

Prévision numérique

MésosNH

Un modèle à maille très fine

Avec le modèle Aladin et sa maille de 10 km, Météo-France a atteint la limite en termes de résolution de ce qu'il est possible de faire avec les modèles actuels de prévision du temps. Pour plus de précision, comme ici dans cette étude sur le mistral, il faut utiliser des modèles plus complexes, appelés « non hydrostatiques », beaucoup plus coûteux en temps de calcul.

Lors de chaque épreuve transatlantique ou course autour du globe, le rôle du routeur météorologique « », qu'il soit à terre ou embarqué, est largement mis en avant. Chargé de conseiller le skipper sur les meilleures options de cap à prendre en fonction des prévisions de vent des jours à venir, il est devenu un spécialiste des modèles numériques mis en œuvre par les services météorologiques. En revanche, les habitués de la régates autour de trois bouées, près des côtes, se sentent lésés. Ils aimeraient bien, eux aussi, pouvoir disposer des mêmes prévisions de vent, mais à l'échelle de leur plan d'eau, connaître à l'avance les bascules de vent, la force et l'emplacement des risées, l'évolution des zones de calme. Pourquoi Météo-France peut-il fournir aujourd'hui des données de vent prévu sur le globe entier, mais pas des valeurs équivalentes adaptées à la navigation côtière ? Pour avoir un début de réponse à cette question, il faut savoir comment fonctionne un modèle

de prévision numérique et comprendre une notion de base : la grille du modèle et sa maille associée, un empilement de petits cubes. Le principe théorique de la modélisation de l'atmosphère est simple et connu depuis fort longtemps : l'air est un fluide dont les mouvements sont régis par les lois physiques classiques. L'application des équations traduisant ces lois permet, sous réserve que l'on dispose d'un état précis de l'atmosphère à un moment donné, de calculer une évolution prévue.

On s'en doute bien, le passage du principe à la pratique recèle un certain nombre de difficultés importantes, la première étant la diversité de taille des éléments à gérer dans le modèle. En effet, on devrait théoriquement simuler tous les mouvements atmosphériques, des ondes planétaires plusieurs milliers de kilomètres de longueur d'onde à la particule de quelques microns de diamètre, ce qui est inextricable. Le problème est résolu en appliquant les

1 - Domaine de présentation des résultats. Les isolignes représentent les courbes du relief pris en compte par le modèle. Les triangles noirs situent or principaux sommets d'altitude supérieure à 500 mètres. En rouge, les points de mesures météorologique



équations sur un maillage tridimensionnel de l'atmosphère ; c'est la grille du modèle. En clair, au lieu de prévoir le mouvements de chaque particule d'air, on va simuler l'évolution des paramètres atmosphériques en quelques points prédéterminés de l'espace, en postulant que l'évolution en chacun de ces points sera représentative de celle du cube atmosphérique les entourant. On appellera maille du modèle la distance entre deux points voisins de la grille ainsi définie. Avantage de cette méthode : on ne doit plus résoudre explicitement que les phénomènes d'échelle supérieure à la maille du modèle. Pour tous ceux qui sont d'échelle inférieure, on utilisera ce que l'on appelle des paramétrisations. C'est-à-dire qu'on se contente d'évaluer l'impact des phénomènes de plus petite échelle sur chaque maille du modèle. Par rapport à un calcul exact, c'est une simplification très notable. Les modèles qui fournissent les données utilisées par les routeurs météorologiques sont des modèles « globaux », c'est-à-dire couvrant la surface du globe. Ils ont une taille de maille de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, ce qui rend possible quelques simplifications supplémentaires dans les équations. L'une des plus courantes consiste à considérer que les vents horizontaux sont toujours supérieurs d'un ordre de grandeur aux vitesses verticales. On peut ainsi négliger dans les équations tous les termes liés aux accélérations verticales. Cette hypothèse est appelée hypothèse hydrostatique¹. Elle permet d'économiser nombre de calculs complexes et d'accélérer leur résolution dans des proportions énormes. Pour des modèles globaux, elle est très bien vérifiée : dans un secteur chaud de perturbation (dimension de l'ordre de 500 kilomètres), les vitesses verticales moyennes sont de quelques centimètres par seconde alors que les vents horizontaux atteignent plusieurs dizaines de mètres par seconde.

Toute hypothèse a ses limites

À ce stade et pour en revenir à notre problème initial - les prévisions à l'échelle d'un plan d'eau -, on peut penser en toute bonne foi que pour augmenter la précision des prévisions, il suffit de diminuer la taille de maille du modèle jusqu'à atteindre l'échelle voulue. Ce serait sans compter sur plusieurs facteurs, au premier rang desquels se trouve cette fameuse hypothèse hydrostatique. À partir d'une taille de maille inférieure à dix kilomètres environ, l'hydrostatisme est en défaut. Dans un nuage d'orage par exemple, dont le tube d'ascendance mesure quelques dizaines de mètres de diamètre, les vitesses verticales atteignent fréquemment 10 à 20 m/s et sont largement comparables aux vitesses du vent horizontal. Il faut donc, pour pouvoir faire des prévisions correctes à une échelle inférieure à sept ou huit kilomètres,

réintégrer l'évolution de la vitesse verticale dans les équations de base du modèle.

Mais d'autres facteurs interviennent également. Par exemple, un modèle global prend en compte l'eau dans l'atmosphère sous trois formes : vapeur d'eau, eau liquide et glace. À plus petite échelle, il devient indispensable de raffiner cette représentation. Ainsi, l'eau liquide aura deux formes distinctes : goutte de pluie ou eau nuageuse. La glace en aura même trois : grêlon, flocon de neige ou cristal de glace. Pour chaque forme, le comportement physique sera différent.

Ce raffinement dans la modélisation des phénomènes physiques est le corollaire inévitable d'une réduction de la maille d'un modèle. L'exemple le plus frappant reste celui de la représentation du relief. Pour un modèle global, des entités géographiques comme la montagne Sainte-Victoire, les calanques ou la vallée de la Durance n'existent pas. Seul, un modèle à petite échelle pourra les prendre en compte d'une manière approchée et ce d'autant mieux que sa maille est petite. On imagine sans peine qu'une représentation réaliste du relief est capitale pour la prévision fine des conditions météorologiques locales, mais cela a un inconvénient majeur : le coût en temps de calcul. En général, la diminution de la taille de la maille oblige à augmenter également le nombre de niveaux sur la verticale et à diminuer le « pas de temps² » du modèle, d'où des temps machine qui s'envolent. Une réduction par deux de la distance de maille peut conduire à une multiplication par 16 du temps de calcul.

Une maille de 500 mètre

jusqu'à ces dernières années, nous ne disposions tout simplement pas de la puissance de calcul nécessaire pour permettre une réduction significative de la maille. Les progrès des calculateurs scientifiques ont rendu petit à petit envisageable la prise en compte des modifications sous-jacentes. Depuis environ sept ans, Météo-France travaille dans cette voie, sous plusieurs formes. L'une d'entre elles, conduite en partenariat avec un laboratoire du CNRS, a abouti à l'écriture d'un programme informatique appelé MésoNH (acronyme pour modèle à Méso-échelle Non Hydrostatique).

Ce nouveau modèle de prévision, capable de travailler avec des mailles de quelques

centaines de mètres (et même moins dans certains cas spécifiques) n'est pas encore un outil opérationnel. Il est pour le moment utilisé pour des applications de type recherche : reconstitution de cas idéalisés, cas réels ciblés sur la simulation de tel ou tel phénomène. Au Centre météorologique d'Aix-en-Provence, nous avons voulu tester les capacités du modèle à simuler des écoulements à très petite échelle. Nous avons pour cela décidé de traiter un phénomène courant des régions méditerranéennes, le mistral, sur un domaine bien précis, le massif des Maures. La maille du modèle utilisé a été fixée à 500 mètres, ce qui permet une excellente représentation du relief et une prévision très précise (à comparer aux 8 km des modèles opérationnels les plus fins à l'heure actuelle). Notre domaine d'étude comprend toute la côte entre la presqu'île d'Hyères et le cap Camarat. C'est sur cette zone maritime (voir figure 1) que nous allons détailler les résultats.

Représentation du relief dans les modèles

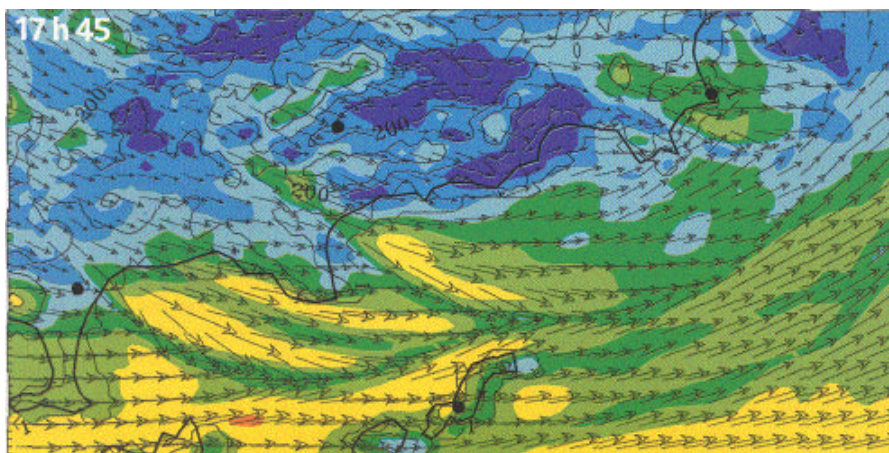
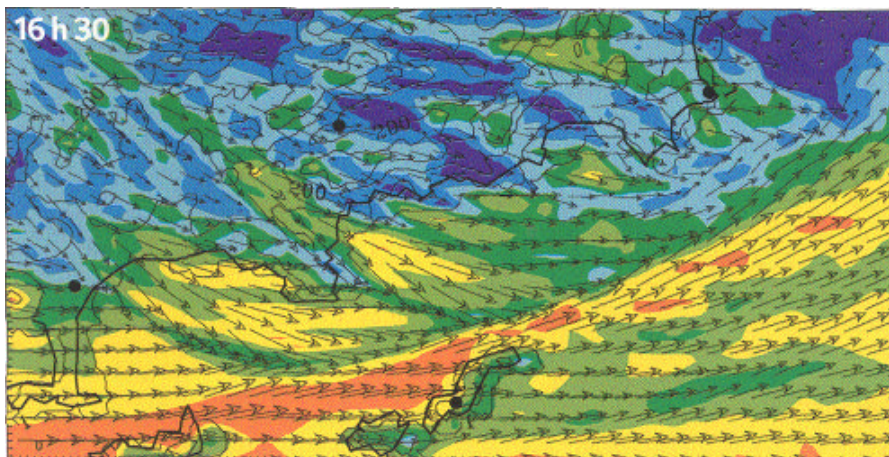
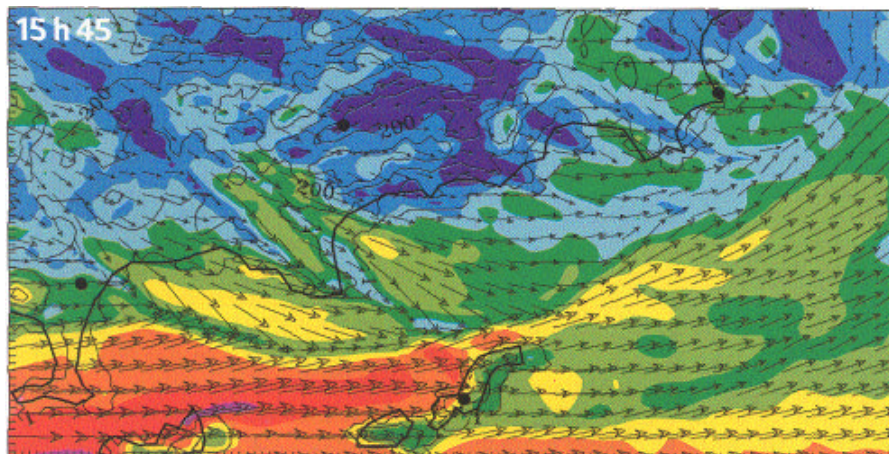
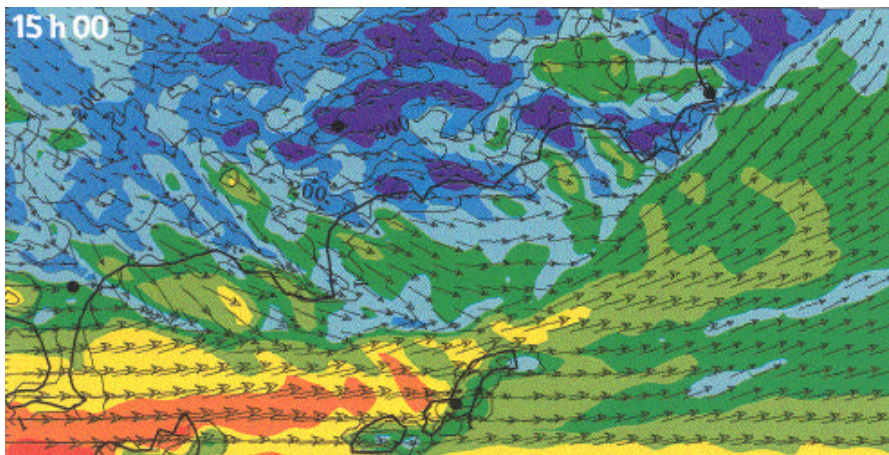
Dans les modèles numériques de climat et de prévision du temps, les mailles larges ne permettent pas de représenter correctement les effets des chaînes de montagne. La hauteur du relief affectée en chaque point de grille du modèle est en fait une hauteur moyenne sur la maille. Or, en moyennant les hauteurs, on lisse le relief, vallées et sommets disparaissent, ce qui n'est pas sans conséquence sur les prévisions, notamment du vent. Pour mieux représenter les effets du relief, on a alors recours à des paramétrisations (ou représentation implicite. Il existe plusieurs types de méthodes. L'une consiste à surélever artificiellement la montagne vue par le modèle. Une autre consiste à définir une forte rugosité (coefficient de frottement) pour les mailles contenant des montagnes. La campagne de mesure Pyrex effectuée autour des Pyrénées en octobre-novembre 1990 a permis de mieux cerner les valeurs de rugosité à affecter aux mailles montagneuses.

(Extrait de l'article *Les résultats de Pyrex, La Météorologie*, n° 16, décembre 1996)

1. En fait, l'hypothèse hydrostatique ne supprime pas les mouvements verticaux. Elle se contente de supposer que les vitesses verticales n'évoluent que « lentement » dans le temps et donc que l'accélération verticale peut être considérée comme nulle.

2. Pas de temps : intervalle de temps entre deux états successifs calculés par le modèle.

Simulation du 28 juillet 1998



Le 28 juillet 1998, un thalweg d'altitude passe sur la France et s'éloigne vers la péninsule italienne. À l'arrière, un flux d'altitude de direction générale 300° s'établit, créa toutes les conditions d'une situation de mistral « classique ».

Pour étudier le comportement du mistral nous avons fait une simulation MésoNH entre 15 h et 19 h, et nous avons obtenu des cartes prévues tous les quarts d'heure. On présente ci-après les cartes du vent à 10 mètres de hauteur prévues toutes les 45 minutes entre 15 heures et 18 heures 45. L'examen des cartes montre que le vent est très contrasté en force, mais aussi en direction. Des zones de vent fort évoluent assez rapidement, tout en restant néanmoins sur des axes privilégiés. Ces axes de vent fort prennent fréquemment une forme « en éventail ».

Tout au long de la simulation, le modèle maintient trois principaux « tubes » de vent fort.

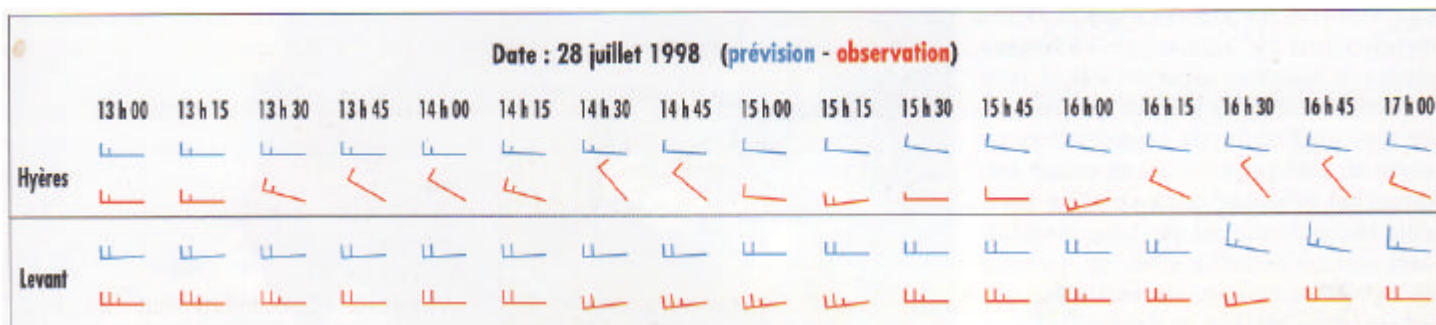
- Le premier se situe dans la rade d'Hyères au débouché de la vallée du Gapeau. Il a une direction ouest-nord-ouest. Il se renforce et s'étend dans l'après-midi tandis que le noyau maximum de vent se déplace vers l'est et atteint l'île du Levant en fin de période.
- Le deuxième se trouve entre le cap Bénat et le Lavandou, à l'aplomb du port de Bormes. Il a une direction ouest-nord-ouest. Comme le précédent, il tend à se renforcer et à se

déplacer vers l'est dans l'après midi en tournant légèrement à l'ouest.

- Plus au large, juste au nord des îles d'Hyères, une ligne de vent fort assez étroite, de direction générale ouest-sud-ouest, s'engage dans le chenal entre Giens et Porquerolles, frôle les côtes nord du Levant et se prolonge jusqu'au large du cap Camarat. En début de simulation, c'est de loin le tube de vent le plus fort et le plus étendu. Le noyau de vent maximum renforce dans la première heure en progressant vers l'est ; il faiblit ensuite progressivement, s'effondre à partir de 17 heures en régressant vers le

2 - Vent prévu par le modèle MésoNH le 28 juillet 1998, de 15 h à 18 h locale. La direction du vent est représentée par une flèche et sa vitesse (en m/s) par des plages de couleur (voir échelle).

Par flux général de nord-ouest (type de temps à mistral), on remarque la veine de vent fort en jaune et rouge au nord des îles d'Hyères, qui s'étend vers l'est au cours de l'après-midi, puis les zones de vent fort dans la rade d'Hyères et devant le Lavandou qui se forment un peu plus tard. Le long des lignes de convergence de ces trois axes de vent fort, on note des rotations du vent de plus de 40° en moins d'un kilomètre.



3 - Comparaison des vents prévus par MésóNH (en bleu) et mesurés par les sémaphores d'Hyères et du Levant (en rouge). Les heures sont en UTC

sud, pour pratiquement disparaître à partir de 18 h.

L'existence de ces zones de vent bien individualisées a une conséquence logique : au point de rencontre de deux zones contiguës, il y a une forte confluence, la direction du vent changeant alors de plus de 40° en moins d'un kilomètre. Cette situation est particulièrement marquée au nord de l'île du Levant, où il y a rencontre des trois axes de vent fort précédemment cités. De même, la zone de contact entre l'axe de la rade d'Hyères et celui de Porquerolles est permanente tout l'après-midi et crée une limite très nette de vent plus faible.

On peut noter l'existence de zones déventées sous le vent des îles de Porquerolles, de PortCros et du Levant. Le même phénomène s'observe sur l'étroite bande côtière au sud de la corniche des Maures, entre Le Lavandou et Cavalaire.

Une réalité... un peu différente

Les cartes de vent obtenues avec MésóNH sont tout à fait plausibles. Pour s'assurer qu'elles sont justes, nous les avons comparées aux mesures faites le même jour sur le littoral, en deux points: Hyères et Le Levant.

La figure 2 donne les évolutions comparées de la mesure du vent météorologique et de la

prévision MésóNH au point de grille le plus proche. Son examen montre un comportement qualitatif des prévisions très correct sur les deux stations. Le vent à la station du Levant est sous-estimé par le modèle (de 2,1 m/s en moyenne sur l'après-midi), mais la tendance globale à la baisse en fin de journée est bien vue. La sous-estimation est probablement due aux différences entre le relief réel le sémaphore du Levant est à une altitude de 130 mètres - et le relief du modèle MésóNH qui culmine pour sa part à cet endroit à 58 mètres. Pour le site d'Hyères, la force du vent est bien vue par le modèle (l'erreur moyenne est inférieure à 1 m/s), mais une première bascule du vent au secteur nord-ouest n'est pas prévue par MésóNH. Ceci tient sans doute au fait que la station d'Hyères est toujours très proche de la zone de rencontre entre le flux d'ouest venant de la mer et le vent d'ouest nord-ouest débouchant de la vallée du Gapeau. Alors que le modèle fait gagner progressivement le flux d'ouest nord-ouest vers le sud, il y a probablement dans la réalité un premier décalage vers le sud de la limite des deux flux, puis une remontée vers le nord suivie d'un second décalage vers le sud. Ainsi, même si le vent au point de la mesure n'est pas complètement bien rendu, la structure de fine échelle prévue par MésóNH permet d'expliquer de manière convaincante les évolutions du vent observé.

Peut-on dire, au vu de ces résultats somme toute satisfaisants, que la partie est gagnée et que Météo-France pourra demain fournir des prévisions de vent tous les 500 mètres aux plaisanciers désireux d'aller passer une journée à Port-Cros ? La réponse est malheureusement non. Il y a en premier lieu les considérations liées au temps de calcul. Quand on saura que pour faire les quatre heures de prévision présentées ici, il aura fallu une journée entière de calcul - vous avez bien lu, 24 heures - sur l'un des ordinateurs les plus puissants de France, on conviendra qu'il reste encore du travail pour rendre ces méthodes opérationnelles. Mais au-delà de ces problèmes « matériels » qui finiront sûrement par trouver une solution dans les années à venir, il reste des questions plus fondamentales en suspens. La précision atteinte par ces modèles est telle que la vérification de la qualité des valeurs fournies devient une gageure. Il faudrait pratiquement un point de mesure par point de grille du modèle pour pouvoir conclure de façon définitive, au lieu des deux points de mesure disponibles actuellement. Comment dans ces conditions savoir si la position des axes de vent fort et leur évolution au cours du temps sont exactes ou connaître les marges d'erreur commises ?

Pour autant, il y a des espoirs très sérieux, à moyen terme, de voir les modèles à très petite échelle gagner encore en précision et devenir peut-être des outils opérationnels. L'augmentation de la puissance de calcul disponible va sûrement se poursuivre et permettre des avancées significatives sur le temps de production des prévisions. Des campagnes de mesures spécifiques vont fournir des données à une échelle suffisante pour comparer les résultats de ces modèles à la réalité et permettre ainsi de raffiner la modélisation des phénomènes physiques les plus délicats: turbulence, convection, etc. Il n'est dès lors pas exclu, dans quelque dix à quinze ans, de voir se créer un nouveau métier : routeur météorologique sur triangle olympique, pour lequel les variables à ajuster ne se situent pas aux échelles d'un océan et de la journée, mais d'un plan d'eau et de la minute.

