques comme information *a priori*. Les ajustements sont des régressions linéaires multiples. Il n'y a pas eu de résultats et d'évaluation montrées en séance, mais des publications en contiennent : voir plus loin «*quelques sites utiles*» pour un lien. Cette présentation a le mérite de montrer l'ensemble des ingrédients nécessaires aux post-traitements probabilistes. Une particularité intéressante des méthodes promues par Z. Toth est l'utilisation des analyses comme outil de calibration, de débiaisage en particulier.

**Figure 2:** Illustration de la dernière étape de la chaîne de post-traitement du Met Office. Les différentes étapes de traitement donnent des champs prévus et calibrés sur une grille de référence, distincte de celle des modèles donnant les données brutes. Différentes productions automatiques en sont tirées, soit destinés à une grande diffusion ou des utilisateurs extérieurs, soit destinés à aidé les prévisionnistes à gérer les situations «*à forts impacts*». D'après la présentation de N. Roberts, Met Office.



**distinguer deux types d'erreurs – potentiel des ensembles pour l'hydrologie**

Gilbert Brunet (ECC Canada et membre du COMSI) a consacré une part importante de son exposé aux post-traitements des prévisions déterministes, qui dominent encore la production de ECC, comme d'ailleurs à Météo-France aujourd'hui. Il insiste sur l'intérêt de distinguer les erreurs de modélisation des erreurs de représentativité. L'approche générale est de corriger les prévisions en des points où des observations sont disponibles, puis de spatialiser les corrections. G. Brunet a ensuite montré le potentiel des ensembles mondiaux sur l'exemple des crues du Saint-Laurent début 2017. Les plans d'ECC pour post-traiter les prévisions d'ensemble comprennent des corrections de biais basées sur des postvisions, des corrections de quelques autres moments statistiques en essayant des techniques publiées suivies d'une restitution sous forme d'échantillons ou d'éléments d'ensemble par «*Ensemble Copula Coupling*». ECC dispose d'une bonne expertise sur la technique de «*moyenne Bayésienne de modèles*» (BMA en anglais) pour combiner différents modèles ou différents ensembles (Wilson *et al.*, 2007). Il termine en mentionnant l'existence d'un forum actif sur le post-traitement entre ECC, NOAA

et Met Office. Ce forum concrétise échanges et questions par une téléconférence trimestrielle commune.

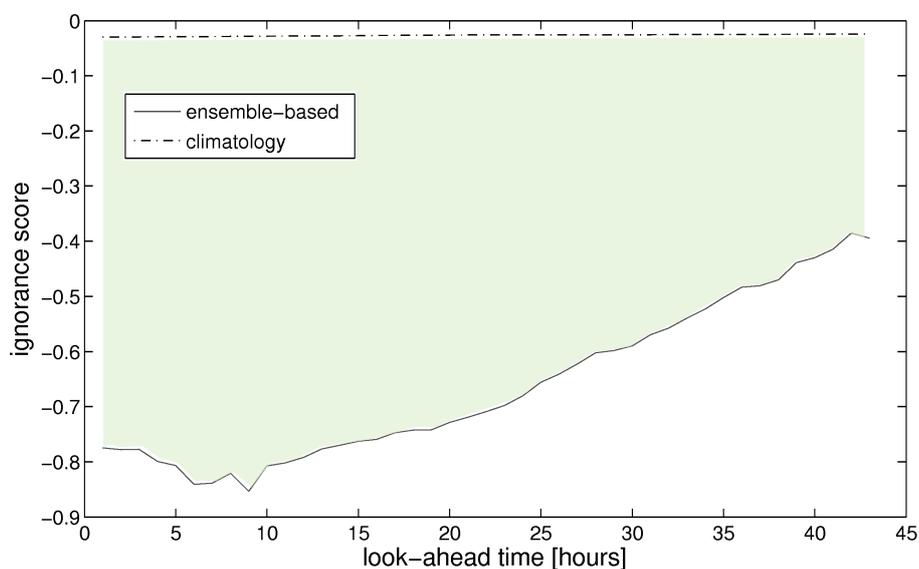
### 2.6.2 Post-traitement probabiliste outre-Manche et Mer du Nord

Marion Mittermaier et Nigel Roberts (Met Office) ont pris l'initiative de proposer une refonte de la chaîne de post-traitement du Met Office en 2016. Cette initiative a été acceptée sous la forme du projet *IMPROVER*, qui doit conduire à arrêter les traitements actuels en 2020 (Roberts and Mittermaier, 2016).

#### *autre vision d'une chaîne de traitement probabiliste systématique...*

N. Roberts a bien résumé le contexte actuel de la production au Met Office, qui se lit aussi bien appliqué à Météo-France. D'une part, la quantité d'informations produite par des chaînes numériques à fréquence croissante dépasse les capacités d'analyse humaines. D'autre part, les prévisions à mailles kilométriques présentent un paradoxe : d'un très grand réalisme apparent, la plupart des détails sont faux dans une comparaison point à point. L'approche probabiliste apparaît ainsi comme le moyen à la fois de *lisser les détails peu exploitables* et de *synthétiser l'information*. Une claire distinction est aussi faite entre des avertissements de sécurité bien situés et justifiés, à côté de prévisions locales automatiques, utiles (informatives), de mises à jour fréquentes pour terminaux mobiles. Les principales idées du projet sont les suivantes. (1) pour une date donnée dans le futur, utilisation de toutes les prévisions numériques (enfin, celles du Met Office) qui atteignent cette date ; (2) opérations effectuées sur une grille de post-traitement spécifique, distincte des grilles propres des modèles utilisés ; (3) les

**Figure 3:** Evaluation de prévisions de production d'énergie éolienne sur un échantillon de 5700 cas, au moyen de « l'ignorance », en fonction de l'échéance. L'ignorance, score introduit par Roulston et Smith (2002), est à peu près la quantité d'information binaire qui sépare l'information a priori évaluée de l'observation. Cette quantité se mesure par un logarithme. Si on ne dispose d'aucune information a priori, l'ignorance est 0. Meilleure est l'information a priori, plus faible est l'information à communiquer, plus négatif est son logarithme. L'apport de la seule information climatologique pour prévoir la production d'énergie est très faible. En revanche, une méthode statisco-dynamique utilisant une prévision d'ensemble du vent améliore nettement les prévisions. La surface verte indique le gain mesuré par cette métrique. D'après l'exposé de P. Pinson, DTU



opérations sont réalisées de manière séquentielle, par un logiciel modulaire écrit en Python, adossé à toutes les ressources disponibles dans cet environnement. Le côté traitement systématique, séquentiel, à sources multiples coïncide avec la vision présentée par Z. Toth; (4) les combinaisons de différentes sources (prévisions mondiale et d'échelle convective, disons) se font dans l'espace des probabilités; (5) point clé, chaque étape du traitement est l'objet de scores et de vérifications. La fabrication d'une partie des produits finis est la dernière étape du traitement et elle est intégrée au projet. Une partie de cette production est destinée aux prévisionnistes en charge des alertes (figure 2). Elle prend la forme de *tableaux synthétiques* résumant les risques identifiés de façon automatique à partir des ensembles, destinés à guider leur exploration de ceux-ci.

### ...dont chaque étape est évaluée

M. Mittermaier est entrée dans quelques détails des vérifications. Les métriques envisagées sont doublement hiérarchisées entre « essentielles », « souhaitables » et « utiles » ainsi qu'en « pertinent pour améliorer les systèmes » et « pertinent pour les utilisateurs ». En particulier, dans le contexte britannique, les financeurs publics de l'Office. Il est remarqué que les métriques essentielles pour le suivi du système reposent sur l'existence d'échantillons sous forme d'éléments (ou membres) identifiés : on retrouve le besoin de passer d'éléments à des distributions puis de revenir à des éléments. Il faut aussi pouvoir comparer ensembles et prévisions « déterministes » (Mittermaier and Csima, 2017). L'utilisation de voisins ou de voisinages est importante. Des scores novateurs seront essayés. En revanche, côté utilisateur, il est davantage visé la simplicité et la mesure des améliorations sur le long terme.

### prévision probabiliste de production éolienne

Pierre Pinson, chercheur à l'université technique du Danemark, représentait à lui seul les utilisations pratiques de la prévision probabiliste dans des domaines économiques concurrentiels météosensibles. Les services météorologiques nationaux sont encore bien timides sur ce qu'il faut bien appeler des marchés, lesquels développent leurs propres solutions innovantes — c'est à dire probabilistes. Comme dans ces services même, la culture de l'utilisation d'échantillons de prévisions atmosphériques est minoritaire devant celle de l'utilisation de modèles statistiques. Il n'est donc pas trop tard. P. Pinson et son équipe mettent au point des modèles d'aide à la décision dans le domaine de la production d'énergie éolienne. Il a d'abord rappelé la diversité des questions qui se présentent : loin de se limiter à prévoir une puissance prévue proposable à différentes échéances par une ferme éolienne, les mêmes informations peuvent servir à *estimer le besoin en production complémentaire*, en réserve de sécurité, à estimer *un besoin de stockage*, à choisir *une stratégie d'offres* (dans un marché ouvert et interconnecté) ou encore à *planifier des opérations de maintenance*. Il rappelle qu'il faut pouvoir, sur le plan méthodologique, faire feu de tout bois, en fonction de l'aspect à prévoir : distributions statistiques ou bien trajectoire prévue ou scénario ou encore indice de risques. Son exposé détaille ensuite la construction d'un modèle de prévision de production éolienne pour une ferme en Mer du Nord. Comme bien documenté par ailleurs, le modèle de décision ne consiste pas à fournir des distributions de vent, mais à trouver le nombre de MW à mettre sur le marché à une échéance donnée. Cette puissance est un quantile de la distribution de puissance produite, déterminé par les caractéristiques du marché (les « coûts de régulation »). Une première étape est de construire la courbe de puissance de la ferme. Comme dans la plupart des autres exposés, l'étape clé est celle de la calibration, ici clairement tournée vers obtenir la fiabilité statistique des puissances produites prévues. Il utilise, dans l'exemple montré, une technique d'habillage de noyaux Gaussiens, qui limite le nombre de paramètres. Le modèle a aussi une dimension d'auto-adaptation dans le temps (ou de récursivité). En définitive, dans ce travail comme dans d'autres, *un avantage net est démontré en faveur de l'utilisation de prévisions d'ensemble* sur

des méthodes purement statistiques (*figure 3*) (Pinson, 2013). Les pistes d'amélioration et de développement apparaissent nombreuses. Un des points les plus éclairants de cet exposé a été laissé dans l'ombre, comme dirait le M. le maire de Champagnac. Il s'agit de la prévision d'ensemble atmosphérique à la base de l'étude. Il s'agit d'une prévision de 75 éléments, disponible toutes les 6h, produite par une société appelée «WEPROG». Cette société germano-danoise a été fondée en 2003, et elle vise à alimenter en données le marché de l'énergie. Son site Internet donne l'image d'une entreprise dynamique, offrant un service permanent à ses clients et d'une société qui se développe : elle a commencé par une prévision d'ensemble à domaine limité, et propose désormais des prévisions sur le monde entier. Elle a aussi investi dans la gestion de données, facilitant entre autres les opérations de calibration. Surtout, la description du modèle sous-jacent est plus que minimaliste («prévision d'ensemble multi schéma»), avec un vocabulaire météorologique daté, ancien. Ce qui suggère deux choses : (1) les difficultés rencontrées par l'équipe de P. Pinson seraient peut-être moindres si elle s'appuyait sur un bon modèle atmosphérique ; (2) l'idée, pour les services météorologiques nationaux, de s'investir dans ce type d'activité continue d'étonner, d'interpeller, de questionner nombre de collègues de tous niveaux hiérarchiques. Ceci devient peu compréhensible : ce marché existe, il fait vivre du monde. Dans un domaine stratégique, l'énergie, où l'orientation vers la production renouvelable ne cesse de s'affirmer, donc dont la météorologie devient un facteur clé, il est au contraire absurde de ne pas voir là le domaine dans lequel investir pour l'avenir, tant par la valorisation naturelle des ensembles qu'en termes de nouveaux services.

La grande majorité des exposés présentés se voulait applicative, centrée sur les post-traitements à réaliser dans tel ou tel but. Tous montrent (1) de significatives extractions de données et des calculs complémentaires à partir d'une prévision d'ensemble récente ; (2) ainsi qu'une recherche, parfois frénétique, de données encore plus nombreuses, observations, prévisions passées, indispensables pour construire et valider les méthodes ou produits décrits. Une production de services basée sur des prévisions d'ensemble démultiplie à la fois la fabrication et l'utilisation d'énormes quantités de données, qui ne sont pas que météorologiques. Un seul exposé été consacré à ce sujet d'infrastructure, *les techniques de traitement de l'information adaptées à la gestion d'un tel flux de données*.

### *le défi majeur de la gestion des données*

Il a été présenté par Tiago Quintino du CEPMMT, car le Centre planifie de façon assez quantitative l'évolution de son activité, et il investit à l'avance sur ce qu'il identifie comme des défis techniques. *Le défi à 10 ans du CEPMMT sur les données est de recevoir et d'archiver au moins 10 fois plus d'observations, 2000 fois plus de variables d'état par pas de temps, 25 fois plus de produits à calculer sur le chemin critique, 100 fois plus de données à conservation perpétuelle à archiver et 30 fois plus de données à envoyer aux pays membres*. Tout cela autour d'une puissance de calcul qui croitra de manière plus modeste, autour de 30 fois plus. Ceci a de quoi provoquer l'émoi de tout ingénieur. Le défi de la gestion des données dépasse celui du calcul. Le CEPMMT a donc lancé une série de projets, certains internes, certains dans le programme cadre Horizon 2020. Deux au moins sont centrés sur le flux de données et les post-traitements : *NextGenIO* et *Hermes*. L'exposé de T. Quintino a évoqué surtout le premier. Il envisage trois familles d'approches : les «magasins d'objets», le «calcul donnée-centré» et le «flux de données à traitement dynamique». Tous présentent au moins une dimension en rupture avec les pratiques actuelles du Centre, en grande rupture avec celles de Météo-France. Par exemple, l'approche qui commence à être assez publicisée de réaliser les calculs au plus près des données suppose de laisser des composantes de programmes des utilisateurs, en quelque sorte entrer dans la base de données.

### les solutions associent logiciels et matériels

Il faut de plus être conscient que le CEPMMT bâtit sur une fondation extraordinaire, son archivage administré : *les données sont obtenues en les décrivant, sans savoir ni où elles sont rangées, ni comment elles le sont.* Du coup, leur organisation physique est une affaire interne à l'équipe d'archivage. De plus, *le même mode d'accès s'applique à toutes les natures de données, observations, prévisions anciennes, postvisions, etc.* Beaucoup de services, dont Météo-France, ont encore à faire ce saut, qui n'est pas gratuit. Que ce soit ce type de gestion d'archivage ou les techniques de post-traitement, il s'agit de combinaisons étroites d'investissements matériels et logiciels : développer l'un en ignorant l'autre conduit à l'échec. Parmi les nouvelles technologies envisagées par le Centre, les grandes mémoires ultra-rapides (« NVRAM ») semblent destinées à jouer un grand rôle dans la future architecture du post-traitement probabiliste.

### 2.6.3 Post-traitement probabiliste outre-Rhin

Le grand intérêt d'une participation du DWD à l'atelier découle du fait que ce service a développé directement une prévision d'ensemble pour couvrir l'échelle convective à courte échéance : à cette échelle, le DWD n'a pas envisagé de réaliser de prévision déterministe. Du coup, ce service dispose d'une véritable expérience dans ce domaine, commencée en 2010, avec des réalisations opérationnelles depuis 2012. Le DWD a aussi fait le choix, à l'occasion du re-développement complet de ses systèmes mondiaux, en coopération avec les instituts Max-Planck et les universités, de se doter d'une prévision d'ensemble mondiale propre, plutôt que de continuer d'utiliser la prévision d'ensemble du CEPMMT ou une collection de prévisions déterministes mondiales.

#### aller loin dans la génération automatique d'alertes

Une dimension particulière de l'utilisation des méthodes statistiques et probabilistes par le DWD étaient exposées par Reinhold Hess : *la génération d'alertes météorologiques automatiques*, comme base des différents produits d'alerte diffusés par le DWD. Au passage, R. Hess a signalé que le DWD produisait les prévisions normalisées par l'OACI et l'OMM sur l'aéroport (message TAF) de façon automatique, ainsi que divers produits combinant prévision d'ensemble et observations. L'approche « *AutoWARN* » a d'abord été conçue à partir d'une combinaison de prévision diverses, très diverses même, avec un traitement en deux étapes : adaptations statistiques de chaque prévision utilisée, puis construction d'une « combinaison optimale ». La production est réalisée sur des points donnés et sur une grille indépendante à résolution de 1 km. Au sein de ce cadre, les ensembles sont incorporés à travers une filière propre (« *EnsembleMOS* »). Les variables d'état utiles aux alertes sont corrigées au moyen de régressions linéaires. Les probabilités de franchir des seuils sont, de leur côté, corrigées au moyen de régressions logistiques. Un objectif est de rétablir la fiabilité statistique des distributions des paramètres clés des alertes. Comme évoqué dans d'autres exposés, il est nécessaire de mettre en œuvre tous moyens d'augmenter la taille des échantillons de calibration pour contrer la rareté des événements météorologiques intenses. Ainsi, tout l'historique des prévisions passées de l'ensemble d'échelle convective est utilisé (*SIC*). Des regroupements de données de stations sont opérés, etc. Un aspect original consiste à utiliser des observations de radars elles-mêmes calibrées par des données pluviométriques, comme données de calibration/spatialisation. Les tailles de certains échantillons, ceux liés aux précipitations, sont agrandies au moyen d'une approche de type Monte-Carlo des précipitations ponctuelles, confrontées à des observations et aux modèles (Kriescher *et al.*, 2017). Autre aspect à noter, les indications d'alertes automatiques sont accompagnées d'une *prévision de l'erreur de prévision* des paramètres clés. Le processus d'alerte, ceci dit, passe par des prévisionnistes : les alertes automatiques sont des propositions. Les prévisionnistes déterminent les zones et les niveaux d'alerte en combinant

et modifiant la mosaïque des zones brutes proposées. Le système automatique adapte ensuite les déclinaisons d'alertes à ce zonage de référence.

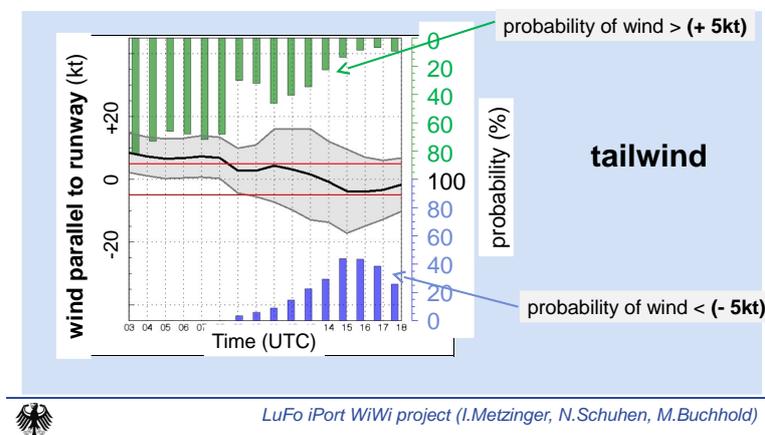
### une évaluation sur une période de tempêtes

Une évaluation sur près de deux mois marqués par des tempêtes a été montrée. L'apport des prévisionnistes sur les rafales et coups de vent, en termes de bonnes détections et de fausses alertes, n'apparaît pas très net. Les différences sont plus marquées sur les cas vraiment extrêmes : les prévisionnistes réduisent de manière significative les fausses alertes, mais du coup, ils perdent quand même un peu en détection. D'une manière générale, dans ce bilan, le rapport fausse alerte sur détection apparaît bien élevé. L'exposé montrait aussi que la transition d'une version de modèle à une autre cause une perte de qualité des adaptations statistiques, que, même avec des moyens (un an de postvisions), il était difficile d'éviter, quoique possible d'amortir.

Suzanne Theis, dans un exposé très suivi, a entrepris de montrer un éventail d'applications de prévisions probabilistes réalisées au DWD. Elle a évoqué des applications dans les domaines de l'aéronautique, de la production d'énergie éolienne, de l'hydrologie et enfin de la visualisation à l'usage des prévisionnistes.

**Figure 4:** Le produit d'aide à la décision de prévision du changement de direction du vent conduisant à renverser le sens d'utilisation des pistes d'un aéroport. Ce produit utilise la prévision d'ensemble d'échelle convective du DWD, la direction du vent fait ensuite l'objet d'une calibration statistique. Ce document est utilisé en tour de contrôle. Figure extraite de la présentation de S.Theis, DWD.

### COSMO-DE-EPS for airport management



### chaque problème demande une solution qui lui est propre...

Ces exemples ont aussi été choisis pour illustrer la diversité des types de questions abordées : répondre à des choix à faire tous les jours (plusieurs fois par jour), comme estimer la production éolienne, jusqu'à fournir des éléments de décision en vue de faire face à des événements à fort impact pour certains utilisateurs, sans être en rien exceptionnels du seul point de vue météorologique. Les cas de l'utilisation de prévisions d'ensemble atmosphériques comme données d'entrée d'autres modèles, au sein ou à l'extérieur du DWD ont aussi été évoqués. Sur le plan des méthodologies statistiques, chaque problème doit être regardé avec un œil neuf, la littérature scientifique pertinente consultée pour fournir un point de départ. A partir de là, une solution adaptée va commencer d'être construite. S. Theis a ainsi bien montré que certaines utilisations ont besoin de données statistiques déduites de l'ensemble, qui sont en-

suite calibrées au moyen, redisons-le, de méthodes diverses, faisant appel à une large palette. Mais d'autres utilisations ont besoin d'éléments (ou membres) calibrés, c'est à dire non pas d'une distribution (ou de quelques moments d'une distribution) mais un échantillon de trajectoires temporelles *calibrées*, soit pour corriger des défauts systématiques propres aux modèles sous-jacents, soit pour que l'échantillon présente des propriétés statistiques choisies.

### ...ce qui réclame de la souplesse dans les traitements systématiques

Dans le même esprit, S. Theis montre que, dans une chaîne de traitement décomposée en grandes étapes que l'on retrouve dans tous les domaines, *non seulement la méthode, mais aussi l'étape à laquelle appliquer les traitements statistiques varient d'une application à une autre* : directement sur l'échantillon brut ou au contraire, uniquement sur le diagnostic spécifique de l'application. Comme l'a montré Th. Hamill sur son exemple détaillé, il faut se préparer à construire la méthodologie pas à pas. L'application concrète d'une méthode, même si elle paraît fonctionner, n'a en général pas tous les effets voulus ou a des effets secondaires peu souhaitables : il faut alors réfléchir à une nouvelle étape.

### dialogue et pédagogie sont essentiels

Enfin, l'exposé de S. Theis faisait ressortir une autre idée importante : le dialogue avec l'utilisateur. Il doit être basé sur une écoute réelle et assez d'ouverture d'esprit pour pouvoir recommencer un développement depuis le début en fonction des réactions à une première proposition. Ainsi, l'exemple aéronautique détaillé portait sur le renversement du sens d'utilisation des pistes d'un aéroport. Du point de vue des utilisateurs, il s'agit d'un événement « à fort impact », du fait que, pendant un moment, il faut interrompre atterrissages et décollages et réorganiser tous les circuits de vols à basse altitude. Sur le plan météorologique, il s'agit juste de vent qui tourne. La première idée du DWD n'a eu aucun succès. La bonne solution a été trouvée par une équipe pluridisciplinaire, composée d'un météorologiste, d'un(e) mathématicien(ne) et d'un géographe. La présence de ce dernier a été déterminante pour établir le dialogue entre le DWD et le contrôle aérien sur l'aéroport. Le mathématicien a conçu une méthode statistique en sortie de modèle originale, destinée à calibrer une direction (*figure 4*) (Schuhen *et al.*, 2012). Là aussi, on retrouve sur un cas réel un point de l'exposé de Th. Hamill, recruter des statisticiens. Il en est allé de même avec les produits de visualisation pour les prévisionnistes : l'acceptation et la prise en compte des prévisions d'ensemble progressent en matérialisant des propositions, en recueillant les réactions et en développant une nouvelle version ou une toute autre approche à partir de ces réactions. C'est ainsi qu'a émergé la présentation des phénomènes prévus par l'ensemble sous la forme de « confettis » : un élément de l'ensemble = une couleur, appliquée lorsque un seuil (de précipitations, de rafales) est dépassé. Ceci conduit à un intérêt du DWD pour d'éventuelles représentations sous forme d'objets, approche sur laquelle nous reviendrons. S. Theis a aussi indiqué que l'intérêt des utilisateurs professionnels pour des informations probabilistes croissait.

## 2.7 Synthèse

Revenons tout d'abord sur les points à l'origine de l'atelier :

- les réflexions sur l'évolution des métiers des prévisionnistes ont aussi lieu dans d'autres services. Dans certains, cette évolution est lancée : les prévisions à l'échelle convective sans autres sources que des ensembles au DWD ; dans un tout autre domaine, celui des services, les expérimentations du Met Office en vue d'accompagner ses clients dans de nouvelles utilisations de l'information météorologique riche offerte par les ensembles, les prévisions multiples en général. Des séminaires et des ateliers un peu semblables à celui de Saint-Mandé, ou étendus aux prévisionnistes, ont eu lieu ou étaient programmés,

par exemple aux Etats-Unis. Les traces qu'on peut en retrouver indiquent que là aussi, *il s'agit de rediriger l'expertise des prévisionnistes vers le conseil en les déchargeant de la production de base*;

- la génération automatique d'une telle production de base de prévisions météorologiques est déjà en œuvre dans des services comparables à Météo-France, avec ou sans possibilité d'intervention des prévisionnistes ;
- production de base et services, déjà existants et en voie d'être améliorés ou nouveaux en voie d'introduction, apparaissent de plus en plus associés à une démarche probabiliste : au-delà des limites de la prévisibilité intrinsèque, l'approche probabiliste se présente aussi comme un moyen de synthétiser de nombreuses informations, telles que des prévisions répétées soit dans le temps, soit sous forme d'ensembles, soit d'origines diverses. Ainsi là où une production automatique existe déjà, celle-ci est adaptée, voire refondue, dans un cadre probabiliste ;
- les algorithmes statistiques que met en œuvre Météo-France ou que Météo-France prévoit de mettre en œuvre dans ses projets d'évolutions sont au niveau de l'état de l'art ;
- plusieurs des aspects méthodologiques mis en œuvre ou prévus d'être mis en œuvre par Météo-France dans une chaîne toute automatique existent aussi dans de telles chaînes au sein d'autres services. On peut citer par exemple l'utilisation d'une grille de sortie de référence, à très forte résolution, et en tout cas indépendante des sources de données utilisées ;
- les décisions ultimes sur les alertes restent humaines, mais en revanche, on assiste au développement d'outils d'aide à la décision spécifiques : indicateurs de pré-alerte automatiques, parfois très poussés, tableaux de synthèse, certains semi-cartographiques.

Des exemples concrets, vécus par des services comparables, sont venus renforcer les différents messages documentés dans la littérature grise :

- *en matière d'algorithmes probabilistes, il n'y a pas d'approche universelle* : chaque problème doit être regardé pour lui-même, la solution adaptée, construite par tranches ou couches successives. Il en résulte un besoin de profils de mathématiciens et de statisticiens, souligné par plusieurs interventions de l'atelier.

La bonne approche ne relève pas toujours des statistiques : la gestion de situations de crise a plutôt besoin de méthodologie et de bonnes solutions ergonomiques ;

- il en découle *un énorme besoin en données*. Bien sûr, les prévisions numériques les plus récentes fournissent le point de départ. Ceci tend déjà à constituer un volume significatif. Mais il est nécessaire de compléter ce jeu par tous moyens possibles : incorporer des formes de la réalité, de son passé, de son présent avec des observations ; de corriger les défauts des modèles sous-jacents grâce à l'historique de leurs prévisions ; de se situer par rapport au climat propre de ces modèles au moyen de postvisions. Un autre thème récurrent gros consommateur de données est la recherche de tout moyen d'agrandir les différents échantillons, soit de l'historique de prévisions, soit de l'historique d'observations, soit les deux. Ceci s'impose encore plus dès lors qu'on travaille sur des phénomènes un peu intenses ;
- pour un Etablissement comme Météo-France, qui dispose déjà d'un grand nombre de données diverses, tirer parti de cet avantage potentiel suppose d'aller le plus loin possible, le plus vite possible, vers *le développement d'accès universels à ces données, ainsi que vers leur gestion administrée*. Ce besoin en données ne concerne pas que le développement de futurs services dans des domaines très diversifiés, il concerne aussi leur production ;
- *la prise en compte des attentes, du contexte propre de l'utilisateur doit être réelle*. La simple

adaptation d'un produit générique ne suffira pas, même si elle peut servir de point de départ. Ceci implique écoute, patience ainsi qu'une capacité à recommencer.

Pour pouvoir espérer jouer un rôle dans les décisions à forte valeur ajoutée, une relation de confiance devra s'établir. En effet, les méthodes probabilistes ne donneront toute leur puissance qu'en intégrant des données propres à l'utilisateur. On parle des données qui quantifient le cœur de son activité, il tendra donc à les juger confidentielles. Ceci suppose des adaptations d'organisation (par exemple, pour garantir la confidentialité des services rendus à des concurrents ou des agents économiques liés par une relation commerciale), ainsi que du temps ;

- ces mêmes idées s'appliquent au travail des prévisionnistes sur les questions de sécurité c'est à dire la vigilance : grand besoin de données de calibration, réflexion méthodologique, écoute mutuelle entre prévisionnistes et développeurs.

Dans ce cas et le précédent, le sujet présente une *importante dimension pédagogique* afin de permettre à tous de se saisir de l'information contenue dans l'incertitude ;

- des exposés de l'atelier ont mis en évidence *des attentes insatisfaites* d'utilisateurs traditionnels de la météorologie, tels que l'aéronautique, auxquelles des approches probabilistes apportent de nouvelles réponses. Ces exposés confirment aussi *l'existence de marchés où le potentiel des prévisions d'ensemble est démontré et re-démontré*. L'insertion réelle de ces méthodes dans les processus concernés est encore à faire, tant du côté des services météorologiques que des acteurs de ces marchés : il n'est pas trop tard.

L'atelier a aussi mis en évidence un certain nombre de questions ouvertes :

- dans les domaines où elles existent, les postvisions apparaissent comme un excellent outil de calibration. Toutefois, leur production est très coûteuse. Leur trouver des alternatives, en particulier aux échelles convective, reste en suspens ;
- plusieurs des interventions de l'atelier ont évoqué le besoin de disposer d'un scénario de référence, question qui se pose aussi à Météo-France. C'est un autre sujet qui est apparu très ouvert, sur lequel on progressera sans doute en allant de l'avant et en échangeant les expériences. Noter que, d'une façon plus large, déduire quelques scénarios représentatifs d'un ensemble est à la fois une méthode connue d'anticipation d'épisode « à fort impact » et quand même pas si simple à faire.

### 3. La nouvelle organisation de la production de prévisions à Météo-France : le programme 3P

L'évolution de la production des prévisions de Météo-France ne se limite pas, loin de là, à des questions scientifiques et techniques. Il s'agit avant tout de questions de métiers et d'organisation à l'échelle de l'établissement. Cette partie tente de résumer la démarche entreprise par Météo-France, mais, COMSI oblige, elle se concentre sur les aspects techniques et scientifiques.

#### 3.1 Les projets de 3P

Cette évolution est coordonnée par un programme appelé *3P* pour *Programme Prévision Production*. Et non pas *Prévisions par Post-traitements Probabilistes*, qui en sera une (petite) partie et non pas le tout, ceci pour illustrer les limites du présent résumé. Ce programme est supervisé par un comité de pilotage présidé par A. Soulan, directeur général adjoint. Il est porté surtout par la direction des opérations pour la prévision (DIROP), dirigée par F. Lalaurette et

par la direction des services météorologiques (DSM), dont le responsable est J.M. Carrière. Ses liens avec la recherche sont donc un peu indirects.

Le programme 3P est décomposée en trois projets :

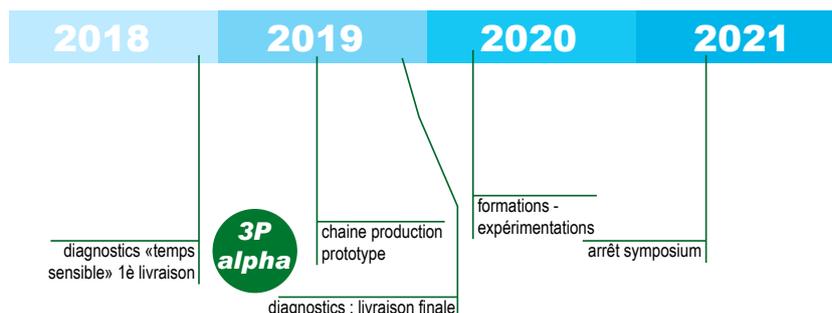
- le projet *Alpha* doit produire organiser les données de prévision de référence, faciliter leur accès pour diverses utilisations et contrôler la qualité de ces données. Ces données de prévisions de référence seront de nature probabiliste, élaborées de manière algorithmique à partir de la production numérique brute, celle propre de Météo-France, celle du CEPMMT et d'autres sources publiques. Le projet Alpha est dirigé par L. Gonard (DIROP/MPA/D);
- le projet *Omega* conçoit la nouvelle organisation, recentrée sur le conseil et l'utilisation des données produites par Alpha. Il organise la transition à partir de l'organisation actuelle. Un objectif technique clé du projet est l'expression de ce qu'on appelle le « *cadrage* ». Il s'agit d'un *scénario* (où d'un petit nombre de scénarios) qui exprime, en partie de façon graphique, en partie par du texte, la vision de référence de l'évolution du temps de Météo-France. Comme son nom l'indique, il s'agit du cadre météorologique à l'intérieur duquel les explications des choix proposés aux utilisateurs seront fournies, puis adaptées aux enjeux propres à chacun d'eux. L'élaboration du cadrage est aussi une étape essentielle dans l'élaboration de la vigilance, une production qui restera expertisée. Le projet Omega est dirigé par J. Nicolau (DIROP/PG/D);
- le projet *Prose* repense *l'offre de produits et services*, tout en devant assurer la continuité de la production actuelle sur la base de ce que donne le projet Alpha. Il se focalise sur les différentes catégories d'utilisateurs professionnels, avec lesquels il noue des contacts assez étroits. Il devra ensuite aider à l'évolution du métier en matière de prévisions conseils. Le contact avec nombre d'utilisateurs acteurs économiques est surtout assuré par la direction des services météorologiques et le projet est dirigé par S. Guidotti (DSM/DA) qui en fait partie.

Ces projets portent sur les productions propres de Météo-France, au titre de services publics ou pour son activité commerciale. L'Etablissement a par ailleurs des obligations de *mise à disposition* de ses données brutes. Celle-ci permettra à des acteurs privés de développer aussi produits et services à partir des mêmes prévisions numériques.

### 3.2 Principes de la nouvelle chaîne de production

Le fonctionnement visé a fait l'objet d'une concertation qui a débouché, voici quelques semaines, sur un document qui présente les principes de la nouvelle chaîne de production. Il décrit la terminologie, les données et fonctionnalités et enfin les activités et rôle des acteurs.

**Figure 5:** Les grandes étapes du projet Alpha, qui sont aussi des jalons majeurs du programme 3P.



Ce document a été rédigé par J. Nicolau, G. Leleu (responsable du service de prévision de la direction régionale nord-est), S. Guidotti et L. Gonard. Ce texte continuera d'être discuté au fil de l'année 2018.

La terminologie précise la distinction entre « *données de production* » et « *produits finalisés* », déjà connue et introduit surtout la notion de « *valeur privilégiée* » d'un paramètre, « *valeur optimale pour le grand public* » d'un paramètre produit sous forme de distribution. Les formes que peuvent prendre ces dernières font l'objet d'une normalisation minimale. Des domaines et des fréquences dans le temps caractérisent les données (3 types de domaines, 2 fréquences temporelles sur une période allant de  $J-2$  à  $J+14$ ). Il est aussi précisé que les principales données produites par le projet Alpha décrivent de manière synthétique *le temps ressenti*, perçu en un point donné, à moment donné : temps sensible donné par un symbole, ses différentes composantes (nuage, précipitation, visibilité), la température « sous abri », le vent « à 10 mètres », le cumul de précipitations (*figure 6*). Des services d'accès permettront de visualiser des données de production, d'en extraire en vue de mises en forme algorithmiques comme ébauches pour des produits affinés ensuite d'une façon ou d'une autre.

A partir de ces données de référence, des exemples types de production destinées à sortir toutes faites d'algorithmes sont les informations semi-graphiques du site et de l'appli Météo-France, les « atmogrammes » ainsi que les bulletins du kiosque. Dans ce dernier cas intervient une génération automatique de texte lu. De nombreuses composantes de ces algorithmes existent déjà, c'est en pratique leur point de départ qui change, comme on le verra plus loin.

La liste des productions qui continueront de faire l'objet d'une expertise humaine est bien plus étendue. Elle est, à vrai dire, sans limite, compte tenu de la richesse des données de base d'origine numérique. Il faut citer la vigilance et de nombreux bulletins liés à des questions de sécurité, les bulletins liés à des situations particulières et les prestations de haut niveau dans le cadre de contrats.

Les rôles des acteurs ont évolué vers la *supervision* des données de production, une possibilité de *correction limitée* aux questions de cohérence avec la vigilance et aux cas de valeurs aberrantes. La *surveillance continue* du temps en métropole et outre-mer se poursuit. Prévisionnistes du Centre National de Prévision et des régions co-construisent un « *scénario expert* » issu du suivi continu du temps et des prévisions numériques : c'est le cœur du cadrage déjà évoqué. Les scénarios alternatifs sont possibles. Le cadrage peut aussi être *amendé* au fil du temps.

Dans le domaine du conseil, l'*appropriation* du scénario expert et des domaines de production associés reste de mise. A partir d'ébauches déduites des données de référence, *certaines produits seront fabriqués* par les prévisionnistes eux-mêmes. Comme des exemples en ont été montrés au cours de l'atelier, le conseil pourra conduire à assister un utilisateur dans des situations à enjeux pour lui (une situation atmosphérique « ordinaire » pour le météorologiste, à « fort impact » pour cet utilisateur). Une activité un peu nouvelle consistera à *accompagner la diffusion* de la production automatique (commentaires, explications, traduction dans le contexte de l'utilisateur, etc), c'est à dire là aussi une forme de conseil.

### 3.3 Calendrier et cible technique principale

Le calendrier de mise en œuvre répond aux fortes contraintes extérieures qui s'imposent à Météo-France : il doit tenir dans le contrat d'objectifs en cours, qui va jusqu'en 2021. Les ambitions méthodologiques doivent s'adapter à cette contrainte. Un objectif des trois projets est de parvenir à une chaîne prototype vers la mi 2019. Cette chaîne pourrait être modifiée, ajustée jusque début 2020. L'année 2020 sera consacrée à son déploiement, aux formations nécessaires. Tout ceci pour pouvoir retirer du service une des composantes du système de

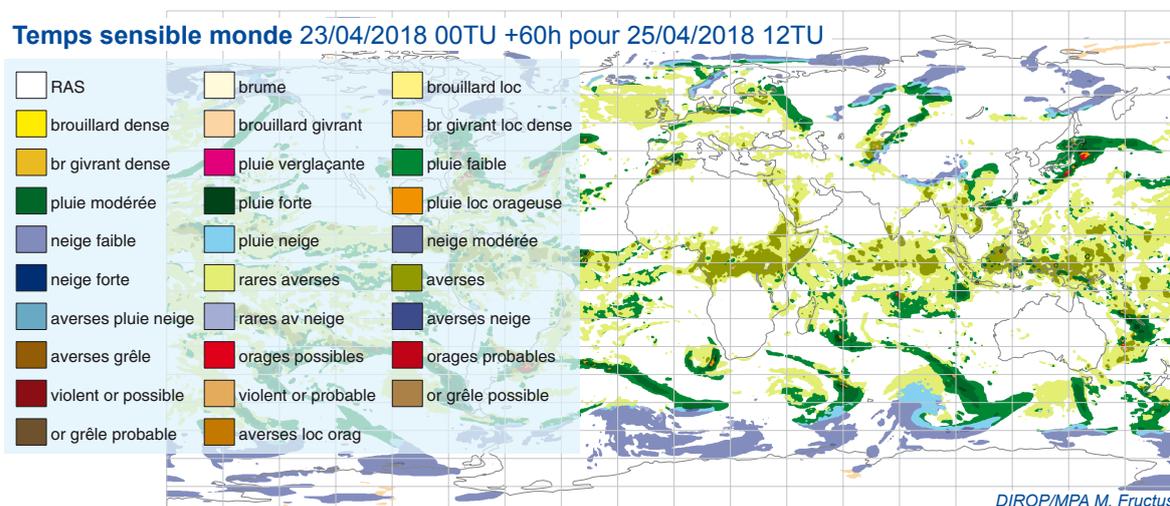
production actuelle, le logiciel « Symposium » déjà évoqué, au cours de la première moitié de 2021.

Une des difficultés du programme est qu'il existe à Météo-France un grand nombre de bases de données, de composants techniques, de logiciels qui ne peuvent pas tous être redéfinis ou redéveloppés. Les observations, une petite partie de la production numérique, une partie de la production expertisée sont rangées dans des bases de données relationnelles, sous des formes très normalisées. Mais distinctes. Les produits pour l'extérieur sont définis à partir de « *composants de données productibles* », de format lui aussi très normalisé, et sur lesquels de nombreux logiciels actuels sont bâtis. Météo-France développe aussi un puissant et complexe logiciels de visualisation, *Synopsis*. Il développe de plus un logiciel d'aide à la production et à sa gestion, *Métronome*. En dépit de certaines des limites de cette infrastructure technique — par exemple, la très faible partie de la production numérique normalisée dans la base de données « modèles », le système actuel fonctionne. La normalisation poussée des différentes composantes permet d'affronter la durée avec un peu de sérénité (continuité temporelle, compatibilité ascendante). Le programme 3P, dans un délai très contraint, doit donc cibler avec soin ses priorités dans les éléments techniques à remplacer. Il se doit aussi de permettre, de faciliter si possible, la poursuite des évolutions.

Une façon de résumer le principal objectif de 3P, en termes de cadre technique de production est la suivante. Dans cet ensemble de logiciels, Symposium crée une césure entre données numériques brutes d'une part et produits d'autre part : pour simplifier de façon caricaturale, les premières sont étudiées par le seul prévisionniste, surtout par visualisation. Celui-ci crée alors, plus ou moins à la main, la base de données sur laquelle se branche toute la production vers l'extérieur. Laquelle, à partir de cette étape là, est de nouveau déjà très automatisée.

L'objectif, en particulier celui du projet Alpha, est de mettre fin à cette césure et de réaligner cette base centrale des données de production au moyen de post-traitements de données numériques brutes. Ceci établira une continuité des flux d'observations et de prévisions numériques vers le conseil. Ce dernier sera décliné et segmenté pour mieux répondre aux questions météosensibles des utilisateurs. Il en découle que l'activité remise en cause par cette évolution n'est pas le métier de prévisionniste en général : c'est ce travail de saisie et d'ajustement manuel de la base de production. C'est donc là que les informations obtenues au cours de

**Figure 6:** Un exemple de réalisation du projet 3P/Alpha : une détermination du temps sensible prévu sur le monde. Figure de M. Fructus, DIROP/MPA.



l'atelier vont avoir une première application possible. Elles serviront aussi les suites de moyen terme du projet Prose de développement de la production pour les activités météo-sensibles à impact économique.

### 3.4 Cas particulier du temps qu'il fait, le « $t_0$ »

Dans l'élaboration des données de production essentielles par le projet Alpha, un soin particulier est apporté à la représentation du temps qu'il fait, le «  $t_0$  ». D'une part, il faut en donner une couverture mondiale aussi réaliste possible, d'autre part, là où des données très fines sont disponibles sur les conditions locales, il faut les utiliser. Les chaînes numériques, celles qui, à partir de l'assimilation de données, donnent une description homogène et quantitative du temps, livrent cette image beaucoup trop tard pour qu'elle soit utilisée dans ce contexte : plusieurs heures après celle qui les date.

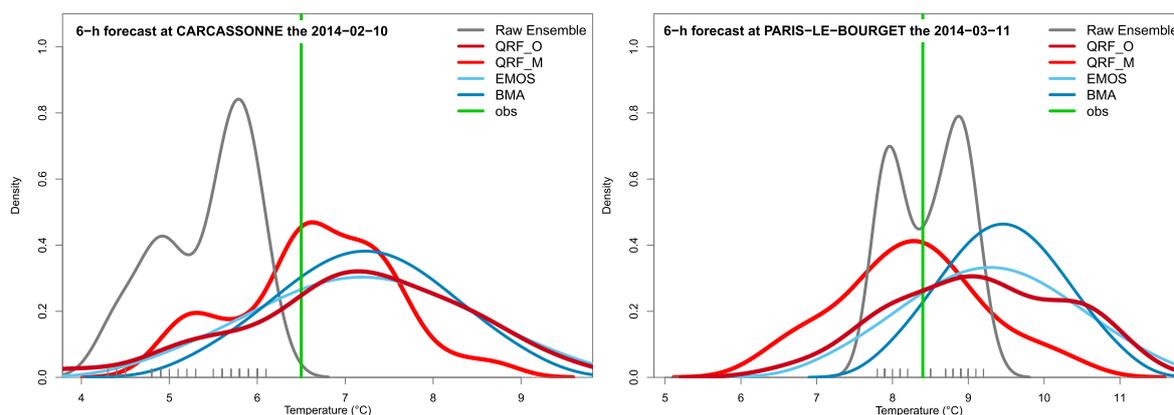
On vise en effet une quasi instantanéité. Des algorithmes particuliers seront donc mis en œuvre ici. La télédétection est susceptible de fournir une information de base mondiale (couverture nuageuse, zone de précipitations, etc). Puis, on raffine partout où c'est possible. La principale technique mise en œuvre est la fusion de données : la combinaison de moyens d'observation très divers, *télédétection*, *mesures directes*, quelques extraits choisis de prévisions récentes. Tout ceci doit aller très vite, et conduire à une mise à jour très fréquente du «  $t_0$  ». Une source appelée ainsi à jouer un rôle croissant est *l'observation participative*. Météo-France a lancé une initiative dans ce domaine, qui se révèle plutôt efficace : la transmission d'un « *temps sensible* », à choisir dans une palette prédéfinie. Ce type de concept, assez facile à maîtriser par un humain, devient vite très compliqué s'il est exprimé sous forme d'algorithme. On pourrait aussi envisager d'utiliser des données participatives concentrées dans des bases telles que NetAtmo ou WOW. Cette partie du projet fait l'objet d'une coopération avec la Direction des Systèmes d'Observation et avec la division Prévision Immédiate de la DIROP.

### 3.5 Paramètres prévus, méthodes statistiques opérationnelles

Au-delà, il s'agit d'utiliser les prévisions numériques pour produire les distributions et les valeurs privilégiées de la base Alpha de production. Les principales activités sont les suivantes :

- élargir la diversité des paramètres sortis de chaque prévision individuelle. Il s'agit *d'élaborer des diagnostics* à partir des variables d'état des modèles. Ce type de travail fait beaucoup appel à des notions de physique de l'atmosphère. Il est surtout conduit au CNRM et au GMAP ;
- réaliser un premier niveau de traitement probabiliste afin *d'obtenir des distributions (ou autres formes) prévues* de ces paramètres, anciens et nouveaux : il s'agit de passer des valeurs individuelles à la vision que peut en donner un ensemble, celui-ci étendu, le cas échéant, à plusieurs sources de prévisions numériques ;
- réaliser, chaque fois que possible, un deuxième niveau *probabiliste de corrections statistiques*, soit sur les paramètres dans leur version « déterministe », soit sur les échantillons issus des ensembles. L'équipe DIROP/COMPAS/DOP dirigée par O. Mestre conçoit, à ce jour, l'essentiel de ce travail. Dans le futur, des travaux de ce type devront être réalisés sur les produits à destination professionnelle, ainsi qu'illustré par plusieurs exposés de l'atelier.

Celui-ci a permis de vérifier que les techniques mises en œuvre ou explorées ou envisagées par cette équipe DOP sont au meilleur niveau international. La base de la production de l'équipe est la correction de paramètres prévus par *adaptation statistique* là où des séries d'observations sont disponibles. Des techniques de régressions, linéaires ou non, paramétriques



**Figure 7:** Exemples de distributions de températures « sous abri » prévues à très courte échéance par la prévision d'ensemble Arpege calibrées par différentes méthodes. En gris, les distributions brutes, l'échantillon d'origine est représenté par les petits traits aux bords. La barre verticale indique l'observation. Les courbes de tons bleus montrent l'effet de méthodes « classiques » de calibration statistique. Les courbes de tons rouges résultent de deux variantes de méthodes de forêts aléatoires appliquées à des quantiles. Ces dernières présentent plusieurs avantages, comme de permettre de représenter des distributions plus riches que les méthodes classiques, qui « gaussianisent ». D'après Taillardat et al, 2016.

ou non, sont utilisées. La méthode est choisie en fonction des caractéristiques du paramètre. L'équipe s'est aussi donnée les moyens de *spatialiser les résultats des adaptations statistiques*. Par essence en effet, les adaptations sont effectuées en un jeu de points où des séries de données existent. L'équipe utilise pour cela un algorithme en deux temps : une étape de *projection géomorphologique par régression*, suivie d'une étape d'*ajustement par fonctions splines*. Cette spatialisation se fait sur une grille de référence kilométrique, à l'image de plusieurs autres services présents à l'atelier. Sur la même grille, le vent est traité par régression par blocs.

En matière de calibration de prévision d'ensemble, une thèse remarquable a exploré une méthode innovante de *régression par forêts aléatoires sur des quantiles*, sur des prévisions de température et de force du vent en particulier (figure 7). Cette méthode rétablit la fiabilité des distributions prévues, comme les méthodes classiques d'adaptation statistique d'ensemble. Mais elle a aussi la capacité d'éviter la « gaussianisation » des sorties et de pouvoir préserver des possibilités de multi-modalités (Taillardat et al., 2016). Cette approche, appliquée aux précipitations, peut faire l'objet d'extensions qui permettent d'améliorer, parfois beaucoup, la résolution statistique. L'équipe est attentive à éviter le syndrome biais-variance évoqué au début de l'atelier. Un autre axe de travail est *l'agrégation*, c'est à dire la production d'une valeur prévue d'un paramètre comme la température, meilleure que toutes les autres estimations numériques qui entrent dans le processus (prévues par des modèles très variés) . Un objectif de l'équipe dans le cadre du projet 3P/Alpha est de rendre opérationnelles les meilleures de ces techniques et leur application à de nouveaux paramètres, comme la visibilité.

#### 4. Perspectives et innovations en matière d'utilisation de prévisions d'ensemble

Les quelques lignes qui suivent évoquent des travaux effectués au CNRM, en particulier au sein de l'équipe RECYF du GMAP dirigée par Ph. Arbogast. Il n'est pas certain que les contraintes multiples du projet 3P permettent une intégration du fruit de ces travaux pendant la durée de vie du projet : cela pourrait intervenir dans les suites. A ce moment-là, de plus, les

évolutions envisagées dans la prospective calcul de 2016 seront en cours de mise en œuvre. Elles mettent la prévision d'ensemble au centre de la production numérique brute. La prévision d'ensemble reste perçue comme un complément d'information apporté aux modèles les plus fins. Au mieux, flotte dans l'air aujourd'hui, l'idée qu'on pourrait faire plus. Sur le prochain calculateur, la distinction actuelle entre Arome et un ensemble Arome ou d'Arpege et un ensemble Arpege sera effacée.

L'équipe RECYF du GMAP porte une grande partie des développements des prévisions d'ensemble et elle en assure les évolutions opérationnelles. En plus, elle s'investit depuis plusieurs années dans leurs applications. Ce paragraphe aborde ainsi les thèmes suivants : (1) les utilisations de prévisions d'ensemble dans les activités météosensibles ; (2) le développement d'indicateurs de risques météorologiques, susceptibles de s'intégrer dans une évolution de la méthodologie du cadrage et de la vigilance ; (3) l'élaboration d'une approche alternative à la représentation numérique de l'information et de l'incertitude associée, sous forme de « *d'objets stochastiques* ».

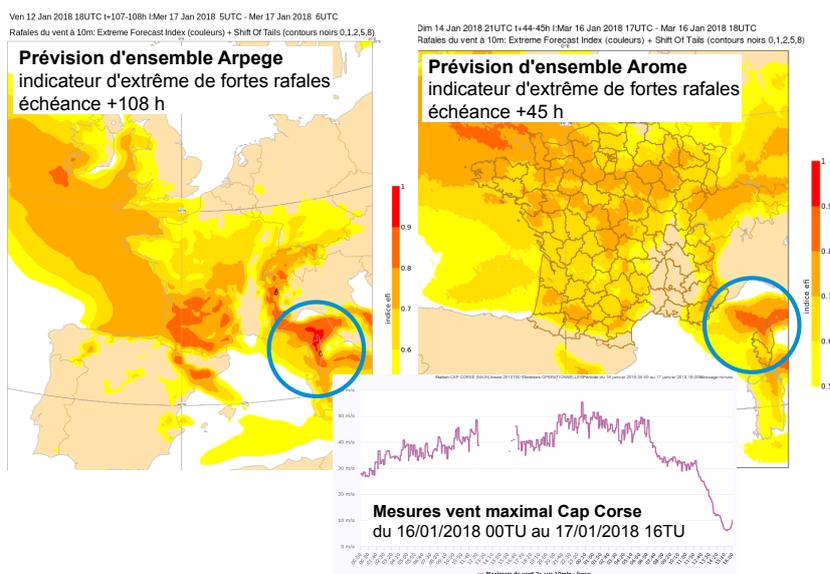
#### 4.1 Prévisions d'ensemble et activités météosensibles

L'utilisation effective de toutes les informations apportées par des prévisions d'ensemble a fait l'objet de stages, de thèses, certaines en cours, ainsi que de contrats. Sur ces sujets comme celui de nouveaux diagnostics pour le projet 3P/Alpha, d'autres équipes que RECYF interviennent.

Ainsi, dans le groupe de recherches sur la méso-échelle, et de longue date, l'enchaînement de prévisions d'ensemble atmosphériques avec *des prévisions hydrologiques* a été étudié. Il existe d'ailleurs une application opérationnelle, qui combine la prévision d'ensemble du CEPMMT au modèle hydrologique de grands bassins Modcou. Ces systèmes contenaient, en temps réel, des signaux utiles à la veille des crues des affluents de la Seine en mai 2015, qui sont restés dans l'ombre : c'est caractéristique de la place de la prévision d'ensemble à l'époque. Au sein de ce même groupe, F. Bouttier s'efforce d'associer les prévisions d'ensemble d'échelle convective du DWD, du Met Office et de Météo-France dans la confection d'une série de diagnostics composites « sans coutures » au service de l'aéronautique (Beck *et al.*, 2016). Il s'agit d'un contrat dans le cadre du programme SESAR de refonte du contrôle aérien en Europe. F. Bouttier élabore un indicateur de risque d'orages pour le projet Alpha, et, à l'écoute des prévisionnistes, évalue des changements possibles de la prévision d'ensemble Arome et de ses sorties (par exemple, Raynaud et Bouttier, 2016).

L'équipe RECYF a aussi abordé un sujet aéronautique, avec des crédits de SESAR, mais plutôt pour les compagnies aériennes. Il s'agissait d'étudier les possibilités d'*optimisation des temps de vol* et de consommation sur des trajets transatlantiques. Il est caractéristique, et sain, que les recherches sur les applications soient cofinancées par les organismes utilisateurs de l'information météorologique. C'est le cas de deux autres thèses. L'une se déroule dans un partenariat entre CNES, ONERA et Météo-France. Il s'agit de prévoir, au moyen de la prévision d'ensemble Arpege, l'atténuation de la propagation des ondes électromagnétiques entre la surface et des satellites en orbite géostationnaire. Au-delà, il s'agit de prévoir *le débit de télécommunications* possible pour assurer, par exemple, un service Internet par satellite, en modulant codage et puissance sur un ou plusieurs satellites à échéance de +24 h environ. Ce sujet comme ceux sur l'aéronautique illustrent l'existence d'applications qui ne sont pas couvertes par les seules conditions atmosphériques proches de la surface, trop souvent considérées comme les seules utiles. Une autre thèse associe l'INRA et Météo-France avec un cofinancement digit-AG et ACTA (les Instituts techniques de l'agriculture). Elle porte sur l'association d'une prévision d'ensemble atmosphérique avec *des modèles de culture* pour effectuer des prévisions d'*opportunité de trai-*

*tement raisonné* de maladies ainsi que des prévisions de *besoins en irrigation*. Deux modèles de maladie, de la vigne et du blé, sont considérés. L'irrigation s'intéresse aussi à la vigne ainsi qu'aux maïs. Dans les domaines clés de l'énergie, les choses apparaissent plus difficiles. Un stage de Master a eu lieu, avec un soutien et des données de RTE, autour de *la production photovoltaïque* sur deux départements. Des clauses de confidentialité d'une très grande rigueur ont été imposées par RTE sur les données de production photovoltaïque fournies, dont une partie des méta-données a été enlevée, et donc sur les résultats. GMAP/RECYF et DIROP/DOP ont participé plusieurs années de suite au montage d'un projet ANR visant le défi « énergie », sans succès.



**Figure 8:** Indicateurs d'événements extrêmes, en l'occurrence, de l'intensité des rafales du vent à 10 m, calculé respectivement par la prévision d'ensemble Arpege (PEARP) et la prévision d'ensemble Arome (PEARO). Dans les deux cas, les échéances les plus longues sont montrées, c'est à dire les premières fois où ces systèmes atteignent la date de l'épisode de vent violent qui a touché le nord de la Corse en janvier 2018. Un signal net et bien localisé est fourni. Les mesures du vent au Cap Corse complètent cette figure. Les indicateurs sont calculés et rendus visualisables par l'équipe RECYF. Les observations ont été tracées par (l'excellent) outil VisuObs de la DSO.

### 4.2 Indicateurs d'événements intenses

L'autre axe d'activités vise la meilleure utilisation des prévisions d'ensemble au sein de Météo-France, au service de la détection de risques météorologiques. Pour cela, l'équipe RECYF développe la production d'indicateurs, par ailleurs bien connus, en sortie des prévisions d'ensemble Arpege et Arome. Il s'agit de l'*indicateur d'événements extrêmes* (EFI en anglais) ou du *décalage de la queue de distribution* (SOT). Le principe de ces indicateurs repose sur la mesure des écarts de la prévision du jour avec le climat du modèle sous-jacent. Toute la difficulté est de calculer ce climat : c'est là qu'interviennent les postvisions évoquées dans la première partie. Le CEPMMT consacre à ce calcul une part importante de sa chaîne opérationnelle. Ceci est hors de portée de Météo-France. Tout le travail ici consiste donc à *trouver des alternatives aux postvisions* telles que les pratique le CEPMMT.

Pour la prévision d'ensemble Arpege, il est tenté de construire ce climat, une fois par an, au moyen des réanalyses ERA-intérim. Pour la prévision d'ensemble Arome, pour le moment (et comme au DWD), ce sont les archives opérationnelles qui sont utilisées. Quelques

innovations ont été introduites dans ces calculs, par exemple en tenant compte aussi d'observations : les franchissements de seuil passés sont connus, et peuvent compléter la calibration des indicateurs (Boisserie *et al.*, 2016). Ces derniers prennent la forme de champs (*figure 8*), mais la visualisation peut être poussée jusqu'à une ébauche de carte de vigilance. Il ne s'agit pas d'aller très loin, en tout cas pas aussi loin que le DWD en matière d'automatisation des alertes. Il s'agit d'attirer l'attention des prévisionnistes sur les différents risques que la dernière livraison de prévisions conduit à envisager. Ce type d'indicateur peut aussi prendre la forme d'un tableau de bord : quelle que soit la forme, elle ne donne qu'un point de départ pour analyser les prévisions plus en profondeur. Une autre originalité du travail de l'équipe RECYF est de tenir compte, de différentes manières, des observations effectuées après le lancement des prévisions. Elles peuvent servir à pondérer les trajectoires, par exemple, ce qui va modifier les informations statistiques. Dans toutes ces méthodes, les tailles des échantillons peuvent être augmentées par l'utilisation de réalisations successives, avec un effet bénéfique assez systématique sur le plan statistique.

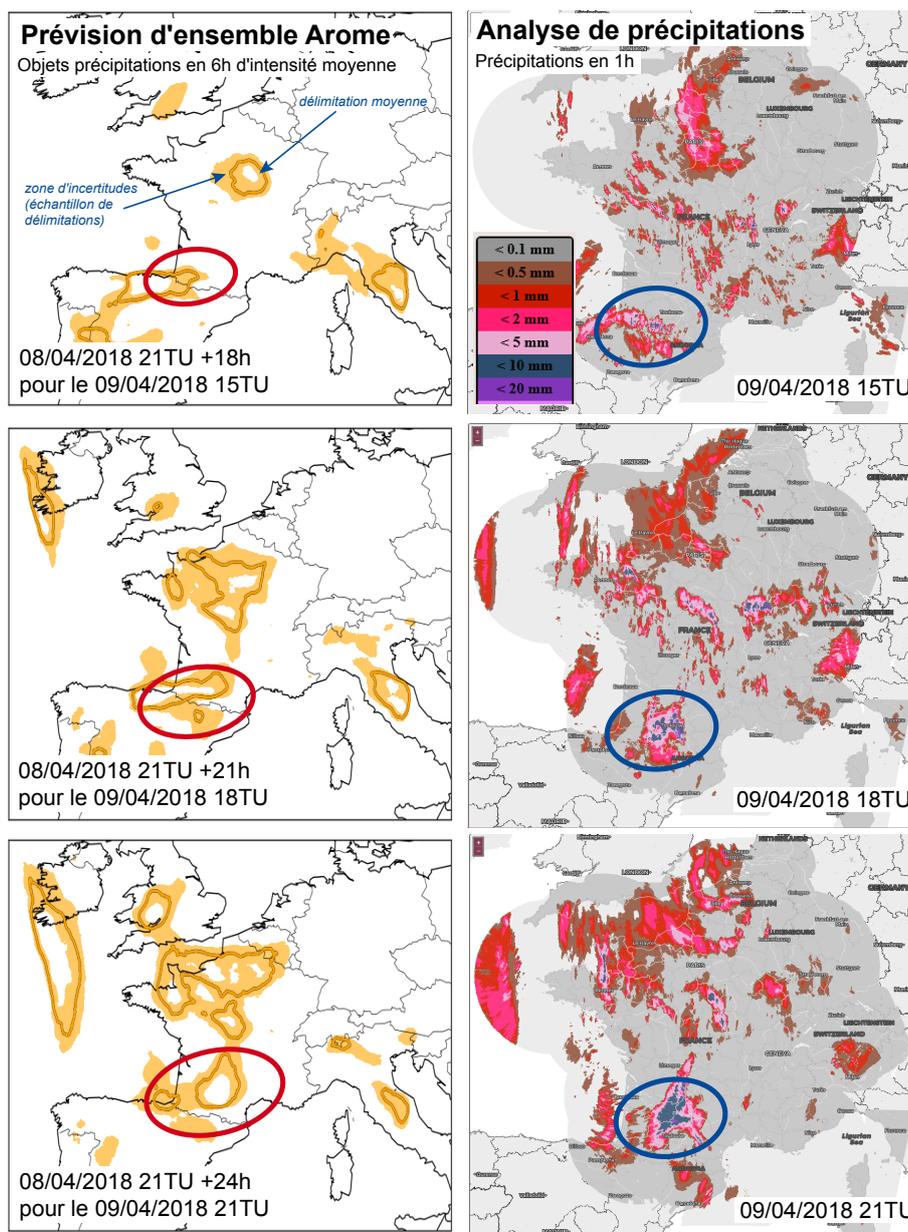
### 4.3 Représentation en objets stochastiques

L'approche la fois la plus innovante et la plus prometteuse sur laquelle travaille, depuis plusieurs années, l'équipe RECYF traduit les sorties des modèles, individuels ou ensembles, sous la forme « d'objets stochastiques ». Plutôt que de représenter la prévision sous la forme de valeurs en des points d'une grille fixe, la situation est traduite, de façon algorithmique, sous la forme de zonages mobiles aux contours flous. Parmi les idées présentées par des membres de Météo-France lors de l'atelier, cette approche fait partie de celles qui ont le plus attiré l'attention des visiteurs extérieurs. Le potentiel de cette approche est considérable. Elle permet à la tradition du métier de météorologiste de se fondre dans la modernité des notions de prévisibilité et de structure cohérente, de physique des systèmes dynamiques. Voyons cela.

La tradition tout d'abord. Depuis le début des années 1920, les prévisionnistes du tout jeune Office National Météorologique représentent leurs prévisions du temps pour le lendemain (et plus tard pour les jours suivants) sous la forme d'un zonage du territoire. Chaque zone correspond à un type de temps, une combinaison d'état du ciel, de plafond, de précipitations ou de visibilité. Ce document graphique a traversé toutes les mutations de la prévision. Il continue d'exprimer le cadrage évoqué plus haut. Cette notion de zonage est incorporée dans le logiciel Symposium lui aussi déjà évoqué, chaque zone étant numérotée pour permettre son suivi dans le temps. Mais elles restent dessinées « à la main » (plutôt à la souris), tels des concepts intuitifs non modélisables. On délimite ainsi un simple paramètre, mais on peut aussi représenter une combinaison de plusieurs d'entre eux. On peut associer une zone à une véritable structure cohérente atmosphérique, comme le système nuageux d'une dépression ou un front. Mais une zone peut aussi représenter une région qui contient de nombreuses (petites et intermittentes) structures, telle l'alternance de cumulus plus ou moins gros, plus ou moins espacés : c'est alors la *texture* formée par les nuages et l'air clair qui est considérée comme caractéristique du temps de cette zone.

Les objets stochastiques reprennent toute la richesse de ce type de zonage graphique en ajoutant deux éléments : (1) la détection et la détermination des bords, leur représentation mathématique sont automatiques. C'est la modernité technique ; (2) la dimension d'incertitude est incorporée à leur représentation. C'est la modernité physique des systèmes dynamiques. En effet, loin de démentir une telle vision du milieu atmosphérique, cette dernière encourage à centrer l'analyse sur l'existence de structures cohérentes. Leur genèse et leur croissance rapide présente une faible prévisibilité, qui découle au fond, de leur variabilité. Autour de l'émergence possible d'une telle structure ou objet, l'évolution du système (ici le temps) va être commandée par la forme, la position, l'intensité et la vitesse de déplacement de la ou

**Figure 9:** Un exemple, pris au hasard d'une situation pluvieuse active récente, de la définition floue et de l'évolution d'objets « précipitations d'intensité moyenne » fabriqués à partir de la prévision d'ensemble Arome lancée le 08/04/2018 à 21TU, pour la journée du 9 (à gauche). Les objets sont détectés, représentés de manière mathématique et ici tracés de façon entièrement algorithmique. Les bords flous, en couleur plus claire, traduisent la présence de « particules » bordant une possible zone de précipitations, les particules étant ici des contours. Un « contour privilégié » est ajouté, en l'occurrence pour le moment appuyé sur la probabilité de 50%. Le risque de développement d'un système précipitant sur le sud-ouest, avec sa dynamique et des extensions incertaines est bien rendue, et correspond à un développement qui a en effet eu lieu. Figure produite en temps quasi-réel issue du travail de L. Rottner, M. Riverain, M. Destouches, L. Raynaud, Ph. Arbogast, P. Raynaud de l'équipe RECYF. Les observations, à droite, proviennent de l'analyse et du site Antilope de la DSO.



des structures cohérentes. C'est cela, en définitive, qui fera que les distributions locales de paramètres auront tel ou tel caractère.

Bref, le potentiel des objets stochastique porte sur les aspects suivants : (1) un mode de représentation des prévisions plus proche que la représentation par champ de la représentation graphique si répandue, presque naturelle, par zones. A partir d'un objet suivi dans le temps, il est facile d'en tirer aussi bien une traduction en pictogramme, local ou par zone (comme sur le site de Météo-France et d'autres) qu'une traduction plus animée, aux zones plus chargées d'images, comme dans certains bulletins télévisés ; (2) plusieurs informations d'incertitudes sont ainsi traduites de façon graphique, à travers le flou des bords des objets : leur existence même (s'il n'existe pas de zone centrale vide de contours), leur forme, leur position. Une séquence de tels objets informe sur leur déplacement, leur déformation et les incertitudes associées (*figure 9*). Il est donc aussi possible de traduire, en un point donné, ces incertitudes de structure en distribution d'un paramètre. Ou bien *d'appliquer un seuil de décision* pour délimiter les zones de façon franche en fonction de la sensibilité des utilisateurs au passage de l'objet ; (3) les objets permettent d'aborder des questions de cohérence des prévisions. C'est à dire de respecter, en dépit de corrections et de modifications, des relations inter-paramètres fortes (présence de nuages s'il pleut, etc). Au sein d'un modèle numérique de bonne qualité, la cohérence physique est maximale. Mais dès lors qu'on commence à post-traiter différents champs de façons différentes, on met à mal cette cohérence. Cette difficulté est au cœur des discussions sur l'extraction du scénario privilégié de 3P. Respecter ou rétablir cette cohérence est très difficile sur des représentations de champs sur grille. Encore plus avec des distributions. Les objets donnent une chance de meilleure efficacité. Voire, avec des objets multi paramètres (plus proches d'une véritable structure cohérente), ils peuvent assurer de maintenir une partie de cette cohérence par leur définition même ; (4) les objets permettent des corrections assez faciles, par déplacement, par déformation des bords ou encore en modifiant la propriété d'intensité ; (5) les objets matérialisent bien mieux que sur une grille les limites des prévisions, qui sont avant tout ressenties comme des erreurs d'occurrence, dont l'origine se situe dans des erreurs de position ou d'intensité. Dans la mesure où on peut aussi traduire en objets toutes les observations de type image, la vérification prend une autre dimension : quantification des erreurs d'occurrence, de position, etc et de là, de nouvelles possibilités d'améliorer les processus modélisés.

Sur le plan scientifique, cette représentation en objets a pris forme au cours d'une coopération avec l'INRIA. Les bases techniques employées s'inspirent du *traitement d'images*. Ceci a donné une toute première génération d'objets (Arbogast *et al.*, 2016). En 2017, à l'occasion d'un stage de Master, la partie détection d'objets a été revue en profondeur. Un jeu de contours (considérés comme *les particules d'un filtre*) est constitué sur la base de critères de *similarité des histogrammes à l'intérieur des contours*. L'équipe pense que cette version constitue le socle, sans doute assez définitif, de tous les futurs travaux ainsi que des applications. Elle est en cours de recodage, de façon à pouvoir désormais être utilisée davantage comme un outil. Les développements initiaux se sont concentrés sur les précipitations : l'approche doit désormais être étendue à d'autres variables : les réflectivités observées et prévues, nébulosité, rafales, type de précipitations, combinaison de paramètres.

Une thèse est consacrée à *la formalisation et à l'exploitation de la notion de texture* à l'intérieur de l'objet. La variabilité spatiale (et trans-membres) des objets est analysée au moyen de filtres de Gabor. Caractériser la texture est une étape importante pour enrichir le contenu météorologique des objets.

Un stage porte sur l'utilisation des objets au service d'une nouvelle vision de l'évaluation. Ce stage a commencé par la *création d'objets « observés » au sein de l'analyse Antilope*. Cette dernière est un produit de fusion de données entre observations radar et pluviomètres. Comme évoqué ci-dessus, les objets observés vont être confrontés aux objets prévus par Arome.

Un stage de Master explore le potentiel d'*algorithmes d'intelligence artificielle* en vue de rendre la détection des objets plus rapide en termes de temps de calcul. De fait, la combinaison d'un *algorithme d'apprentissage* récent (dit « profond ») appliqué à un *réseau de neurones* permet d'accélérer les détections, encore plus si les codes sont exécutés sur processeurs graphiques (« GPU »). Ce cadre « intelligence artificielle » devrait aussi faciliter l'identification d'objets complexes, avec prise en compte de la texture.

Ceci termine le résumé des actions en cours au sein de Météo-France en vue de repenser la production opérationnelle avec un premier objectif autour de 2020–21. Les activités de recherche destinées soit à contribuer à cette refonte, soit à même de l'enrichir après 2021 ont aussi été résumées. Loin d'être un démontage aveugle et une dépossession du travail de prévision, l'objectif technique premier consiste à remplacer une saisie manuelle guidée par l'examen de champs visualisés par la mise en place d'un flux continu de données, de la prévision brute à des ébauches de produits élaborés. Le métier de prévisionniste se décline dès lors selon des formes dont certaines sont différentes d'aujourd'hui (ou pratiquées de façon marginale, en étant qualifiées « d'études »), mais d'autres restent adossées aux savoirs-faire classiques enrichis par l'existence d'ensembles : dans toutes ces déclinaisons, c'est la partie valorisante du travail que l'on essaye de mieux servir par différents types d'algorithmes ou d'interfaces. Ces différents sujets présentent tous des dimensions de recherche et d'innovation dignes d'intérêt et offrent des débouchés, l'atelier l'a bien montré.

## 5. Et pour finir

En guise de conclusion, nous évoquerons un futur cadre possible pour donner une forte impulsion à nombre de sujets encore ouverts abordés dans l'atelier de Saint-Mandé ou dans les travaux en cours à Météo-France. En marge des Programmes Cadres de Recherche et Développement, la Commission Européenne lance, dans certains domaines stratégiques, des initiatives de grande ampleur dans le but d'affirmer, renforcer voire d'établir la présence de l'Europe et de contribuer à son développement économique à long terme. *Le calcul intensif est l'un de ces domaines stratégiques*. D'une part, la Commission Européenne tente de susciter la construction de calculateurs de puissance exaflopique ( $10^{18}$  opérations à virgule flottante par seconde) en créant un consortium recherche-industrie. D'autre part, la Commission incite à monter de très gros projets en mesure de valoriser ces infrastructures. Il s'agit de projets « porte-étendards » ou plutôt, *de projets « emblématiques »*. Le budget apporté par la Commission à ces projets est de l'ordre du milliard d'Euros. Les partenaires se doivent d'apporter l'équivalent d'un autre milliard. Ces partenaires sont de l'ordre d'une centaine.

Poussé par l'un des créateurs de la prévision d'ensemble, Tim Palmer, aujourd'hui à l'Université d'Oxford, *le CEPMMT a pris l'initiative d'un tel projet, nommé Extreme Earth*. Ce projet trouve racine dans la communauté Climat, mais il aborde aussi la prévision à plus courte échéance ainsi que l'assimilation de données. Surtout, une caractéristique exigée de la Commission pour ce type de projet est qu'il doit, de manière réelle et concrète, aller de *la technologie* (le calcul intensif), son *utilisation directe* (des prévisions d'ensemble aux caractéristiques inédites en matière de résolutions) aux *services qu'on peut en tirer* et à leur *impact socio-économique*. Si cette initiative est retenue par la Commission, elle devrait ainsi permettre de lancer davantage de travaux en partenariat sur l'exploitation des prévisions d'ensemble. Deux tels projets seront choisis en 2019–20 par la Commission.

Extreme Earth tente, en 2018, de faire partie de 4 avant-projets qui seront soutenus un an sous la forme d'actions de soutien et de concertation pour donner toute l'ampleur voulue à leurs objectifs. A ce stade, le partenariat est très restreint. Chaque partenaire ne représente

donc pas lui-même, mais *toute une communauté*. Ainsi, Météo-France a été choisi en début d'année (face au Met Office) comme le nouveau partenaire chargé de représenter *l'ensemble des services météorologiques nationaux européens* dans l'action préparatoire (Extreme Earth Preparatory Project). Si cette action reçoit le soutien de la Commission, Météo-France devra, en 2019, faciliter l'accès au projet complet des équipes de ces instituts autant sur les aspects technologiques que sur les applications. Parmi les thèmes, on comptera le développement de services adossés à des prévisions d'ensemble à toutes les échéances.

## 6. Quelques sites utiles

présentations de l'atelier de Saint-Mandé <http://www.umr-cnrm.fr/ppstmand/>  
 projet H2020 NextGenIO <http://http://www.nextgenio.eu>  
 atelier de la NOAA, janvier 2016 <https://dtcenter.org/events/workshops16/post-processing/>  
 le post-processeur Bayésien d'ensembles  
[http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/ens2008/Krzysztofowicz\\_Presentation\\_Web.pdf](http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/ens2008/Krzysztofowicz_Presentation_Web.pdf)

## 7. Quelques références bibliographiques

- Ph. Arbogast, O. Pannekoucke, L. Raynaud, R. Lalanne, E. Mémin, 2016 : Object-oriented processing of CRM precipitation forecasts by stochastic filtering. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **142**, 2827–2838. doi.org/10.1002/qj.2871
- J. Beck, F. Bouttier, L. Wiegand, Ch. Gebhardt, C. Eagle and N. Roberts, 2016 : Development and verification of two convection-allowing multi-model ensembles over Western Europe. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **142**, 2808–2826. doi.org/10.1002/qj.2870
- M. Boisserie, L. Descamps and Ph. Arbogast, 2016 : Calibrated forecasts of extreme windstorms using the Extreme Forecast Index (EFI) and Shift of Tails (SOT). *Weather and Forecasting*, **31**, 1573–1589. doi.org/10.1175/WAF-D-15-0027.1
- B. Kriescher, A. Koubek, Z. Pawlas, V. Benes, R. Hess, V. Schmidt, 2017 : On the computation of area probabilities based on a spatial stochastic model for precipitation cells and precipitation amounts. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **31**, (10), 2659–2674. doi.org/10.1007/s00477-016-1321-8
- T.M. Hamill, E. Engle, D. Myrick, M. Peroutka, C. Finan, M. Scheuerer, 2017 : The U.S. National Blend of Models for Statistical Postprocessing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, (9), 3441–3463. DOI : 10.1175/MWR-D-16-0331.1
- M. Mittermaier and G. Csima, 2017 : Ensemble versus Deterministic Performance at the Kilometer Scale. *Weather and Forecasting*, **32**, (10), 1697–1709. DOI : 10.1175/WAF-D-16-0164.1
- P. Pinson, 2013 : Wind Energy : Forecasting Challenges for Its Operational Management. *Statistical Science*, **28**, (4), 564–585. DOI : 10.1214/13-STS445
- L. Raynaud and F. Bouttier, 2016 : Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **142**, 854–866. doi.org/10.1002/qj.2686
- N. Roberts and M. Mittermaier, 2016 : A proposed post-processing science and verification strategy for 0-15 days for 2016-2020 and beyond. Met Office internal report, april 2016, 142p.
- N. Schuhen, T.L. Thorarinsdottir and T. Gneiting, 2012 : Ensemble Model Output Statistics for Wind Vectors. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3204–3219. DOI : 10.1175/MWR-D-12-00028.1
- M. Taillardat, O. Mestre, M. Zamo, P. Naveau, 2016 : Calibrated Ensemble Forecasts Using Quantile Regression Forests and Ensemble Model Output Statistics. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, (6), 2375–2393. DOI : 10.1175/MWR-D-15-0260.1
- L.J. Wilson, S. Beauregard, A. E. Raftery, and R. Verret, 2007 : Calibrated surface temperature forecasts from the Canadian Ensemble Prediction System using Bayesian model averaging. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1364–1385.