

Principes directeurs relatifs aux systèmes de prévision d'ensemble et à la prévision d'ensemble



**Organisation
météorologique
mondiale**

Temps • Climat • Eau

OMM-N° 1091

Principes directeurs relatifs aux
systèmes de prévision d'ensemble
et à la prévision d'ensemble



**Organisation
météorologique
mondiale**
Temps • Climat • Eau

2012

OMM-N° 1091

NOTE DE L'ÉDITEUR

METEOTERM, la base de données terminologique de l'OMM, figure à l'adresse http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_fr.html. La signification des abréviations se trouve également à l'adresse http://www.wmo.int/pages/themes/acronyms/index_fr.html.

OMM-N° 1091

© **Organisation météorologique mondiale, 2012**

L'OMM se réserve le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n'importe quelle langue. De courts extraits des publications de l'OMM peuvent être reproduits sans autorisation, pour autant que la source complète soit clairement indiquée. La correspondance relative au contenu rédactionnel et les demandes de publication, reproduction ou traduction partielle ou totale de la présente publication doivent être adressées au:

Président du Comité des publications
Organisation météorologique mondiale (OMM)
7 bis, avenue de la Paix
Case postale 2300
CH-1211 Genève 2, Suisse

Tél.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax.: +41 (0) 22 730 80 40
Courriel: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-21091-3

NOTE

Les appellations employées dans les publications de l'OMM et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'Organisation météorologique mondiale, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'OMM les cautionne ou les recommande de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

Les constatations, interprétations et conclusions exprimées dans les publications de l'OMM portant mention d'auteurs nommément désignés sont celles de leurs seuls auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'OMM ou de ses Membres.

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1. INTRODUCTION	1
2. POURQUOI UTILISER DES SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE?	1
3. TYPES DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE	2
3.1 Les systèmes mondiaux de prévision d'ensemble	2
3.2 Les systèmes régionaux de prévision d'ensemble	3
3.3 Les systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective	3
4. PRODUITS STANDARD ISSUS DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE	4
4.1 Création de produits de base émanant de sorties directes de modèles	4
4.1.1 Moyenne d'un ensemble	4
4.1.2 Dispersion des prévisions d'ensemble	4
4.1.3 Probabilités de base	5
4.1.4 Les quantiles	5
4.1.5 Les cartes «spaghettis»	5
4.1.6 Les cartes «timbres-poste»	6
4.1.7 Météogrammes propres à chaque site	7
5. OBSERVATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL S'APPLIQUANT À TOUS LES USAGES DES SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE	8
6. EMPLOI DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE POUR LES PRÉVISIONS DÉTERMINISTES	10
6.1 Prise de décisions à partir de prévisions déterministes	11
7. LES SCÉNARIOS	12
8. LES PRÉVISIONS ENTIÈREMENT PROBABILISTES	12
9. LE POST-TRAITEMENT	14
9.1 Le post-traitement statistique	14
9.1.1 Correction des biais du premier moment de la fonction de distribution de probabilités	15
9.1.2 Étalonnage des moments d'ordre supérieur de la fonction de distribution de probabilités	15
9.2 Réduction d'échelle	16
9.2.1 Réduction d'échelle dynamique	16
9.2.2 Réduction d'échelle topographique faisant intervenir des modèles physiques simples	16
9.2.3 Prélèvement de données sur des sites définis	17
9.2.4 Réduction d'échelle statistique	18
9.2.4.1 Recours aux différences d'analyse	18
9.2.4.2 Filtrage de Kalman	18
9.2.5 Diagnostics concernant les phénomènes météorologiques à fort impact	18
9.2.6 Réduction d'échelle par association de prévisions d'ensemble basse résolution et de prévisions de contrôle haute résolution	18
9.3 Techniques de groupement	18
9.4 Emploi de reprévisions	19
9.4.1 L'indice de prévision d'événements extrêmes	19
9.4.2 Appariement de quantiles entre eux	20
9.5 Détermination des caractéristiques météorologiques	20
10. EMPLOI DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE POUR LA PRÉVISION DE CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES ET LA DIFFUSION D'AVIS	20

	<i>Page</i>
11. MODÉLISATION DES INCIDENCES DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES.	23
12. VÉRIFICATION	23
13. FORMATION DES PRÉVISIONNISTES.	25

PRINCIPES DIRECTEURS RELATIFS AUX SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE ET À LA PRÉVISION D'ENSEMBLE

1. INTRODUCTION

Les systèmes de prévision d'ensemble sont des systèmes de prévision numérique du temps qui nous permettent d'évaluer l'incertitude des prévisions météorologiques ainsi que leurs incidences les plus probables. Au lieu de faire tourner le modèle de prévision numérique une seule fois (prévision déterministe), on le fait tourner plusieurs fois avec des conditions initiales très légèrement différentes. Souvent, la physique du modèle est un peu perturbée et, dans certains ensembles, on fait appel à plusieurs modèles (systèmes de prévision d'ensemble multimodèle) ou à un seul modèle mais avec différentes combinaisons de programmes de paramétrage physique (systèmes multiphysique). Comme il est onéreux de faire tourner un modèle de prévision numérique plusieurs fois, un tel système fonctionne généralement avec une résolution horizontale égale à la moitié environ de celle du modèle déterministe équivalent de prévision numérique. Normalement, ce système inclut une prévision de contrôle faisant appel au modèle de résolution d'ensemble, mais sans aucune perturbation de l'analyse ou du modèle. Les solutions individuelles de prévision numérique du temps constituant l'ensemble sont souvent appelées membres de l'ensemble. La gamme des diverses solutions d'une prévision nous permet d'évaluer l'incertitude de cette prévision et la confiance que nous pouvons accorder à une prévision déterministe. L'incertitude d'une prévision météorologique peut varier considérablement d'un jour à l'autre selon la situation synoptique; l'approche des systèmes de prévision d'ensemble donne une évaluation de cette incertitude. De tels systèmes, conçus pour échantillonner la fonction de distribution de probabilités de la prévision, sont souvent utilisés pour obtenir des prévisions permettant d'évaluer la probabilité que certains résultats se produisent.

Les présents principes directeurs ont pour objet d'offrir des conseils d'ordre général aux prévisionnistes et aux producteurs de prévisions à propos de l'emploi efficace des systèmes de prévision d'ensemble et de ce que ceux-ci devraient permettre ou ne pas permettre de faire. On supposera que les lecteurs ont une connaissance générale des principes et de la pratique de la prévision numérique du temps. Pour ceux qui auraient besoin d'informations plus détaillées, le *User Guide to ECMWF Forecast Products* (<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/>), publié par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), offre une orientation globale sur l'emploi des systèmes du Centre, et notamment des conseils détaillés sur l'exploitation des systèmes de prévision d'ensemble. Les ressources didactiques COMET (https://www.meted.ucar.edu/training_detail.php?orderBy=&topic=15) permettent d'obtenir une formation sur l'emploi des systèmes de prévision d'ensemble.

En général, il est vivement conseillé d'indiquer l'incertitude correspondant à chaque prévision. On trouvera une orientation à ce propos dans la publication intitulée *Principes directeurs pour la communication relative à l'incertitude des prévisions* (PWS-18, OMM/DT-N° 1422).

Les exemples illustrant les présents principes directeurs sont issus pour la plupart du système mondial et régional de prévision d'ensemble (MOGREPS) du Met Office britannique et du système de prévision d'ensemble du CEPMMT, mais les principes évoqués s'appliquent en fait à tous les systèmes de prévision d'ensemble.

2. POURQUOI UTILISER DES SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE?

Les systèmes de prévision numérique du temps faisant appel aux modèles numériques de l'atmosphère les plus récents sont des systèmes très puissants qui aident les prévisionnistes à obtenir des prévisions météorologiques. Actuellement, de nombreux modèles donnent une représentation du temps suffisamment bonne pour produire des prévisions de base automatisées issues de sorties directes de modèles, bien qu'en général, il soit recommandé de procéder à un post-traitement pour étalonner les prévisions automatiques. Les sorties directes de modèles donnent une représentation de certains éléments météorologiques meilleure que d'autres systèmes: par exemple, la température de surface est souvent très bien représentée – du moins si l'orographie de surface n'est pas abrupte –, alors que les précipitations sont souvent beaucoup moins bien représentées.

Toutefois, malgré les progrès accomplis, on sait pertinemment que souvent, les prévisions issues même des meilleurs modèles peuvent être éminemment fausses. C'est dans les prévisions à échéance de plusieurs jours que cela apparaît le plus manifestement en raison du caractère chaotique de l'atmosphère. Nous prévoyons le temps en faisant tourner un modèle à partir d'une analyse de l'état de l'atmosphère fondée sur les dernières observations en date effectuées dans le monde entier. Ensuite, le modèle calcule dans quelle mesure l'atmosphère va changer et évoluer au cours des prochains jours à partir de l'état déterminé par l'analyse initiale. Selon la théorie du chaos, la façon dont évolue l'atmosphère étant extrêmement sensible aux petites erreurs issues de l'analyse initiale, une erreur minime – souvent trop faible pour que les prévisionnistes la décèlent – peut donner lieu à une erreur importante de prévision. Même dans le cas des meilleures observations, on ne peut jamais réaliser d'analyse parfaite, donc de prévision parfaite. C'est pourquoi l'on fait appel à des systèmes de prévision d'ensemble.

Dans une prévision d'ensemble, on apporte de très faibles modifications (perturbations) à l'analyse, puis l'on fait de nouveau tourner le modèle à partir de ces conditions initiales légèrement perturbées. Si les diverses prévisions de l'ensemble sont très semblables, nous pouvons nous fier à notre prévision, mais si elles sont toutes différentes et que, par exemple, certaines prévoient une forte tempête alors que d'autres prévoient une dépression beaucoup plus faible, notre confiance sera nettement moindre. Cependant, en considérant la proportion des membres de l'ensemble qui prévoient une tempête, nous pouvons évaluer la probabilité d'apparition de celle-ci.

Si nous analysons des prévisions à courte échéance – un ou deux jours –, la configuration générale du temps est généralement beaucoup plus facile à prévoir, mais nous pouvons quand même discerner des différences majeures entre les membres de l'ensemble s'agissant des paramètres météorologiques locaux, qui peuvent avoir de l'importance pour de nombreux utilisateurs des prévisions. Parfois aussi, l'évolution du temps à grande échelle risquant d'être incertaine même à courte échéance, ce qui est le plus susceptible de se produire lors du développement de fortes tempêtes, il importe de tenir compte de la prévision d'ensemble, même à court terme.

3. TYPES DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE

Il existe trois types principaux de systèmes de prévision d'ensemble du temps: les systèmes mondiaux, les systèmes régionaux et les systèmes d'échelle convective. Tout comme les modèles de prévision numérique déterministes, ces systèmes englobent diverses échelles de temps dans les prévisions. Nous allons les présenter brièvement ci-après. Dans chacune de ces catégories, il existe de nombreuses variations, comme la façon dont les perturbations apparaissent et les variations des modèles employés dans les modèles. Cependant, les principes gouvernant la manière dont les ensembles sont utilisés restent les mêmes et ces détails ne seront pas abordés ici. (On notera que les ensembles servent aussi aux prévisions à longue échéance et aux prévisions climatiques. Les principes en sont très semblables, mais ces ensembles ne seront pas envisagés dans le présent document, axé sur les prévisions à 15 jours maximum – échéance à laquelle il est généralement possible de prévoir les conditions météorologiques pour chaque jour de cette période.)

3.1 Les systèmes mondiaux de prévision d'ensemble

Ces systèmes sont normalement conçus et employés pour les prévisions à moyenne échéance – 3 à 15 jours. Faisant appel à des modèles mondiaux de prévision numérique du temps, ils ont une résolution relativement faible, avec une maille de 30 à 70 km. Bien qu'étant prévus essentiellement pour une échéance moyenne, ils peuvent aussi, vu leur couverture mondiale, produire des prévisions d'ensemble à courte échéance dans des régions du globe où il n'existe pas d'autres systèmes de prévision d'ensemble et où ils sont la seule solution envisageable pour de nombreux Membres de l'OMM. Dans ce contexte, ils sont largement utilisés pour créer des produits à l'appui de diverses missions relevant du projet OMM de démonstration concernant la prévision des conditions météorologiques extrêmes.

Les prévisionnistes faisant appel à un système mondial de prévision d'ensemble doivent toujours tenir compte du fait qu'une résolution relativement faible limite le détail qu'ils peuvent obtenir dans les

prévisions. Il est souvent impossible aux systèmes mondiaux de prévision d'ensemble de distinguer des détails tels que la vitesse maximale du vent lors d'une tempête.

3.2 Les systèmes régionaux de prévision d'ensemble

Dans les systèmes régionaux de prévision d'ensemble ou les systèmes faisant appel à des modèles à domaine limité, on a recours à des modèles régionaux dans des zones plus réduites et l'on privilégie les prévisions à courte échéance, de 1 à 3 jours. La maille, plus petite que dans les systèmes mondiaux, se situe généralement entre 7 et 30 km, ce qui permet de prévoir plus en détail les conditions météorologiques locales et de mieux distinguer les systèmes météorologiques intenses. Néanmoins, les prévisionnistes doivent avoir à l'esprit les limites de la résolution: par exemple, on ne peut pas demander à un système régional de prévision d'ensemble de prévoir les détails de systèmes à petite échelle tels que les orages.

Dans un système régional de prévision d'ensemble, il convient de déterminer les conditions aux limites latérales – les systèmes météorologiques qui pénètrent dans la zone considérée depuis l'extérieur du domaine – à partir d'un système mondial. Dans certains systèmes régionaux, on fait appel à une analyse régionale haute résolution et l'on calcule les perturbations haute résolution correspondantes, mais dans d'autres cas, on prend simplement les conditions et les perturbations initiales issues du même système mondial qui fixe les conditions aux limites. C'est ce qu'on appelle habituellement une réduction d'échelle. Dans un système régional de prévision d'ensemble à réduction d'échelle, on fait tourner le modèle pendant plusieurs heures avant de procéder à un «spin-up» pour les détails à plus haute résolution.

3.3 Les systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective

La prévision numérique d'échelle convective, avec une maille de 1 à 4 km couvrant des domaines relativement restreints, existe maintenant dans divers centres de prévision numérique parmi les plus avancés. Ces modèles, qui permettent de simuler la convection, peuvent distinguer certains détails des grands systèmes convectifs tels que l'emplacement et l'intensité des orages. Alors que cela offre de vastes possibilités d'améliorer les prévisions, les systèmes convectifs évoluent très rapidement et leur échéance de prévisibilité est très courte; aussi les prévisions peuvent-elles être rapidement affectées par le chaos. Ainsi, les systèmes de prévision d'ensemble sont très utiles pour la prévision numérique d'échelle convective du fait que l'instabilité convective ajoute un nouveau degré d'incertitude des prévisions que ne distinguent pas les modèles basse résolution et que l'échéance est beaucoup plus courte.

Outre la convection proprement dite, les modèles ayant une telle résolution ont nettement accru la capacité de prévoir d'autres aspects des conditions météorologiques locales tels que les nuages bas et la visibilité pour l'aéronautique. Nombre de ces facteurs subissent fortement l'influence du forçage topographique, ce qui peut accroître la prévisibilité lorsque ce forçage peut être distingué par les modèles (par ex. les pentes, les côtes, la végétation et l'albédo) en cas, par exemple, d'apparition d'une convection ou de brouillards dans les vallées. Les systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective ont la possibilité de produire des informations sur la prévisibilité de tous ces éléments météorologiques.

Au moment de la rédaction du présent document, en 2011, des systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective étaient en cours de mise au point dans divers centres. En Allemagne, le Deutscher Wetterdienst fait tourner le modèle COSMO-DE-EPS, qui a une résolution de 2,8 km en mode préopérationnel, depuis décembre 2010. Le Met Office britannique et Météo-France prévoient de mettre prochainement en œuvre de tels systèmes tandis que d'autres pays procèdent à des recherches à ce sujet.

Vu le coût très élevé de l'exploitation des systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective, il est peu probable que de tels systèmes soient mis en œuvre en dehors des pays producteurs avant de nombreuses années et l'expérience de ceux-ci reste très limitée. Nous ne les présentons que brièvement dans le présent document.

On s'attend à ce que la résolution beaucoup plus élevée de ces systèmes permette d'obtenir pour de nombreux phénomènes météorologiques une meilleure résolution que celle qu'il est possible d'avoir avec des systèmes mondiaux et régionaux, par exemple pour des vents locaux forcés par la topographie et éventuellement pour des éléments tels que les nuages bas et la visibilité, surtout lorsque ces éléments sont forcés par des caractéristiques locales de la topographie ou de la surface du sol.

Pour ce qui est des précipitations, les modèles sont susceptibles de mieux distinguer l'intensité et l'échelle spatiale des précipitations locales et notamment des précipitations convectives. Il faudrait cependant, pour échantillonner l'intégralité de l'incertitude relative aux précipitations convectives, disposer de très grands ensembles comprenant des centaines voire des milliers de membres, ce qui n'est pas envisageable sur le plan financier dans un avenir prévisible. C'est pourquoi il est fortement recommandé de soumettre les systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective à un post-traitement en faisant appel à des techniques telles que la transformation ponctuelle («neighbourhood processing»), où l'on suppose qu'un phénomène tel qu'une averse convective peut être représenté de façon réaliste mais être mal placé et survenir n'importe où dans le voisinage, dans un rayon, mettons, de 10 mailles du point où il apparaît selon le modèle, afin d'obtenir une distribution spatiale plus réaliste des probabilités. Des techniques semblables peuvent aussi convenir pour d'autres variables, compte tenu de la taille réduite des ensembles.

4. **PRODUITS STANDARD ISSUS DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE**

Nous présentons ici certains des produits standard issus de la plupart des systèmes de prévision d'ensemble. Nous allons voir brièvement ci-après comment exploiter ces produits.

4.1 **Création de produits de base émanant de sorties directes de modèles**

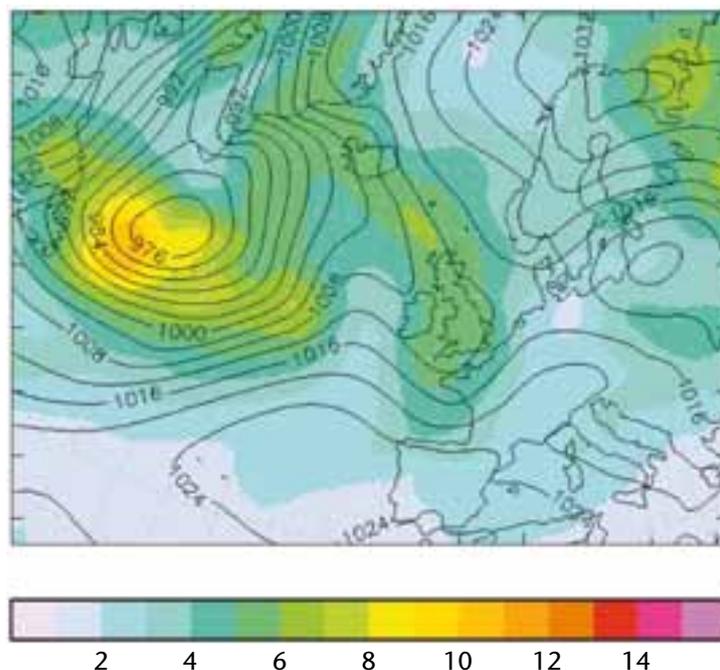
La plupart des systèmes de prévision d'ensemble donnent naissance à toute une gamme de produits de base issus directement de champs des sorties de modèles. En général, ces produits sont les suivants.

4.1.1 ***Moyenne d'un ensemble***

Il s'agit de la moyenne simple des valeurs d'un paramètre obtenues pour chacun des membres de l'ensemble. Normalement, cette moyenne permet une meilleure vérification que les prévisions de contrôle, selon la plupart des indices de vérification normalisés (erreur quadratique moyenne des écarts relatifs, erreur absolue moyenne, coefficient de corrélation des anomalies en fonction du temps, etc.) du fait qu'elle lisse les détails imprévisibles et présente simplement les éléments les plus prévisibles de la prévision. Cette moyenne peut servir de guide pour les éléments de la prévision pouvant être prévus en toute confiance, mais il ne faut pas s'y fier en tant que telle, car elle permet rarement de prévoir le risque de phénomènes extrêmes.

4.1.2 ***Dispersion des prévisions d'ensemble***

Cette dispersion, qui est l'écart type (sans biais) d'une variable de sortie de modèle, permet de calculer le degré d'incertitude d'un paramètre de la prévision. Elle est souvent portée sur une carte sur laquelle se superpose la moyenne de l'ensemble. Dans la figure 1, on peut observer la pression moyenne de l'ensemble au niveau moyen de la mer, figurée par des isolignes noires, et la dispersion de cette pression, figurée par des ombres de couleur. Les zones où les couleurs sont vives se caractérisent par une dispersion plus importante, donc par une prévisibilité moindre.



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 1. Moyenne (isolignes noires) et étalement (ombres de couleur) de la prévision de la pression moyenne au niveau moyen de la mer (T + 72)

4.1.3 **Probabilités de base**

On estime souvent qu'une probabilité est fonction directe des membres d'un ensemble qui prévoient l'occurrence d'un phénomène à un endroit donné ou en un point de grille, par exemple une température négative à deux mètres de hauteur ou plus d'un écart type au-dessous de la normale. La figure 2 montre des isolignes figurant la probabilité de rafales de vent supérieures à 40 nœuds. La pression moyenne de l'ensemble au niveau moyen de la mer est représentée par des isolignes grises.

Il est à noter que cette définition des probabilités ne porte pas sur de véritables probabilités bayésiennes telles que les définirait un statisticien, mais qu'elle donne un aperçu utile à des fins pratiques. Dans cette définition, on suppose que le modèle indique avec précision la distribution selon le climat de l'occurrence d'un phénomène. Les prévisions de probabilités produites ainsi devraient toujours être vérifiées à partir d'un vaste échantillon de cas pour déterminer dans quelle mesure les probabilités prévues correspondent aux fréquences observées.

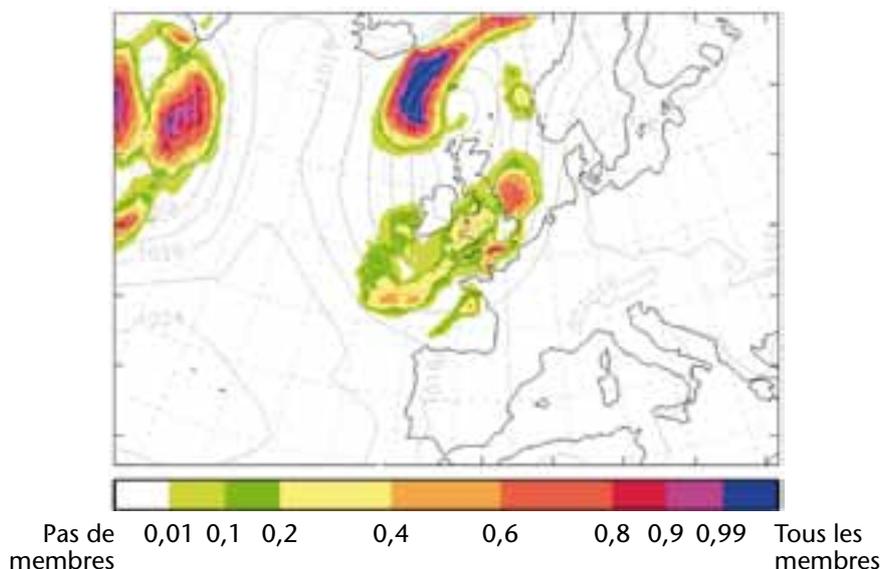
L'exemple à la figure 3 est l'un de ceux qui ont été produits pour le projet du Pacifique Sud, qui s'intègre dans le projet de démonstration concernant la prévision des conditions météorologiques extrêmes.

4.1.4 **Les quantiles**

Une série de quantiles de distribution d'un ensemble permettent d'obtenir un bref résumé de l'incertitude. Les quantiles couramment utilisés sont le maximum et le minimum de la distribution de l'ensemble et les 25^e, 50^e (médiane) et 75^e centiles. On utilise souvent également les 5^e, 10^e, 90^e et 95^e centiles.

4.1.5 **Les cartes «spaghettis»**

Les cartes montrant quelques isolignes sélectionnées de variables (par exemple les lignes correspondant à 528, 546 et 564 mètres dynamiques pour une altitude géopotentielle de 500 hPa) émanant de tous les membres de l'ensemble peuvent offrir une image utile de la prévisibilité du



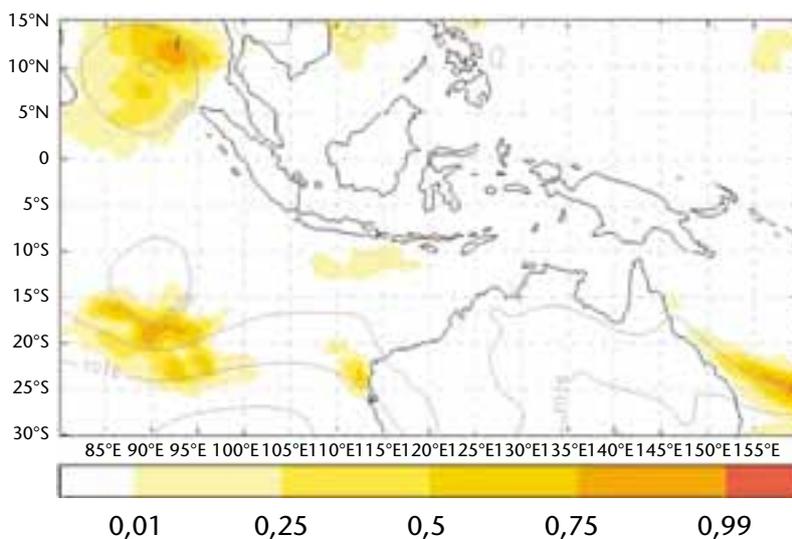
Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 2. Carte de probabilité, selon le système MOGREPS régional, de rafales supérieures à 40 nœuds, le 16 juillet 2010 à 0300 UTC (T + 21 du 15 juillet 2010 à 0600 UTC); pression moyenne de l'ensemble au niveau moyen de la mer représentée par des isolignes grises

champ. Lorsque les isolignes de tous les membres d'un ensemble sont rapprochées, la prévisibilité est élevée; lorsqu'elles ressemblent à des spaghettis dans une assiette, elle est moindre (voir la figure 4).

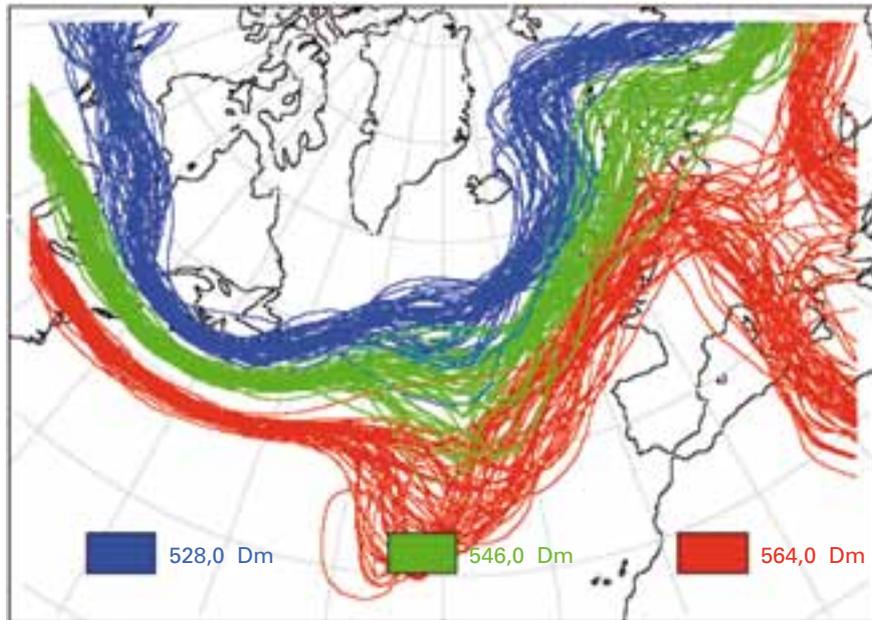
4.1.6 **Les cartes «timbres-poste»**

Une série de petites cartes présentant les isolignes de chaque membre de l'ensemble (voir la figure 5) permet aux prévisionnistes de visualiser les scénarios concernant la prévision de chacun de ces



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 3. Carte de probabilité, selon le système MOGREPS mondial, de vent à 10 mètres de hauteur ayant une vitesse supérieure à 20 nœuds, le 5 novembre 2010 à 0000 UTC (T + 48 du 3 novembre 2010 à 0000 UTC); pression moyenne de l'ensemble au niveau moyen de la mer représentée par des isolignes grises



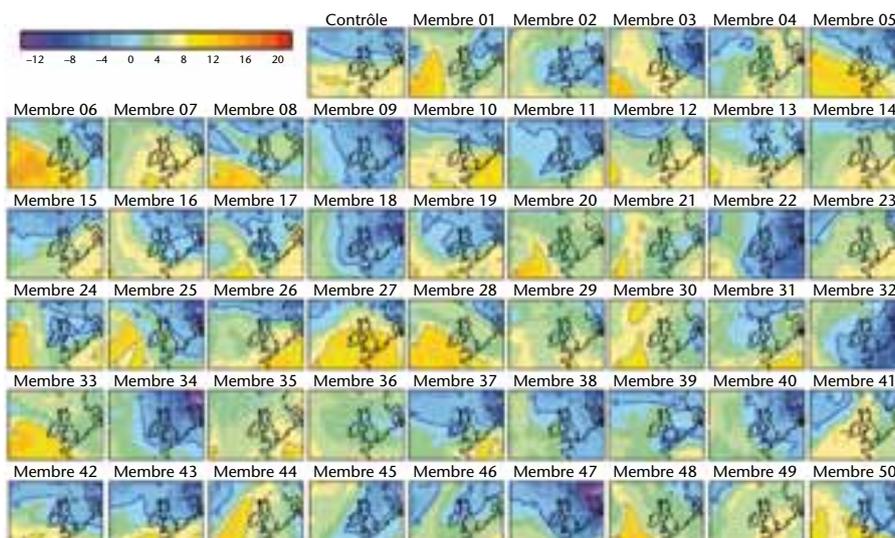
Source: Met Office du Royaume-Uni à partir de données du CEPMMT, © British Crown Copyright

Figure 4. Carte «spaghettis» de prévision d'ensemble à 500 hPa, le 11 février 2011 à 1200 UTC (T + 96 du 7 février 2011 à 1200 UTC)

membres et d'évaluer les risques de phénomènes extrêmes. Cependant, cela représente une grande quantité d'informations, qui peuvent être difficiles à assimiler.

4.1.7 **Météogrammes propres à chaque site**

Les variables de sorties de modèles peuvent être extraites de la grille pour des points donnés. On peut faire appel à diverses présentations pour représenter la prévision correspondant à un point, comme des



Source: Met Office du Royaume-Uni à partir de données du CEPMMT, © British Crown Copyright

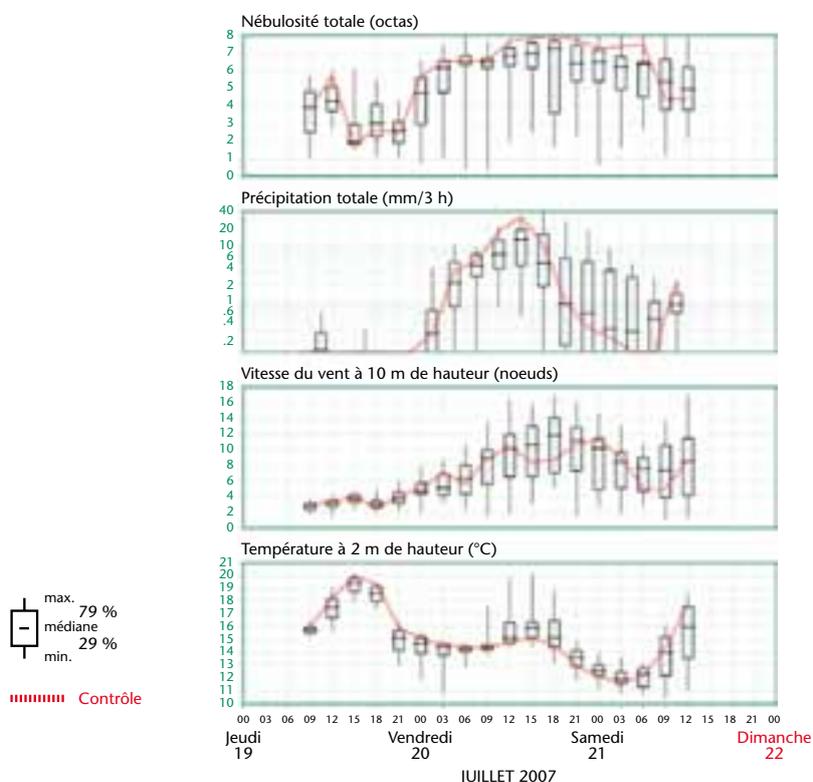
Figure 5. Carte «timbre-poste» du 7 février 2009 à 1200 UTC (température potentielle du thermomètre mouillé à 850 hPa, en degrés Celsius; T + 300 du 26 janvier à 0000 UTC)

cartes de dispersion des panaches ou des probabilités de précipitations. L'une des représentations les plus courantes est le météogramme d'ensemble («EPSgram» en anglais), où l'on fait appel à une boîte à moustaches afin de figurer les principaux percentiles de la distribution de la prévision pour une ou plusieurs variables (voir la figure 6).

5. OBSERVATIONS D'ORDRE GÉNÉRAL S'APPLIQUANT À TOUS LES USAGES DES SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE

Nous présentons ici quelques principes généraux concernant toutes les applications des systèmes de prévision d'ensemble. Les sections ci-après donnent plus de précisions sur l'emploi de ces systèmes pour des types particuliers de prévisions.

- a) Un système de prévision d'ensemble est le plus à même de représenter l'incertitude des variables définies.
 - i) Les paramètres d'observation en altitude sont en général d'une plus grande qualité que les paramètres d'observation en surface.
 - Aux paramètres d'observation en surface correspond une incertitude d'échelle inférieure à celle de la grille, que ne distingue pas le modèle.
 - ii) La capacité de prévoir des paramètres d'observation en surface s'améliore régulièrement avec l'augmentation de la résolution et des performances du modèle.
- b) La qualité d'un système de prévision d'ensemble dépend de celle du ou des modèles utilisés.



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 6. Météogramme de prévision européenne d'ensemble, selon le système MOGREPS, pour Brize Norton (51,8°N 1,6°W), du 19 juillet 2007 à 0900 UTC au 21 juillet 2007 à 1200 UTC

- i) Si un modèle ne peut pas représenter certains phénomènes, le système ne le pourra pas non plus.
 - Un bon exemple: la plupart des ensembles ne peuvent pas distinguer les orages de convection; c'est pourquoi certains centres conçoivent des ensembles d'échelle convective.
- ii) Un système de prévision d'ensemble répercute tout biais introduit par le modèle utilisé.
- c) Comment associer une prévision déterministe à une prévision probabiliste d'ensemble?
 - i) Capacité relative des membres de l'ensemble par rapport à une prévision de contrôle haute résolution.
 - ii) Voir les «[Guidelines on Using Information from EPS in Combination with Single Higher Resolution NWP Forecasts](#)» (Directives sur l'utilisation de l'information émanant des systèmes de prévision d'ensemble en combinaison avec une seule prévision numérique du temps haute résolution) (février 2006).
- d) Question commune: un prévisionniste peut-il améliorer la distribution en pondérant à nouveau les membres d'un ensemble (par exemple une prévision de contrôle haute résolution si elle est incluse) ou en rejetant certains de ces membres?
 - i) Les prévisionnistes peuvent estimer que certains membres sont irréalistes.
 - ii) Peut-on éliminer certains membres en se fondant sur des observations récentes ou choisir le meilleur des membres?
 - PEUT-ÊTRE, pour certains aspects des prévisions à très courte échéance et les prévisions locales sur une zone limitée.
 - Sur une vaste zone ou le domaine intégral du modèle, la prévision de contrôle sera toujours celle qui aura la meilleure qualité.
 - PAS pour des prévisions à plus longue échéance.
 - iii) Ce type d'approche est subjectif et difficile.
 - iv) Il est fortement recommandé aux prévisionnistes d'utiliser la totalité de la distribution du système de prévision d'ensemble dans une démarche probabiliste.
- e) Les prévisionnistes devraient connaître les points forts et les points faibles des modèles et des ensembles dont ils disposent. Ils devraient pouvoir se procurer une documentation facilement.
 - i) Une vérification des seuils multiples devrait être possible.
 - ii) Une documentation récapitulant les points forts et les points faibles par saison devrait être disponible.
- f) Attention aux paramètres de diagnostic «en bout de chaîne» concernant par exemple les précipitations et la nébulosité. Voir par exemple la distribution des indices en cas de convection.
- g) Les prévisionnistes ne devraient pas se fier uniquement aux sorties directes de modèles, mais devraient aussi tenir compte de l'analyse de diagnostics mieux définis qui pourraient contribuer à l'interprétation des prévisions d'ensemble (caractéristiques synoptiques, environnement, précurseurs et risques de phénomènes météorologiques à fort impact tels que la convergence de l'humidité, les jets à basse altitude, les zones de développement et les diagnostics de convection, par exemple).

L'emploi de systèmes de prévision d'ensemble – et d'autres outils probabilistes – donne la possibilité de produire deux types distincts de prévisions: des prévisions entièrement probabilistes ou des prévisions déterministes avec des informations supplémentaires sur l'incertitude (comme l'indice de confiance). Le type de prévision utilisé détermine la personne qui prend des décisions sur la base de cette prévision. En général, le recours à des prévisions entièrement probabilistes, qui permet à tous les usagers d'adapter leurs décisions à leurs besoins propres (par exemple en faisant appel à l'évaluation du rapport coût-perte), est donc vivement recommandé.

6. EMPLOI DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE POUR LES PRÉVISIONS DÉTERMINISTES

En général, les prévisions probabilistes du temps étant les meilleures et les plus complètes, leur emploi est conseillé, surtout à longue échéance. Toutefois, de nombreux utilisateurs ne souhaitent que de simples prévisions déterministes, auquel cas les prévisions d'ensemble sont souvent plus fiables qu'une seule prévision numérique déterministe. Cela est particulièrement le cas pour les prévisions à échéance de plus de un à trois jours et peut contribuer à réduire l'instabilité d'un passage au suivant du système de prévision, quelle que soit l'échéance.

On peut faire appel à divers indicateurs d'un système de prévision d'ensemble pour optimiser les prévisions déterministes. Les moyennes d'ensemble donnent les meilleurs résultats selon divers indices normalisés de qualité, mais il faut bien voir qu'elles ont tendance à lisser des détails imprévisibles à petite échelle et qu'elles captent rarement l'intensité des grands systèmes météorologiques à fort impact. Ainsi, il ne faut pas faire appel à des moyennes d'ensemble si les prévisions s'appliquent à des phénomènes météorologiques à fort impact. D'autres éléments utiles pour obtenir les prévisions les plus vraisemblables sont la médiane (point central de la fonction de densité de probabilité) et le mode (valeur la plus probable de cette fonction), plus faciles à déterminer pour un seul paramètre météorologique que pour une prévision complète.

Si une prévision déterministe doit être établie, on peut parfois lui adjoindre une indication de la confiance à lui accorder afin de tirer profit des informations sur l'incertitude disponibles. L'indice de confiance n'est pas toujours le même pour tous les éléments d'une prévision donnée. Si l'on fait appel à des indices de confiance, il vaut mieux les appliquer séparément à chaque variable. Le niveau de confiance doit être fondé sur la dispersion de l'ensemble, compte tenu des limitations connues de la qualité de la prévision.

La meilleure approche pour la réalisation d'une prévision déterministe dépend de la prévisibilité indiquée par la dispersion de l'ensemble. On peut analyser cette dispersion au moyen de divers produits tels que des cartes «spaghettis» et une carte indiquant la variance à l'échelle synoptique et en faisant appel, à échelle plus réduite, à des météogrammes, à des quantiles, à des analyses par groupe, etc.

- a) Faible dispersion de l'ensemble (bonne prévisibilité).
 - i) Dans ce cas, il peut être bon d'inclure davantage de détails dans la prévision.
 - ii) Prendre le contrôle, le contrôle haute résolution, la moyenne d'ensemble ou la médiane comme guide (compte tenu de la nécessité d'un étalonnage ou d'une correction des biais).
 - iii) La dispersion étant souvent différente selon les variables du modèle, une faible dispersion d'un paramètre ne garantit pas qu'on puisse faire confiance à tous les aspects de la prévision.
 - Une bonne prévisibilité à l'échelle synoptique n'est pas toujours synonyme de prévisibilité pour les variables météorologiques de surface telles que la température ou les précipitations convectives.
 - Les prévisionnistes doivent tenir compte de l'incertitude des paramètres ignorés par le modèle.

- b) Forte dispersion de l'ensemble (mauvaise prévisibilité).
- i) Éviter un excès de détails dans la prévision.
 - ii) La moyenne d'ensemble doit être prise en compte, mais si l'ensemble correspond à toute une gamme de scénarios, cette moyenne ne donnera pas de scénario réaliste.
 - iii) Dans ce cas, il faut prendre le membre le plus représentatif de l'ensemble (comme le groupe ou le mode le plus peuplé de la fonction de densité de probabilité) comme guide pour obtenir le résultat le plus probable.
 - Il est à noter que le membre le plus représentatif d'un ensemble ne donnera pas nécessairement la valeur la plus probable pour chaque élément météorologique (par exemple, la température la plus probable en un endroit pouvant ne pas être en corrélation avec la hauteur de précipitation la plus probable).
 - iv) Évaluation de l'incertitude.
 - Encourager les utilisateurs à suivre les actualisations des prévisions.
 - v) Prendre en compte les valeurs extrêmes de la prévision d'ensemble et du contrôle haute résolution.
 - Évaluer soigneusement les scénarios d'évolution de la situation synoptique et leurs incidences éventuelles.
 - Tenir compte du comportement des modèles.
 - Une prévision de contrôle haute résolution sera peut-être plus à même de représenter certains phénomènes à fort impact.
- c) À courte échéance (12 à 18 heures), il est possible de tenir compte des dernières observations (3 à 6 heures après la prévision) en vue de choisir un scénario ou un membre de l'ensemble.
- i) Par exemple, la meilleure façon de prévoir un cyclone évoluant rapidement peut être de choisir le membre qui se trouve dans la meilleure position au bout de quelques heures, mais **UNIQUEMENT** à très courte échéance.
 - ii) Attention: l'évolution à venir subira l'influence de caractéristiques émanant d'un point situé en amont, ce qui rend impossible la sélection d'un membre en vue d'une prévision à plus de 24 heures (environ).
 - iii) La cohérence des derniers passages par rapport aux passages précédents est un facteur à prendre en compte.
- d) À plus longue échéance, les prévisions probabilistes sont les mieux adaptées, mais si l'on doit produire une prévision déterministe, le recours à la moyenne d'ensemble ou à la médiane peut donner lieu à des prévisions plus fiables, avec moins d'instabilité entre les passages du modèle.

6.1 **Prise de décisions à partir de prévisions déterministes**

Les prévisions météorologiques ne sont utiles que dans la mesure où elles servent à prendre des décisions. On affirme souvent qu'il est plus facile de prendre une décision à partir d'une prévision déterministe qu'à partir d'une prévision probabiliste. Cependant, lorsqu'un prévisionniste fait une prévision déterministe, l'incertitude sous-jacente existe toujours et il doit procéder à l'estimation la plus plausible du résultat probable. À moins que le prévisionniste comprenne bien la décision que l'utilisateur va prendre en se fondant sur la prévision et les incidences des divers résultats, son estimation la plus plausible ne correspondra peut-être pas vraiment aux besoins réels de l'utilisateur.

- a) Une certaine connaissance des besoins de l'utilisateur final est nécessaire lorsqu'on décide de faire une prévision déterministe concernant un phénomène précis qui doit se produire. On ne peut pas prendre de décision optimale sans connaître le rapport coût-perte de l'utilisateur. Ce rapport peut être déterminé par un sondage ou par un entretien direct avec l'utilisateur final.
- b) Le cas échéant, les prévisionnistes doivent présenter les risques et les incidences des pires scénarios parallèlement à ceux des scénarios les plus probables.

7. LES SCÉNARIOS

Il est utile, pour résumer l'incertitude d'une prévision météorologique, de présenter quelques résultats ou scénarios possibles plutôt que de donner tous les détails d'une prévision probabiliste. Cela est souvent plus acceptable pour certains clients habitués à recevoir des prévisions déterministes. Dans l'idéal, on peut faire appel à un système de prévision d'ensemble pour évaluer la probabilité relative des divers scénarios produits. Dans la plupart des cas, pour éviter toute confusion, le mieux est de présenter le scénario le plus plausible en se fondant sur les conseils ci-dessus à propos de la production de prévisions déterministes, plus un deuxième scénario. Il s'agit souvent du pire scénario, qui aura peut-être une faible probabilité d'occurrence mais qui risquera de créer un fort impact selon les membres de l'ensemble les plus extrêmes. Cependant, il faut veiller à ne pas donner l'impression que l'un ou l'autre scénario est le bon, la vérité pouvant bien se trouver quelque part entre les deux, ou même ailleurs.

Il existe des outils utiles contribuant à la création de scénarios différents: les cartes «timbres-poste» (voir ci-dessus 4.1.6), qui permettent aux prévisionnistes de visualiser en même temps toutes les prévisions de l'ensemble, et le groupement (voir ci-dessous 9.3), qui réunit automatiquement les membres de l'ensemble et offre aux prévisionnistes une évaluation objective des scénarios possibles.

8. LES PRÉVISIONS ENTIÈREMENT PROBABILISTES

Il est recommandé, dans la mesure du possible, d'adopter une approche entièrement probabiliste s'agissant de la production de prévisions. Ainsi, les informations sur l'incertitude associée à un système de prévision d'ensemble sont intégralement représentées et les usagers peuvent adapter leurs décisions pour tenir compte de leurs propres applications.

Les prévisions probabilistes peuvent s'exprimer de diverses façons et l'on n'a pas toujours besoin d'employer le terme «probabilité», comme dans les cas suivants:

- a) Prévision d'une variable météorologique avec indication des marges d'erreur, variant selon la dispersion de l'ensemble;
- b) Représentation plus complète de la distribution de l'ensemble indiquant plusieurs percentiles, employée dans les météoigrammes standard;
- c) Probabilités d'occurrence de phénomènes précis (bien définis), exprimées sous forme de nombres ou de zones ombrées sur une carte.

Lorsqu'une prévision se présente sous forme de probabilité, il est très important d'indiquer clairement à quoi s'applique cette probabilité de façon à ce qu'elle soit claire et facile à comprendre tant pour le prévisionniste que pour l'utilisateur. On parle souvent de la probabilité d'occurrence d'un phénomène, et c'est lui qui est à définir. Souvent, ce phénomène correspond à une valeur seuil à dépasser (par exemple plus de 50 mm de pluie ou température inférieure à 0 °C). Dans l'idéal, il s'agit d'un phénomène qui aura un impact important à propos duquel une décision devra être prise (par exemple probabilité que les routes soient verglacées,

ce qui exigera des mesures). Il est important de déterminer quand et où le phénomène doit se produire:

- a) Période ou moment exact auquel la prévision se réfère;
- b) Zone ou endroit exact auquel la prévision s'applique
 - o S'il s'agit d'une zone, la prévision indique-t-elle que le seuil sera dépassé quelque part dans la zone ou partout dans la zone?

On peut vérifier si un phénomène est bien défini en se demandant s'il est facile de déterminer s'il va se produire ou non (autrement dit, peut-on vérifier la prévision?). Si la réponse est non, il va peut-être falloir mieux le définir.

Nous présentons ci-après certaines questions à envisager lorsqu'on fonde des prévisions probabilistes sur les résultats de prévisions d'ensemble.

- a) Une prévision étalonnée dont les biais ont été corrigés peut être communiquée directement à l'utilisateur final (de façon économique).
 - o Cette démarche permet de produire des prévisions automatiques pour de nombreux endroits et usagers.
 - o Les méthodes de correction des biais et d'étalonnage sont abordées dans la section 9.
- b) Il faut faire preuve de prudence lorsqu'on utilise des sorties directes de modèles, qui risquent de ne pas donner lieu à des prévisions probabilistes fiables, mais qui livrent souvent des informations précieuses. Dans certains cas, le recours à une sortie directe de modèle peut être indiqué lorsqu'il n'existe pas de système d'étalonnage, l'étalonnage étant difficile pour certaines variables telles que les précipitations ou si l'on ne dispose pas d'observations correctes.
- c) Pour produire des prévisions probabilistes dépendant de plusieurs éléments météorologiques, il faut déterminer le résultat pour chaque membre de l'ensemble, puis associer les résultats des divers membres pour obtenir les probabilités. On conserve alors des rapports cohérents entre les variables météorologiques et entre les sites (par exemple la corrélation entre les températures de deux endroits). L'étalonnage ou le post-traitement risquent de nuire à cette cohérence.
 - o Ce principe est également applicable lorsqu'on fait appel à l'ensemble pour amener les modèles d'impact en aval (par exemple les modèles hydrologiques), le modèle situé en aval devant tourner pour chaque membre de l'ensemble et la probabilité d'incidences en aval devant être calculée.
- d) Dans les cas «habituels», les prévisionnistes ne doivent pas tenter de modifier les prévisions probabilistes lancées par le système de prévision d'ensemble (sortie directe de modèle ou post-traitement). Les prévisions peuvent être communiquées directement au public. Les prévisionnistes doivent porter leur attention sur les situations «inhabituelles».
- e) Dans ces situations, les prévisionnistes peuvent adapter des prévisions probabilistes en faisant appel, par exemple, à l'expérience, à des analogues et à des modèles conceptuels. Les prévisionnistes sont parfois à même de corriger certains biais ou faiblesses connus des modèles. Ils devraient procéder à ces corrections en appliquant les directives présentées à la section 9.
- f) Des études ont démontré que le grand public est susceptible de prendre de meilleures décisions si on lui présente des informations sur l'incertitude des prévisions que si on lui présente des prévisions déterministes. Lorsqu'on ne lui donne pas d'informations sur l'incertitude, il formule ses propres hypothèses.

- g) Les probabilités doivent être présentées sous une forme graphique globale. On trouvera des exemples et des directives dans la publication intitulée *Principes directeurs pour la communication relative à l'incertitude des prévisions* (PWS-18, OMM/DT-N° 1422).
- h) Les probabilités de phénomènes ayant un rapport avec des applications données sont à définir. On prendra pour exemple l'agriculture, où l'apparition de périodes de sécheresse ou de périodes pluvieuses influe sur l'irrigation, les semis et les récoltes.
- i) Par risque on entend l'association de la probabilité d'occurrence d'un phénomène et de ses incidences possibles, qui peuvent être estimées par un système de prévision d'ensemble. Ce risque donne aux prévisionnistes une base objective très utile pour définir divers niveaux d'alerte. Les incidences doivent être convenues avec les autorités compétentes (clients des services météorologiques destinés au public). En général, la climatologie est une bonne référence pour fixer les seuils de phénomènes qui ont des incidences. On peut adapter ces seuils en fonction de l'évolution récente de divers paramètres environnementaux (la hauteur totale des précipitations récentes influant sur la saturation des sols, la couverture foliaire de la végétation, la couverture de neige, etc.).
- j) Il est recommandé aux prévisionnistes, lorsque des probabilités de conditions météorologiques à fort impact sont indiquées, d'y ajouter des observations écrites ou des avis.

9. LE POST-TRAITEMENT

Les présents principes directeurs ont pour objet de donner des explications et des conseils sur le post-traitement en faisant appel à des méthodes statistiques dynamiques et autres afin d'améliorer les résultats des systèmes de prévision d'ensemble. Les approches sont multiples. Certaines des plus courantes sont présentées ci-après. Certaines méthodes ont un caractère général et peuvent être appliquées à la source par les producteurs de prévisions d'ensemble, alors que d'autres, particulières aux applications, sont plutôt destinées aux usagers individuels.

9.1 Le post-traitement statistique

De façon générale, un post-traitement statistique est nécessaire pour corriger les erreurs systématiques des modèles et ajouter ainsi une valeur aux sorties directes des modèles de prévision numérique du temps. Ces erreurs, particulièrement importantes pour les paramètres de surface (par exemple température à deux mètres de hauteur, humidité à deux mètres, vitesse du vent à 10 mètres, précipitations et nébulosité totale), sont liées aux conditions locales.

Plus précisément, on peut faire appel à un post-traitement statistique:

- a) Pour corriger les biais systématiques;
- b) Pour ajuster la dispersion des prévisions d'ensemble;
- c) Pour quantifier l'incertitude qui n'est pas représentée directement par le système de prévision d'ensemble;
- d) Pour prévoir ce que le modèle ne représente pas explicitement (comme une faible visibilité).

En général, les méthodes statistiques sont plus faciles à appliquer à certains types de variables de sorties de modèles qu'à d'autres. La température, par exemple, est souvent relativement facile à prévoir, car il s'agit d'une variable continue qui varie assez doucement dans les champs des modèles et, chose la plus importante, les erreurs de température sont souvent réparties à peu près normalement. Les précipitations, en revanche, sont particulièrement difficiles à prévoir du fait que les champs de précipitation ont fréquemment une structure à échelles multiples, mal représentée par les modèles, surtout à petite échelle. Leur distribution climatologique, donc la distribution des erreurs de prévision,

limitée à zéro à une extrémité, est souvent fortement asymétrique, d'où la difficulté de les représenter statistiquement. On peut parfois réduire le problème en transformant la distribution pour la rendre plus quasi normale, mais en général, pour les précipitations, les méthodes de post-traitement sont bien moins efficaces que pour d'autres variables.

9.1.1 **Correction des biais du premier moment de la fonction de distribution de probabilités**

Ce type de post-traitement est semblable aux statistiques de sorties de modèles (MOS) s'appliquant à des modèles seuls, mais avec des différences importantes. Pour les ensembles, il est connu que des statistiques traditionnelles de sorties de modèles adaptées spécifiquement à chaque délai de prévision conduisent à une réduction sensible de la dispersion des prévisions d'ensemble pour de longues échéances. En fait, il est recommandé de faire appel à un pronostic pseudo-parfait. Cette méthode est fondée sur l'emploi de modèles statistiques MOS pour les 24 premières heures de la prévision, appliqués ensuite aux étapes correspondantes pour toutes les échéances de prévision.

On recommande le recours à des techniques d'adaptation telles que le filtrage de Kalman afin que les corrections soient automatiquement actualisées en fonction des modifications (améliorations) apportées au modèle et des changements de saison.

Dans le cas d'ensembles où l'on fait appel à un seul modèle – celui-ci étant utilisé pour tous les membres, même si des perturbations du modèle sont introduites –, le même modèle statistique doit être adapté au moyen de la prévision de contrôle et appliqué à tous les membres de l'ensemble.

Dans le cas d'ensembles multimodèle ou multiphysique (si divers modèles sont utilisés pour obtenir la fonction de distribution de probabilités ou si des versions systématiquement différentes du modèle sont employées, dans le cas, par exemple, de différentes techniques de paramétrage), des modèles statistiques spécifiques doivent être adaptés et appliqués à chaque version du modèle.

Quel que soit le cas, la mise au point de ces modèles statistiques exige un ensemble d'adaptation des sorties de modèle (prédicteurs) et des observations (prédicteurs). Dans le cas des techniques d'adaptation telles que le filtrage de Kalman, cet ensemble est mis à jour constamment à partir de prévisions quotidiennes.

Les «observations» peuvent être propres au site ou constituer la meilleure série disponible d'analyses. Dans le cas d'observations sur site, le post-traitement statistique conduit à des prévisions locales (en chaque point propre au site où des observations sont disponibles). Lorsqu'on procède à des analyses, le produit final, corrigé des biais, est une prévision aux points de grille sur une échelle réduite.

Il est à noter que lorsque les biais de diverses variables météorologiques sont corrigés de façon indépendante, une partie de la corrélation entre les variables représentées par les divers membres de l'ensemble risque de se perdre. C'est pourquoi les prévisionnistes préfèrent souvent visualiser des sorties directes de modèles.

9.1.2 **Étalonnage des moments d'ordre supérieur de la fonction de distribution de probabilités**

On appelle souvent «étalonnage» la correction des biais du deuxième moment de la fonction de distribution de probabilités. Cette opération a pour objet d'améliorer la fiabilité des prévisions probabilistes. Ainsi, ce type de post-traitement, propre aux systèmes de prévision d'ensemble, est particulièrement important pour optimiser les prévisions de probabilités. Comme pour la correction des biais du premier moment, l'étalonnage, qui dépend des conditions locales, exige des observations de haute qualité ou des analyses à titre de référence.

Diverses méthodes sont en cours de mise au point pour étalonner le premier et le deuxième moments de la fonction de distribution de probabilités en vue d'optimiser l'ensemble de la distribution.

- a) Une méthode conçue à l'Université de Washington, aux États-Unis d'Amérique, est désormais considérée comme l'une des meilleures à cet égard. Cette méthode, appelée *Bayesian model averaging* (moyennage selon le modèle bayésien), est fondée sur des hypothèses statistiques particulières telles que la distribution normale de la température.
- b) *L'Ensemble Kernel Distribution Model Output Statistics* (EKDMOS: statistiques de sorties de modèles concernant la distribution d'ensemble de noyaux) est une autre méthode utilisée.

Les méthodes ci-dessus s'appliquent communément à des variables telles que la température et la vitesse du vent. Des variables telles que les précipitations sont plus difficiles à corriger du fait de la nature de la fonction de distribution de probabilités et de la variabilité locale des observations. Certaines approches spécifiques sont en cours de mise au point, mais les méthodes de post-traitement sont actuellement moins intéressantes et risquent de ne pas s'améliorer sensiblement par rapport aux sorties brutes de modèles.

Il est à noter que le potentiel du post-traitement statistique est limité, surtout dans le cas des phénomènes extrêmes. En général, l'étalonnage améliore la fiabilité statistique des prévisions probabilistes (adéquation entre les probabilités prévues et la fréquence d'observation du phénomène), mais réduit la résolution des prévisions (capacité de déterminer si un phénomène va se produire ou non). On constate parfois que l'étalonnage améliore la prévision des phénomènes courants mais rend moins fiables les probabilités de phénomènes plus extrêmes. S'il en est ainsi, c'est surtout du fait que les observations de ce type sont rares et que les distributions statistiques sont adaptées aux phénomènes les plus courants. Ainsi, on ne peut pas s'attendre dans ce cas à ce que l'étalonnage apporte une amélioration sensible par rapport aux prévisions brutes.

On s'est efforcé de développer explicitement le post-traitement pour la prévision de phénomènes plus extrêmes, dans le cas, par exemple, de systèmes d'alerte à des conditions météorologiques extrêmes en première approximation. Dans ces cas-là, les systèmes peuvent être étalonnés précisément de façon à optimiser la fiabilité des seuils extrêmes. Néanmoins, une interprétation par des experts reste particulièrement importante pour évaluer le risque de phénomènes extrêmes.

9.2 Réduction d'échelle

Diverses méthodes peuvent être employées pour ajouter des détails locaux aux prévisions produites à partir de modèles à faible résolution. Ces méthodes peuvent s'appliquer à des prévisions d'ensemble tout comme dans le cas de la prévision numérique déterministe du temps.

9.2.1 Réduction d'échelle dynamique

La réduction d'échelle dynamique peut se définir comme étant l'emploi d'un modèle de prévision numérique haute résolution à domaine limité pour ajouter des détails forcés par la topographie et pour distinguer des processus de petite échelle tels que la convection. Dans l'idéal, l'échelle de tous les membres d'un ensemble est réduite, mais si des contraintes s'y opposent, un ensemble choisi de membres peut subir une réduction d'échelle. Lors d'une réduction d'échelle dynamique, les conditions initiales, les conditions aux limites et les perturbations sont obtenues directement à partir des membres du système de prévision d'ensemble ayant une faible résolution. Il faut veiller à ce que la réduction d'échelle soit appropriée pour garantir les performances du modèle haute résolution, en prenant garde, par exemple, au rapport entre les dimensions des mailles et le taux d'actualisation des conditions aux limites. Les performances du modèle doivent être soigneusement testées dans le domaine considéré. De nombreux modèles à domaine limité et systèmes de prévision d'ensemble d'échelle convective sont des systèmes à réduction d'échelle dynamique issus d'ensembles mondiaux.

9.2.2 Réduction d'échelle topographique faisant intervenir des modèles physiques simples

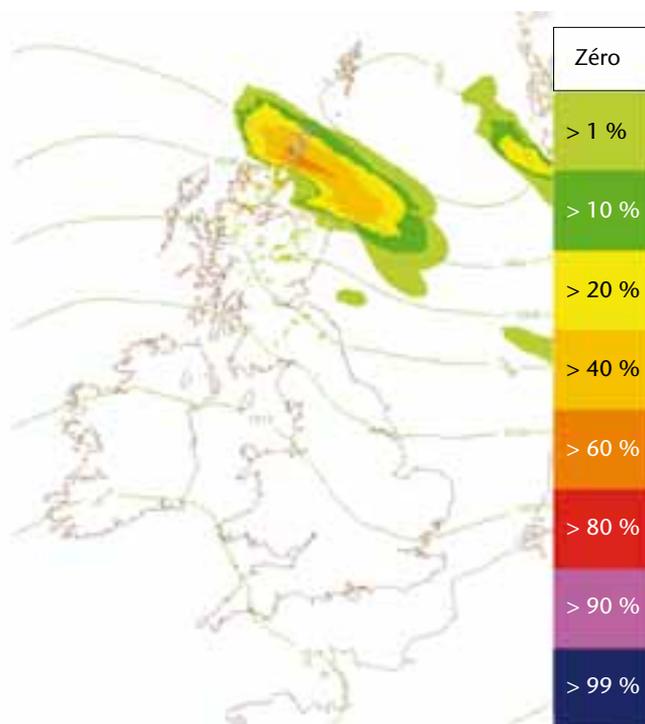
Pour certains paramètres tels que la température à 2 m de hauteur et la vitesse du vent à 10 m, on peut procéder à une réduction d'échelle simple en utilisant un rapport avec la topographie de surface.

Pour prévoir la température de surface, par exemple, on peut faire appel au gradient vertical en vue de réduire l'échelle du champ du système de prévision d'ensemble à faible résolution afin d'obtenir une grille de résolution plus élevée à partir de la topographie aux points de grille. La figure 7 montre des probabilités de vents forts dont l'échelle est réduite à partir d'un système régional de prévision d'ensemble en utilisant un champ orographique haute résolution. Il indique comment détecter les probabilités de vent dans les montagnes d'Écosse qui ne sont pas apparues dans la version « sortie directe de modèle » de la carte.

9.2.3 **Prélèvement de données sur des sites définis**

On peut produire des prévisions pour des endroits définis en prélevant des données sur la grille d'un modèle. Dans les cas les plus simples, les données sont tout bonnement recueillies au point de grille le plus proche ou alors elles sont interpolées par interpolation linéaire entre les points de grille les plus proches. On fait appel, pour améliorer cette opération, à diverses techniques semblables aux méthodes de réduction d'échelle. Il convient en particulier d'apporter des corrections à la température de surface et à la vitesse du vent pour tenir compte de la différence entre l'orographie du modèle et l'altitude vraie du site. Un système intelligent de sélection du point de grille le plus représentatif peut être plus intéressant qu'une simple interpolation, surtout près des côtes, où il vaut parfois mieux choisir le point terrestre le plus proche pour représenter un endroit situé sur terre plutôt que, par exemple, le point de grille le plus proche, qui peut se situer en mer. Une telle approche peut aussi être avantageuse à proximité d'un relief abrupt.

On peut également faire appel à un modèle unidimensionnel pour des prévisions particulières, par exemple un modèle unidimensionnel du brouillard à proximité d'un aéroport.



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 7. Probabilité de vent fort, le 5 août 2011 à 0900 UTC (T + 15), calculée sur la base du système MOGREPS-R (composante régionale) après avoir réduit l'échelle du champ de sortie de modèle à une grille de 2 km en utilisant un champ orographique haute résolution. Il convient de noter les probabilités haute résolution de vent fort dans les montagnes du nord-est de l'Écosse révélées par la réduction d'échelle.

9.2.4 **Réduction d'échelle statistique**

On peut aussi procéder à une réduction d'échelle des champs de surface en établissant un rapport statistique entre les champs basse résolution du modèle et les analyses haute résolution. Nous présentons ci-après deux techniques pouvant être utilisées.

9.2.4.1 Recours aux différences d'analyse

On peut développer le rapport statistique en rapprochant les analyses haute résolution aux points de grille des champs d'analyse correspondants de la grille du modèle de prévision d'ensemble. On obtient ainsi un vecteur de réduction d'échelle, qu'on peut alors appliquer aux champs de la prévision d'ensemble afin de produire des champs de prévision corrigés des biais et d'échelle réduite sur la grille haute résolution.

9.2.4.2 Filtrage de Kalman

On peut procéder à un filtrage de Kalman à chaque point de la grille haute résolution en vue d'établir un rapport statistique avec les champs d'analyse du système de prévision d'ensemble basse résolution. On peut ensuite appliquer ce filtrage aux champs de prévision d'ensemble afin d'obtenir des champs de prévision corrigés des biais et d'échelle réduite sur la grille haute résolution.

9.2.5 **Diagnostics concernant les phénomènes météorologiques à fort impact**

Il existe diverses méthodes pour diagnostiquer des phénomènes météorologiques à fort impact à partir de modèles de prévision numérique du temps, qu'on peut appliquer aux systèmes de prévision d'ensemble. Un bon exemple est celui du diagnostic de forte convection. Dans ce cas, on fait souvent appel aux sorties multiniveau de plusieurs modèles pour diagnostiquer l'instabilité et le risque d'une forte convection et pour établir les probabilités d'occurrence de phénomènes tels que les fortes chutes de grêle, les tornades et les rafales de vent de convection.

9.2.6 **Réduction d'échelle par association de prévisions d'ensemble basse résolution et de prévisions de contrôle haute résolution**

On peut ajouter les champs de perturbation d'un ensemble faible résolution (différence entre la prévision du membre perturbé et la prévision de contrôle) aux champs d'une prévision de contrôle haute résolution afin d'obtenir une prévision probabiliste haute résolution.

9.3 **Techniques de groupement**

On peut faire appel à des processus de classification pour synthétiser la vaste quantité d'informations présentes dans les ensembles. Des classifications de divers types peuvent être adoptées:

- a) On peut grouper des membres très semblables de par leur évolution dans une zone d'intérêt géographique définie. Il existe divers algorithmes standard de groupement qui donnent parfois des résultats différents. Le résultat d'un groupement dépend aussi des variables choisies;
- b) Dans la classification par «tubage», on choisit un groupe central des membres les plus proches de la moyenne d'ensemble et les membres les plus sensiblement différents de cette moyenne (extrémités du tube). Le tubage est utile pour déterminer le résultat le plus probable et les scénarios possibles les plus différents de cette solution;
- c) On peut classer les prévisions en appariant des membres de l'ensemble selon une série définie de régimes de la circulation, comme les types de Grosswetterlagen établis pour l'Europe centrale.

Cette méthode permet d'obtenir le groupement qui correspond le mieux aux attentes des prévisionnistes synopticiens.

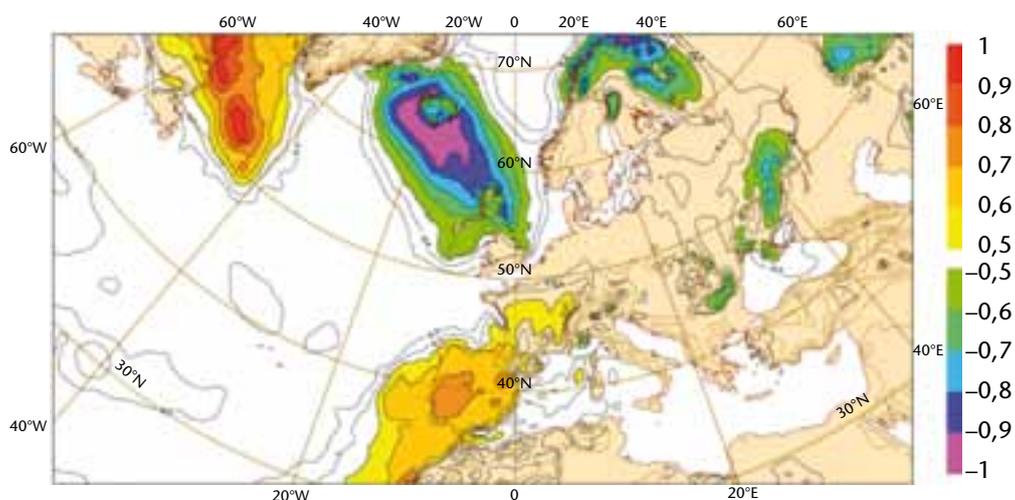
9.4 **Emploi de reprévisions**

Des recherches ont démontré que l'étalonnage des prévisions d'ensemble au moyen de séries de reprévisions d'archives – prévisions émanant du même modèle ou prévisions d'ensemble issues de séries de cas d'archives obtenues par réanalyse – peut améliorer la qualité et la fiabilité des prévisions probabilistes de façon très efficace. Les reprévisions donnent naissance à des jeux de données de meilleure qualité, pour l'adaptation de méthodes de post-traitement statistique, que lorsqu'on utilise des prévisions récentes du fait qu'elles permettent un meilleur échantillonnage des divers régimes météorologiques et types de conditions météorologiques. Cela peut être particulièrement utile pour optimiser l'étalonnage des prévisions dans le cas de phénomènes rares ou extrêmes. Toutefois, le passage de reprévisions renchérit sensiblement les calculs pour l'établissement de prévisions d'ensemble et dépend de l'existence d'un jeu correct de données de réanalyse pour fixer les conditions initiales. Ainsi, actuellement, il existe très peu de systèmes de prévision d'ensemble auxquels sont rattachés des jeux de données de reprévision, mais leur emploi est recommandé dans la mesure du possible. S'il n'existe pas de jeu complet de données de reprévision, on peut faire appel à des prévisions d'ensemble d'archives récentes émanant du même système, bien que cela risque de donner lieu à un échantillonnage moins fiable du climat déterminé par le modèle complet.

9.4.1 **L'indice de prévision d'événements extrêmes**

L'une des applications des reprévisions est le calcul de l'indice de prévision d'événements extrêmes (EFI).

Comme les modèles de prévision numérique du temps et les systèmes de prévision d'ensemble ne représentent pas avec précision le climat de l'atmosphère réelle, la meilleure façon d'identifier les phénomènes extrêmes est sans doute la climatologie des modèles. L'indice de prévision d'événements extrêmes mis au point par le CEPMMT (voir la figure 8) permet de repérer les phénomènes prévus qui sont extrêmes par rapport au climat du modèle et donc de lancer une alerte au risque de conditions météorologiques dangereuses, mais il n'indique pas de façon explicite les probabilités associées à ce type de phénomène.



Source: CEPMMT

Figure 8. Indice de prévision d'événements extrêmes (température à 2 m de hauteur) pour la période allant du 6 janvier 2011 à 0000 UTC au 7 janvier 2011 à 0000 UTC (T + 60-84 du 3 janvier 2011 à 1200 UTC)

On peut aussi faire appel à une reprévision pour évaluer la gravité d'un phénomène établie par les prévisions par rapport à des périodes de retour, ce qui peut être utile pour qualifier cette gravité.

9.4.2 Appariement de quantiles entre eux

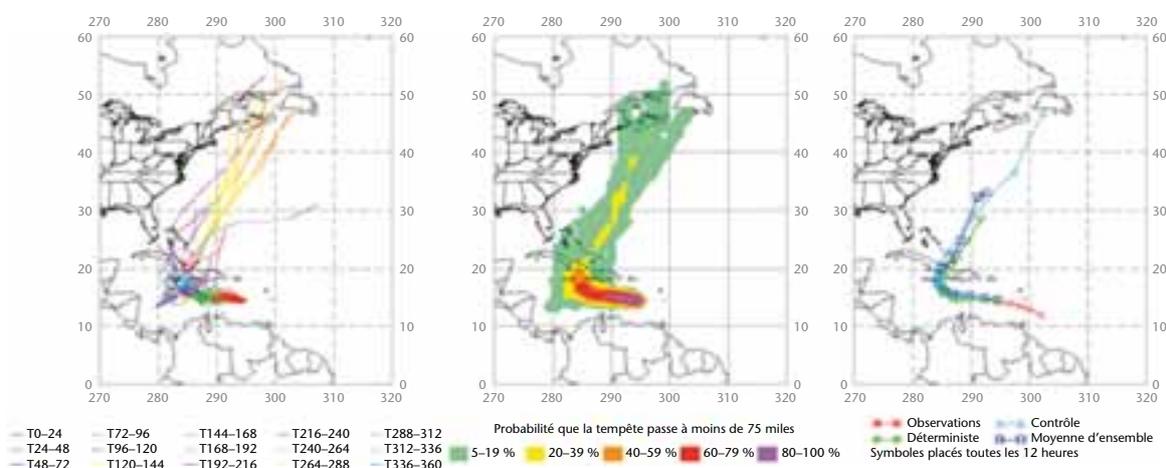
Une autre approche de l'étalonnage des prévisions à laquelle on peut faire appel lorsqu'il existe une évaluation de la normale du modèle climatique est l'appariement des quantiles. On peut par exemple interpréter la valeur correspondant au 90^e percentile de cette normale de façon qu'elle représente le 90^e percentile de la distribution réelle de la normale observée à un endroit donné. En général, cette méthode exige l'emploi d'un jeu de données de reprévision pour déterminer la normale du modèle climatique.

9.5 Détermination des caractéristiques météorologiques

Il est utile, dans le cas de systèmes de prévision d'ensemble faible résolution tels que les systèmes mondiaux, de déterminer les caractéristiques météorologiques de chaque membre de l'ensemble. Les cyclones tropicaux, bien qu'ils ne soient pas bien distingués par les modèles, offrent un bon exemple d'une caractéristique météorologique dont les fluctuations sont néanmoins bien prévues par les modèles mondiaux. On ne peut pas s'attendre à ce qu'un système mondial de prévision d'ensemble prévoie l'intensité des vents forts ou des grosses pluies présents dans un cyclone tropical, mais il peut en repérer la position. Le prévisionniste peut interpréter les probabilités de conditions météorologiques extrêmes s'il connaît les caractéristiques des cyclones tropicaux et les informations d'ensemble concernant leur trajectoire possible. Dans la figure 9, on peut voir les trajectoires de l'ouragan *Tomas* dans les membres de l'ensemble (à gauche), les probabilités qu'il passe à proximité de points indiqués sur la carte (au centre) et le résumé des trajectoires, comme la trajectoire moyenne d'ensemble (à droite). Les centres météorologiques régionaux spécialisés dans les cyclones tropicaux disposent souvent de cartes de ce type.

10. EMPLOI DE SYSTÈMES DE PRÉVISION D'ENSEMBLE POUR LA PRÉVISION DE CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES ET LA DIFFUSION D'AVIS

Des phénomènes météorologiques extrêmes ou à fort impact se produisent à de nombreuses échelles spatiales et temporelles, depuis les cyclones tropicaux, les cyclones extratropicaux, les moussons,



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 9. Produits relatifs aux cyclones tropicaux issus de l'ensemble MOGREPS sur 15 jours montrant les trajectoires de l'ouragan *Tomas* d'après des prévisions diffusées le 1^{er} novembre 2010

les tempêtes hivernales et d'autres systèmes de grande échelle jusqu'à des systèmes de petite échelle tels que les fortes tempêtes locales, les précipitations orographiques, les orages et les tornades. Les prévisionnistes doivent tenir compte de la prévisibilité différente de divers types de phénomènes (par exemple en ne tentant pas de prévoir un orage trois jours à l'avance).

Le système d'alerte à des conditions météorologiques extrêmes d'un Service météorologique et hydrologique national (SMHN) bien structuré devrait inclure des seuils et des délais appropriés ainsi qu'un niveau de service convenu avec les usagers. Normalement, les seuils devraient correspondre au niveau d'impact que des conditions météorologiques devraient avoir sur la société, y compris les risques pour les personnes et les biens et les perturbations de la vie quotidienne. Les caractéristiques d'un système d'alerte à envisager sont les suivantes:

- a) Types d'alertes; régions; seuils (gravité/impact et probabilité);
 - i) $\text{Risque} = \text{probabilité} \times \text{impact}$
- b) Un système d'alerte correct doit être facile à comprendre par les usagers, et les prévisionnistes doivent respecter des seuils normalisés;
 - i) De nombreux pays font désormais appel à un système de «feux de signalisation» en quatre couleurs (vert, jaune, orange et rouge) indiquant divers niveaux de risque et les niveaux correspondants d'intervention que doivent respecter les usagers;
- c) Un système d'alerte de haute qualité exige un retour d'information des usagers vers les SMHN. Ces derniers doivent à leur tour informer les producteurs pour qu'ils puissent concevoir des produits corrects.

Les systèmes de prévision d'ensemble sont des outils puissants pour la prévision de conditions météorologiques extrêmes. On peut y faire appel dans le cas des systèmes d'alerte axés sur les impacts pour évaluer la probabilité de risques météorologiques ($\text{risque} = \text{probabilité} \times \text{impact}$). Néanmoins, ces systèmes peuvent prévoir avec précision des conditions météorologiques extrêmes que le ou les modèles ont pu distinguer. Autrement, les points ci-après sont applicables:

- a) Les systèmes de prévision numérique du temps ont du mal à distinguer explicitement des phénomènes de petite échelle, d'où une sous-estimation de la probabilité d'occurrence de phénomènes extrêmes par les systèmes de prévision d'ensemble;
- b) Les systèmes de prévision d'ensemble peuvent parfois reconnaître les précurseurs de phénomènes extrêmes ou des facteurs favorables à grande échelle tels que les indices de convection;
- c) Les systèmes mondiaux de prévision d'ensemble, à plus faible résolution, sont moins à même de distinguer les détails d'un phénomène extrême;
- d) Les systèmes régionaux de prévision d'ensemble, qui ont habituellement une résolution plus élevée, devraient fournir des évaluations plus détaillées de l'incertitude à petite échelle.

Il faut parfois étalonner les seuils de risque employés dans les systèmes de prévision d'ensemble pour tenir compte des limites évoquées ci-dessus.

Des indications précoces de certains phénomènes extrêmes sont prévues à la fin de la distribution de l'ensemble.

- a) Ainsi, les prévisionnistes et les usagers devraient tenir compte des phénomènes ayant une faible probabilité d'occurrence, surtout lorsqu'ils sont très rares.
 - i) Par exemple, en ne tenant pas compte des probabilités inférieures à 20 % ou même à 10 %, on risque de passer à côté des phénomènes les plus importants signalés par le système de prévision d'ensemble.

- ii) Pour pouvoir faire appel à de faibles probabilités, les prévisionnistes ont besoin d'informations sur la vérification.
- iii) Les «fausses alertes» sont en fait des caractéristiques correctes des faibles probabilités. Cependant, de faibles probabilités peuvent être nécessaires dans les situations à fort impact potentiel.
- iv) On s'attend généralement, mais pas toujours, à ce que la probabilité augmente lorsqu'on se rapproche de l'événement.

Un phénomène extrême peut être prévu correctement pour l'essentiel, mais avec des erreurs ou des incertitudes en ce qui concerne le lieu ou le moment d'occurrence.

On peut accroître la qualité d'une prévision d'ensemble de base grâce à une interprétation synoptique (par exemple par le suivi des phénomènes météorologiques ou par l'emploi d'analogues) ou au moyen d'outils de réduction d'échelle statistique.

- a) On notera que certaines méthodes statistiques exigent de vastes échantillons de données pour l'adaptation et qu'elles risquent de ne pas convenir en cas de phénomènes rares ou extrêmes.
- b) Les produits relatifs au suivi des cyclones (tropicaux et extratropicaux) peuvent donner un résumé utile du développement de tempêtes à fort impact.
- c) Il est possible d'obtenir un plus grand nombre de diagnostics fondés sur les caractéristiques pour les phénomènes météorologiques extrêmes qu'on distingue mal.

L'indice de prévision de phénomènes extrêmes peut être un outil utile dans la mesure où il prévient les prévisionnistes en cas de risque de tels phénomènes.

- a) Cet indice, qui ne présente pas de probabilités explicites de phénomènes précis, doit être interprété parallèlement à d'autres outils.
- b) Actuellement, seuls quelques systèmes peuvent faire appel à cet indice en raison de la nécessité d'une climatologie du modèle.

On peut, en considérant les données issues de systèmes de prévision multiples (d'ensemble et déterministes), obtenir davantage d'informations sur la probabilité d'occurrence de phénomènes extrêmes.

- a) Il est important de procéder à des vérifications pour déterminer la qualité et les limites des systèmes de prévision d'ensemble.
 - i) Les utilisateurs de tels systèmes doivent connaître ces limites ainsi que les points forts des systèmes.
 - ii) Toutefois, en raison de la rareté des phénomènes les plus extrêmes, il est souvent impossible d'obtenir une vérification fiable (ou statistiquement valable) des performances probabilistes de ces systèmes. Il est parfois possible d'en évaluer la qualité pour les phénomènes extrêmes en l'extrapolant à partir de la vérification de phénomènes moins extrêmes.
- b) Comme la qualité des systèmes de prévision d'ensemble diminue en fonction inverse de l'échéance, on accorde généralement une plus grande crédibilité aux derniers produits disponibles. Cependant, des passages antérieurs d'un système de prévision d'ensemble pourront quand même donner des informations utiles sur les phénomènes rares en raison du manque de dispersion (limitation de la taille des échantillons).

11. MODÉLISATION DES INCIDENCES DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

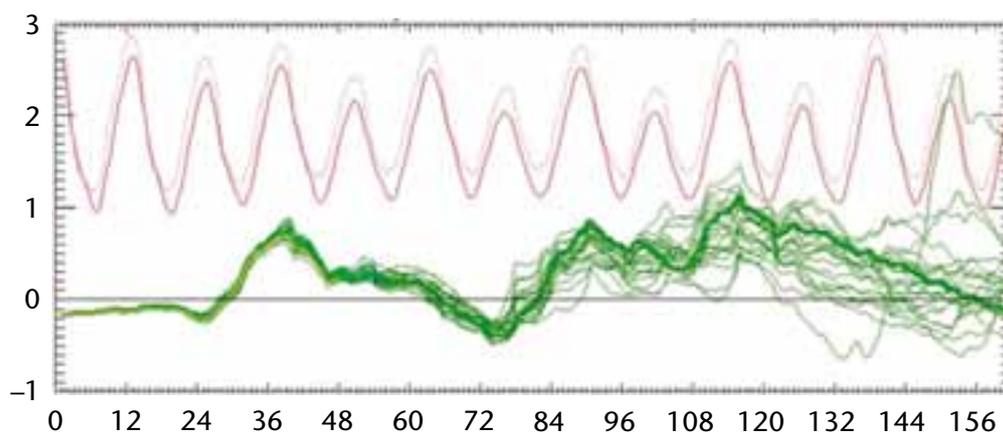
On peut élargir l'incertitude des prévisions météorologiques à l'incertitude des incidences des conditions météorologiques extrêmes en couplant les membres d'un ensemble avec des modèles d'impact et en procédant à une distribution des prévisions d'impact. On peut prendre comme exemples les modèles hydrologiques de prévision probabiliste des inondations, les modèles d'ondes de tempête côtières et les modèles de vagues de chaleur et de veille sanitaire. Il s'agit là d'une application perfectionnée, de plus en plus utilisée dans les centres les plus avancés. La figure 10 représente une prévision d'ensemble d'onde de tempête dans un port côtier, utilisée pour forcer l'ensemble au moyen d'un modèle d'onde de tempête. Les courbes en rouge, en haut du graphique, représentent le niveau de risque d'inondation, qui oscille avec les marées, ce risque étant avéré lorsque les courbes figurant cette onde dans la prévision d'ensemble passent au-dessus des courbes en rouge. Il s'agit là d'un exemple intéressant, un membre de l'ensemble prévoyant une onde extrême le septième jour, ce qui indique une faible probabilité d'inondation côtière grave. Dans ce cas, l'utilisateur doit pouvoir prendre assez tôt des mesures de précaution, mais sans réagir de façon excessive, la probabilité d'inondation restant faible.

12. VÉRIFICATION

La vérification est une partie très importante de tout ce qui a trait aux prévisions. Si nous ne vérifions pas les prévisions – autrement dit si nous ne contrôlons pas leur qualité après coup en déterminant dans quelle mesure elles correspondent à ce qui s'est réellement passé –, nous ne disposons d'aucun moyen d'apprendre et d'améliorer nos prévisions à l'avenir. Cela vaut aussi pour les prévisions probabilistes. Certains disent que la prévision d'une probabilité ne peut jamais être fautive, sauf si l'on annonce 0 ou 100 %. D'autres affirment qu'il ne s'agit que d'un moyen pour les prévisionnistes d'éviter de prendre une décision. Pour nous opposer à ces affirmations, nous devons démontrer que les prévisions sont effectivement vérifiées et qu'elles ont une utilité.

Il ne s'agit pas de proposer ici un guide détaillé sur la vérification des prévisions, mais de présenter quelques points importants.

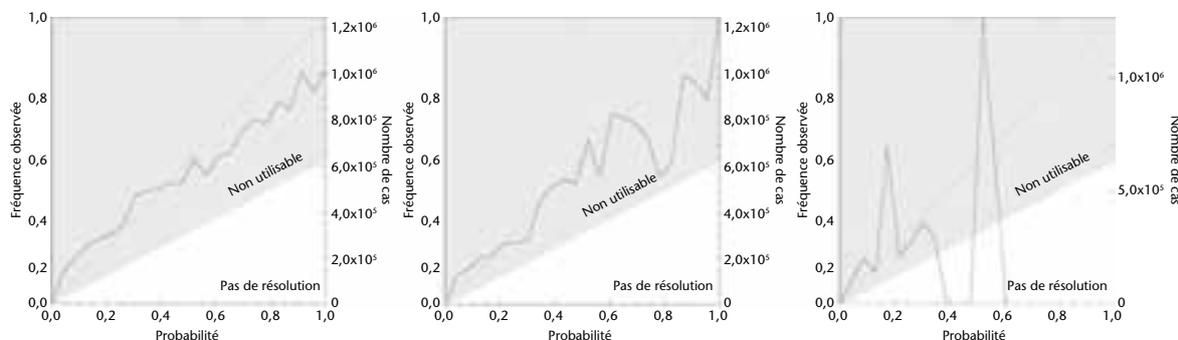
- a) Une prévision de probabilité unique ne peut pas être vraie ou fautive.



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 10. Hauteur d'ensemble d'une onde de tempête à Lowestoft, le 2 octobre 2011 à 1800 UTC (traits pleins et pointillés rouges: niveau d'alerte auquel l'onde de tempête s'accompagne d'un risque d'inondation, qui varie selon la marée; traits verts et orange: prévisions d'ensemble et déterministes d'onde de tempête. Il y a risque d'inondation lorsque l'onde de tempête dépasse le niveau d'alerte)

- i) Si nous prévoyons un événement avec une forte probabilité et que cet événement se produit, nous aurons souvent envie de dire «Voyez, nous avons raison!», ce qu'il ne faut pas faire, car si nous prévoyons un événement ayant une faible probabilité d'occurrence et qu'il se produit aussi, nous affirmerons «Nous avons dit qu'il s'agissait d'une possibilité, même si la probabilité était faible.»
- b) Si nous disons qu'il y a une probabilité de 30 % de chute de pluie supérieure à 10 mm et que l'observation montre qu'il n'est tombé que 1 mm, la prévision n'est ni vraie ni fausse. Nous devons déterminer la quantité réellement observée à plusieurs reprises après avoir fait une telle prévision et obtenir plus de 10 mm de pluie 30 fois sur 100. C'est là la signification de la prévision. Si nous prévoyons une probabilité de 80 %, nous devons l'obtenir 80 fois sur 100.
- c) La façon la plus simple de présenter une vérification est de faire appel à un diagramme de fiabilité, où l'on trace une courbe de la fréquence observée par rapport aux fréquences prévues, ce qui est exactement la situation indiquée ci-dessus. Trois exemples de diagrammes de fiabilité pour des probabilités de vitesse du vent supérieure à la force 8, 9 et 10 de l'échelle Beaufort sont représentés dans la figure 11. L'idéal, c'est que la courbe se trouve le long de la diagonale principale, de (0,0) à (1,1). Le diagramme de gauche (force 8) est très bon: il montre que selon les prévisions de forte probabilité, l'événement est beaucoup plus probable, la pente étant légèrement moins que parfaite, mais bonne. Le diagramme central (force 9) est semblable, mais il n'est pas aussi bon pour les probabilités les plus élevées, en haut à droite de la courbe. Le diagramme de droite (force 10) est valable pour les probabilités allant jusqu'à 30 %, mais au-dessus, il ne donne aucune information utile. En fait, il s'agit d'un événement rare et le jeu de données ne contient pas suffisamment d'échantillons pour qu'on puisse déterminer si la qualité est suffisante. Ce problème est courant lorsqu'on vérifie les phénomènes extrêmes: il n'existe pas suffisamment de données pour déterminer la qualité probabiliste.
- d) Il existe de nombreuses autres façons de mesurer les prévisions probabilistes. Certaines des plus courantes sont citées ici. On trouvera davantage d'informations sur Internet en y cherchant ces termes ou dans des guides standard sur la vérification des prévisions.
- i) Indice de Brier: erreur quadratique moyenne des prévisions de probabilité du seuil d'un événement donné;
- ii) Indice d'efficacité de Brier: comparaison de l'indice de Brier pour les prévisions avec l'indice de Brier pour un système de prévision de référence;
- iii) Fiabilité: mesure de l'adéquation entre les probabilités prévues et les fréquences observées;



Source: Met Office du Royaume-Uni, © British Crown Copyright

Figure 11. Diagramme de fiabilité et de netteté pour des probabilités de vents d'une vitesse supérieure à 8, 9 et 10 Beaufort; vérification de prévisions à T + 36 par rapport à des observations de surface dans la zone correspondant au modèle pour l'Atlantique Nord et l'Europe, de janvier 2006 à février 2007

- iv) Résolution: mesure de la qualité du système en matière de prévision de probabilités différentes de la «normale»;
- v) Caractéristique relative de fonctionnement (ROC): mesure de la qualité des prévisions pour la prise de décisions – semblable à la résolution;
- vi) Indice continu de probabilité ordonnée (CRPS) et indice de probabilité ordonnée (RPS): semblable à l'indice de Brier pour les seuils multiples d'une variable météorologique.

La Commission des systèmes de base de l'OMM a défini un ensemble normalisé d'indices de vérification pour la comparaison des systèmes de prévision d'ensemble, présentés pour divers systèmes sur le site Web du centre principal de vérification des prévisions d'ensemble, à l'adresse <http://epsv.kishou.go.jp/EPsv/>.

13. FORMATION DES PRÉVISIONNISTES

En général, la formation des prévisionnistes devrait comprendre des modules sur la prévisibilité et les prévisions d'ensemble:

- a) Justification des prévisions probabilistes: la théorie du chaos et ses incidences;
- b) Base statistique: théorie et approches;
- c) Objectifs des conditions initiales et des perturbations des modèles;
- d) Outils normalisés de vérification des ensembles et signification de ceux-ci;
- e) Signification des produits (par exemple les courbes dans les graphiques);
- f) Techniques de post-traitement et incidences de celles-ci.

Formation pratique

La formation des prévisionnistes à l'emploi des systèmes de prévision d'ensemble doit être pratique et faire appel à des outils se rapprochant le plus possible de ceux qui sont employés en exploitation. Une telle formation n'est optimale que si le SMHN qui la dispense a accès à des données d'exploitation sur ces systèmes et qu'il dispose du temps voulu pour utiliser directement ces données ainsi que les outils et produits considérés.

Si la formation n'est pas suivie d'une pratique opérationnelle, ses avantages se réduisent rapidement à zéro.

- a) Une formation associée, par exemple, à un projet de démonstration concernant la prévision des conditions météorologiques extrêmes peut être renforcée et consolidée par la production de données d'exploitation issues des systèmes de prévision d'ensemble.
- b) Lors d'une formation, il faudrait présenter des études de cas qui montrent comment utiliser correctement les indications fournies par les systèmes de prévision d'ensemble, tant dans les scénarios ordinaires que dans ceux qui concernent les conditions météorologiques extrêmes.
- c) Les outils présentés sur le Web sont intéressants pour la formation, car on peut les utiliser sur n'importe quel poste de travail avec un navigateur standard qui permet d'y accéder à n'importe quel moment.
- d) Dans le domaine relativement récent des prévisions d'ensemble, il est bon de prévoir une formation périodique pour obtenir les meilleurs résultats. Les prévisionnistes ont besoin de temps pour se familiariser avec cette technique et d'une formation complémentaire pour étayer

les principales notions. Il serait intéressant que plusieurs SMHN se fassent mutuellement part de leur expérience en matière d'utilisation des prévisions d'ensemble.

e) Matériel didactique:

- *User Guide to ECMWF Forecast Products*
<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/>
 - Modules d'ensemble COMET:
https://www.meted.ucar.edu/training_detail.php?orderBy=&topic=15
-

Pour de plus amples informations, veuillez vous adresser à:

Organisation météorologique mondiale

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH-1211 Genève 2 – Suisse

Bureau de la communication et des relations publiques

Tél.: +41 (0) 22 730 83 14 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Courriel: cpa@wmo.int

www.wmo.int