

**CONSEQUENCES METEOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES DE L'ECHELLE
SPATIALE DE PRISE EN COMPTE DU RELIEF, ET DU CALCUL, DANS LES
MODELES NUMERIQUES.
EXEMPLES AVEC GFS, GEM, BOLAM, MM5, NMM WRF, RAMS.**

Pierre CARREGA, Christophe YOHIA

Equipe GVE, UMR ESPACE. Université de Nice.
carrega@unice.fr

Introduction

Les modèles numériques météorologiques sont des outils puissants par leur base physique, et leur couverture spatiale. Ils fournissent les éléments d'une compréhension améliorée des situations météorologiques, et sont remarquables par leur capacité à délivrer des données non directement mesurables ou difficiles à interpoler.

Ce sont donc des outils très complexes, nécessitant des entrées parfois non mesurées et donc avec beaucoup de paramétrisation, et qui donnent lieu à de nombreux réglages, auxquels ils sont parfois très sensibles.

Une question majeure se pose alors, qui est de savoir jusqu'à quel point on peut leur faire confiance, ce qui pose l'éternel problème récurrent de la validation, une obligation qui devrait être obsessionnelle. Et ce, d'autant plus que l'échelle spatiale devient fine, puisque les conséquences humaines se durcissent au fur et à mesure que l'on se rapproche du niveau d'activité quotidienne de l'homme.

Dans un premier temps, quelques exemples d'influence du relief sur le climat et la météorologie seront rappelés, puis les effets de l'outil modèle sur le relief modélisé (MNT, soit Modèle Numérique de Terrain) seront évoqués. Enfin des exemples d'erreurs générées par les modèles météorologiques associés aux MNT seront décrits.

1- EFFETS DU RELIEF SUR LA METEOROLOGIE ET LES CLIMATS (RAPPEL).

1.1. Sur les températures.

Les effets du relief sur les températures ont fait l'objet de maintes descriptions et études, parmi lesquelles le comportement des inversions thermiques favorisées en particulier par les longues nuits d'hiver est souvent mis en avant. Ainsi le brouillard de fond de vallée en fin de nuit (fig.1).



Figure 1. Brouillard et inversions dans vallées (Préalpes de Grasse) au lever du soleil.

En journée, le gradient normal de température se rétablit, et montre une décroissance thermique avec l'altitude, bien visible sur le champ thermique issu du modèle MM5 pour la Corse, peu avant la mi-journée : le froid s'accroît avec l'altitude (fig. 2).

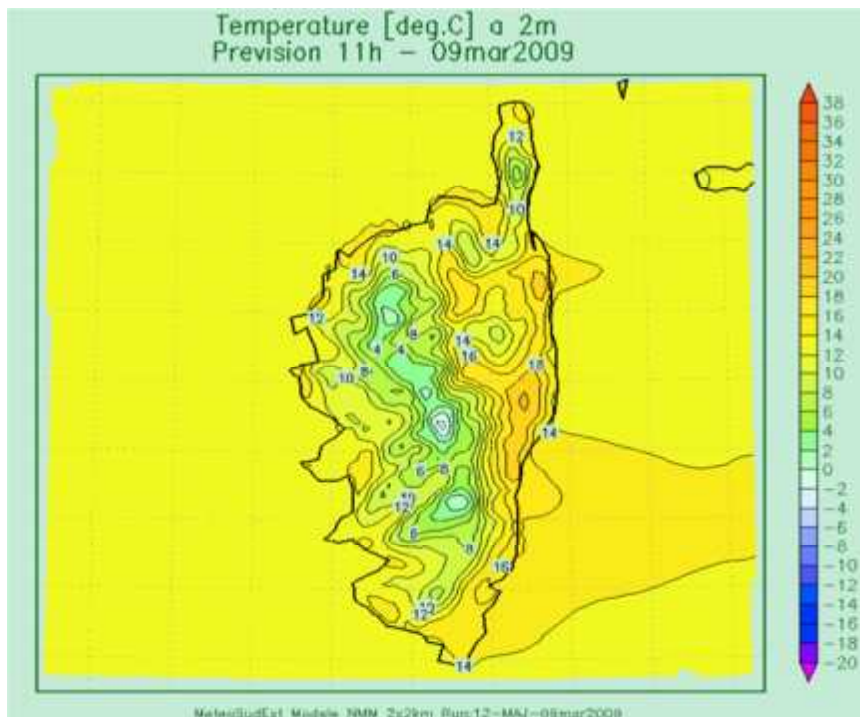


Figure 2. Température modélisée par MM5 sur la Corse, en milieu de journée. Relations avec le relief et l'altitude. Source : www.meteosudest.org

1.2. Sur la circulation et le vent.

Un effet célèbre du relief sur l'écoulement des fluides et l'effet Venturi provoqué par le resserrement des couloirs topographiques, comme la vallée du Rhône pour le Mistral, ou le seuil du Lauragais pour la Tramontane (fig. 3).

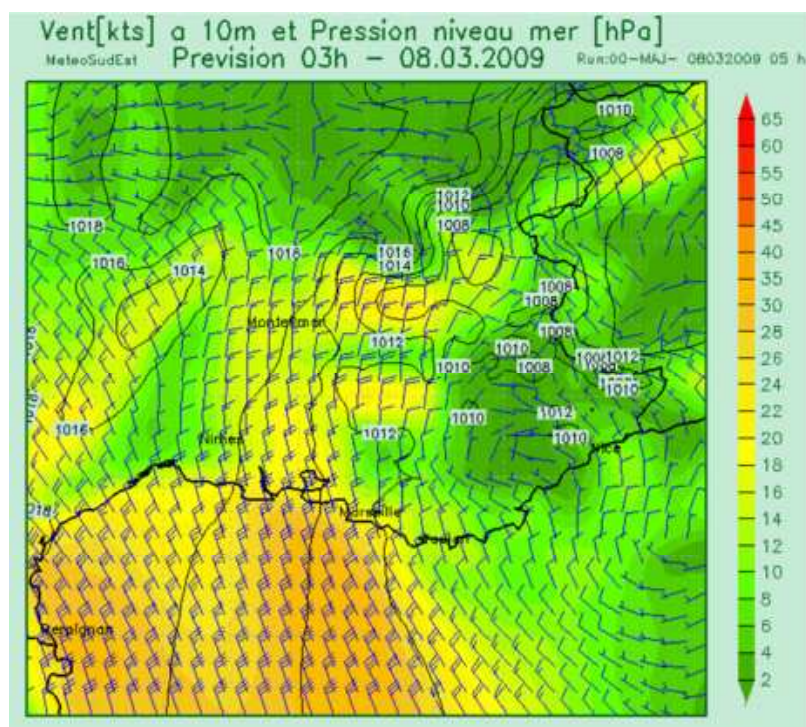


Figure 3. Mistral et Tramontane. Exemple du dimanche 8 mars 2009, avec le champ de vents prévus par le modèle MM5. Source : www.meteosudest.org

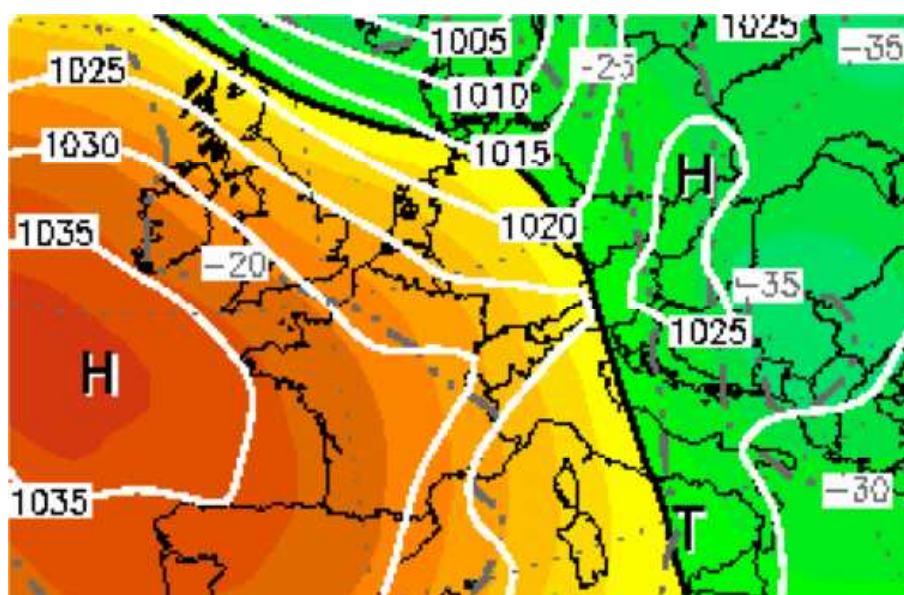


Figure 4. Effets modélisés (GFS) du relief sur la circulation atmosphérique au niveau 500 hPa et en surface le 21 février 2009 à 06h pour le 22 (échéance 24 h). Source : www.wetterzentrale.de

Un autre exemple de l'influence du relief est le classique blocage qu'il exerce sur la circulation atmosphérique, avec une hausse de pression au vent du relief, et la naissance d'une dépression dynamique sous le vent. La figure 4 montre ainsi un écoulement de N à NNW sur les Alpes vers 5500m (500 hPa), s'effectuant sans gêne, puisque bien au-dessus des montagnes (plages couleur). Au contraire, en surface, l'air vient s'accumuler au vent des Alpes, ce qui crée une dorsale (isobares blancs) sur la Suisse, alors que la pression diminue sur le golfe de Gênes, sous le vent des Alpes.

1.3. Sur la nébulosité et les précipitations...

Les oppositions de versants au et sous le vent se vérifient également pour ce qui concernent les blocages nuageux et mêmes pluvieux exercés par l'orographie. La figure 5 montre une nébulosité convective sur la face Est du Cap Corse (par flux d'E), coté ascendant, tandis que sous le vent (face W), le flux subsident évapore, ce qui disperse les nuages.



Figure 5. Blocage orographique par vent d'est sur la côte Est du Cap Corse (vue d'avion vers le nord).

La figure 6 montre un nuage lenticulaire par temps de Libecciu, sur la plaine Corse orientale (vue vers le Sud). Ce nuage d'onde est créé par les ondulations se perpétuant en aval d'un relief-obstacle (les hauts sommets).

Les alternances d'ascendances au vent, suivies de subsidence sous le vent, à cause de la mécanique ondulatoire, peuvent se traduire par des bandes d'inégale pluviométrie, perpendiculaires au flux. Ainsi, en figure 7, le flux de NW provoque de fortes pluies sur le versant français du Jura (lorsqu'il est soulevé), suivies d'absence de précipitations sur le versant Suisse du Jura (sous le vent), puis à nouveau de précipitations importantes sur les Préalpes Suisses, au vent, et d'absence de pluie du côté italien des Alpes (subsident sous le vent).

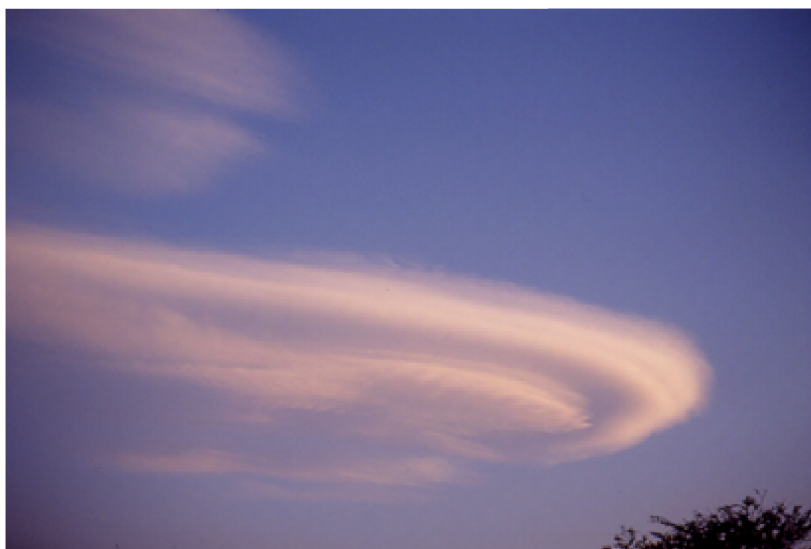


Figure 6. Alto-cumululus lenticularis et Foehn en Corse orientale, juillet 1991

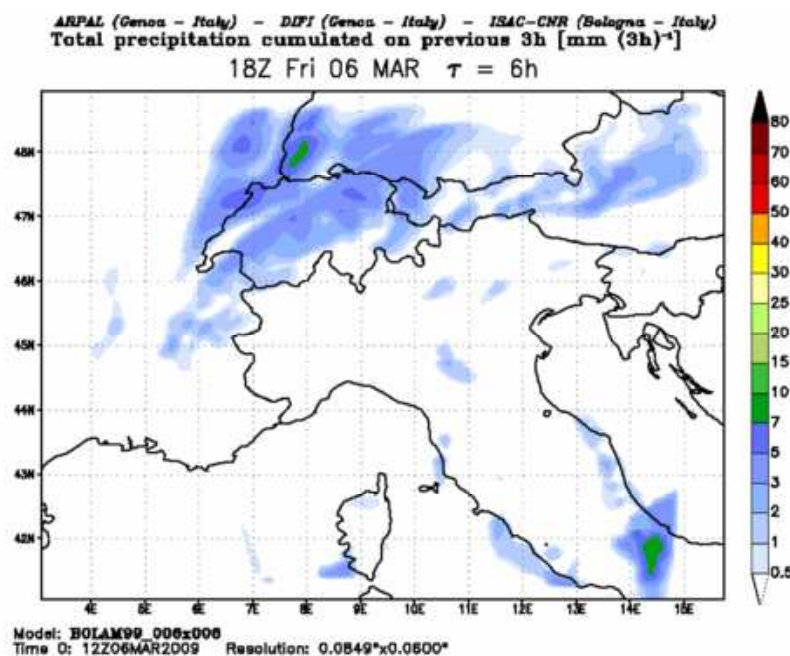


Figure 7. Modélisation des précipitations prévues par BOLAM sans un flux de nord-ouest.
Source : www.meteoliguria.it

Ces quelques exemples montrent aisément le poids des facteurs géographiques sur certains aspects climatiques, exacerbé dès que le relief s'affirme.

2- EFFETS DE L'OUTIL MODELE.

2.1. Rappel sur les modèles pronostiques :

Les modèles météorologiques dont il est ici question sont capables de générer une situation à un moment donné qui sera le point de départ (l'initialisation) pour le calcul de la nouvelle situation, un pas de temps plus tard, qui deviendra à son tour un nouveau point de départ pour un nouveau calcul, etc. ils sont dits « pronostiques » dans la mesure ils initialisent

une évolution, et rendent donc possible une prévision, par opposition aux modèles « diagnostiques » capables seulement d'une analyse à un moment donné. En résumé, il s'agit de modèles pronostiques dans lesquels le temps (time) est incrémenté : le « run » de $t + i$ sert de base au calcul de $t + (i+1)$

Toutefois, cette mécanique itérative de construction de l'atmosphère trouve ses limites dans le temps du fait de la non-linéarité des équations utilisées, et de l'approximation de l'état initial de l'atmosphère au départ du calcul. D'où la confiance toute relative qui s'impose pour des échéances de plus de 8-10 jours (et parfois moins).

Les 3 principales familles de lois physiques concernées, régies par des équations sont : la thermodynamique, la quantité de mouvement, et la conservation de la masse.

Le mode de fonctionnement de ces modèles peut consister en du « one-way » (le modèle tourne une fois, et ses « sorties » constituent les recherches), ou en du « nesting » dans lesquels les sorties d'un « modèle » servent à nourrir un autre modèle, ou le même modèle appliqué à un espace différent, en principe plus petit, constituant ainsi un « downscaling ».

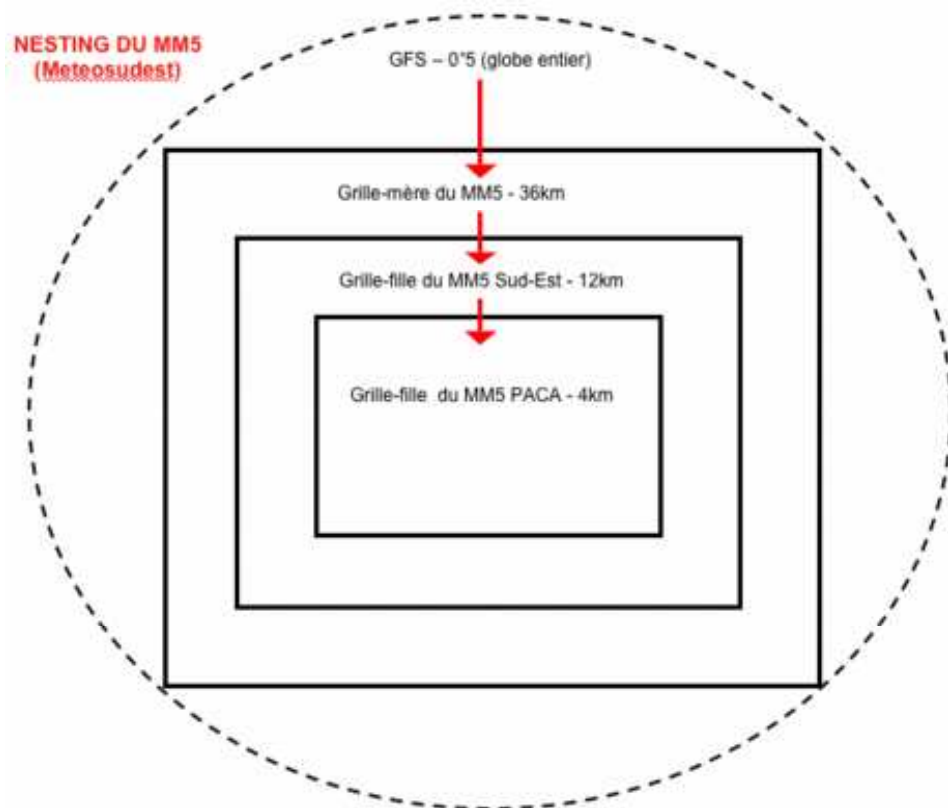


Figure 8. Exemple de « nesting » : les sorties de modèle à petite échelle (sensu stricto) servent d'entrée au modèle à plus grande échelle.

Par ailleurs on observe une différence fondamentale entre, d'une part les modèles hydrostatiques où la variation verticale de pression est liée à la variation de masse volumique expliquée seulement par la température, et à la gravité ; et d'autre part, les modèles non-hydrostatiques où la variation verticale de pression n'est plus liée à la variation de masse volumique. Elle repose sur la résolution des mouvements verticaux pouvant ainsi simuler la convection de petite échelle et les phénomènes de méso-échelle telles que les brises.

2.2. Les contraintes d'utilisation, les réglages, les problèmes.

Dans la représentation de l'espace, le terme de « maille » peut s'appliquer à deux domaines qu'il ne faut pas confondre : la résolution (c'est à dire la distance séparant les points situés sur la grille) du MNT et la résolution du calcul météorologique. Outre la nécessité absolue d'utiliser une maille topographique devant toujours être inférieure à la maille du calcul météorologique, d'autres impératifs existent, concernant la prise en compte du relief, ou ses interférences avec le modèle météorologique.

La quantification de nombreux paramètres oblige à des choix, et certains entrées de modèles ne proviennent pas de données mesurées, ou bien ne sont pas toujours en adéquation d'échelles avec la finesse météorologique souhaitée, comme, par exemple l'occupation du sol, la rugosité, le profil vertical de vitesse du vent, etc

2.2.1. Filtrer la topographie

Le MNT utilisé par un modèle est obligatoirement soumis à filtrage, ce qui aboutit à une simplification de la topographie réelle allant dans le sens du lissage (fig. 9).

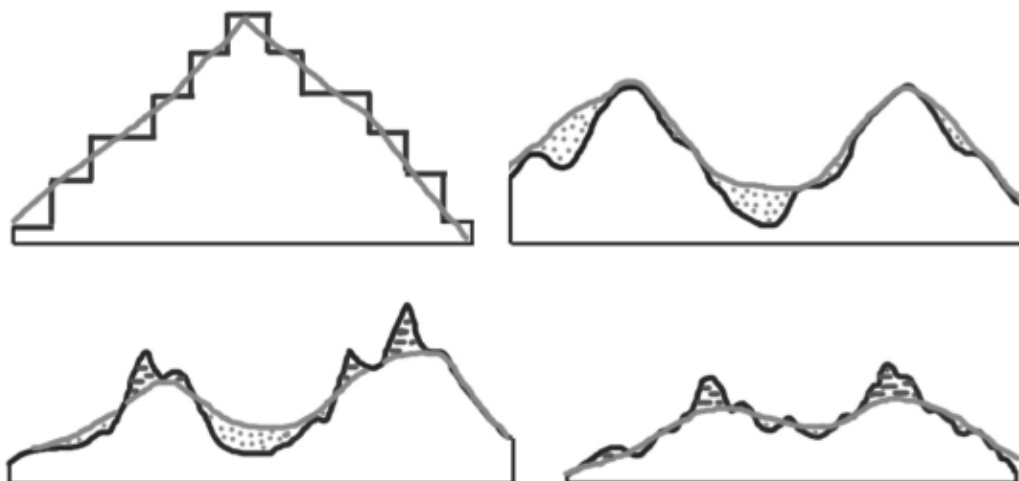


Figure 9. Exemple de filtrage (lissage) du relief, avec, successivement : diminution des effets d'escalier, comblement des dépressions, gommage des reliefs, effet résultant dominant : atténuation du relief.

Cette atténuation du relief aboutit à une « transformation » du paysage topographique, ce qui a des conséquences parfois non négligeables sur la prévision de différentes variables climatiques sur un point donné, et ce, à toutes les échelles (fig. 10, 11, 12).

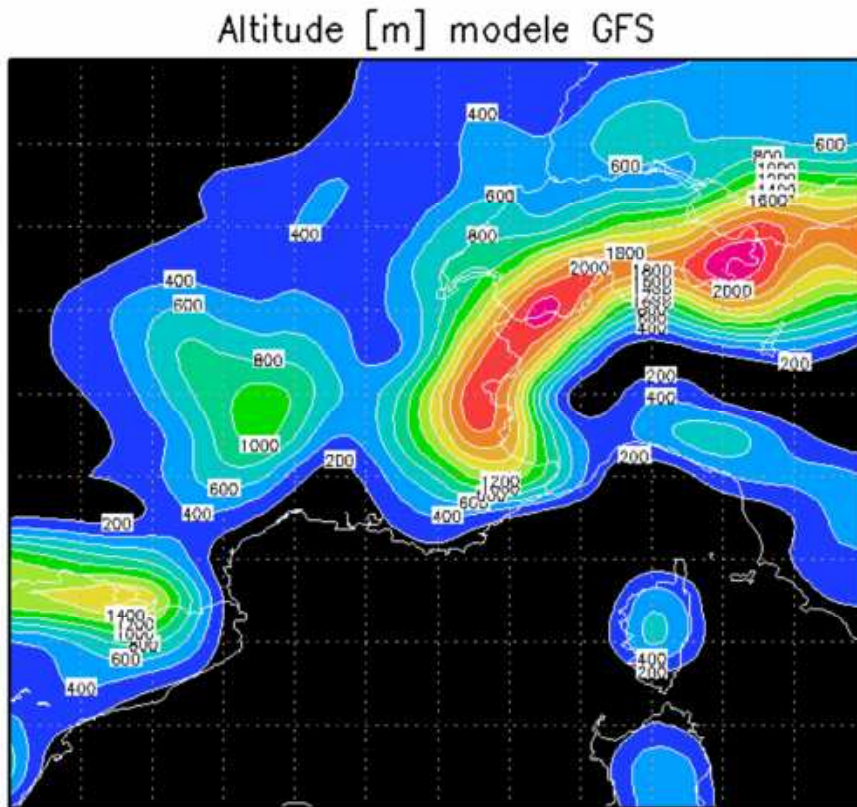


Figure 10. Le MNT du GFS planétaire

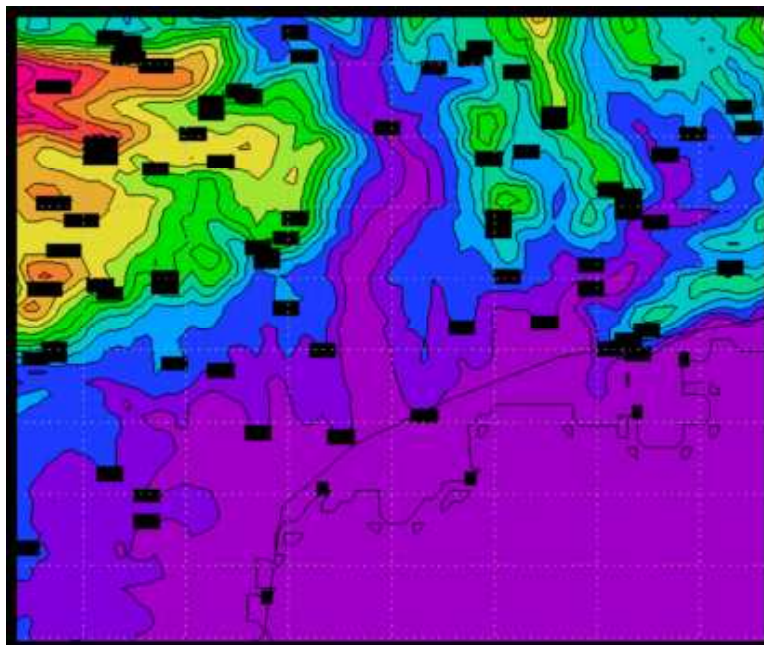


Figure 11. Topographie brute de la région niçoise (maille 130 m) issue du MNT. La vallée principale au centre est celle du Var. En bas, le trait de côte. La carte d'étend sur 26km en longitude, et le nord est en haut.

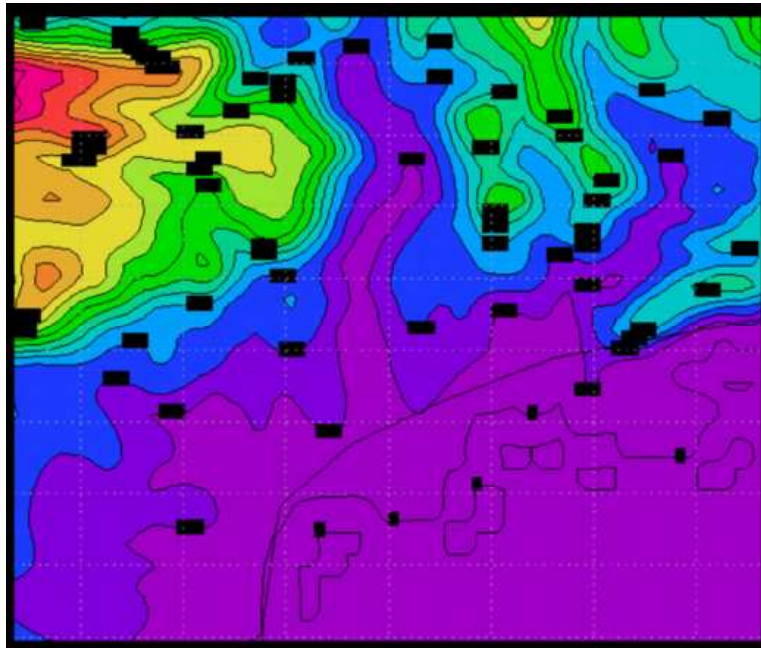


Figure 12. Topographie filtrée de la région nîcoise (maille 130 m) à partir du même MNT.

2.2.2. Filtrer les diverses ondes générées par la physique du modèle, ou par son traitement informatique.

Diverses ondes sont créées par un modèle, qu'il va falloir plus ou moins éliminer par filtrage selon leur nature, d'autant que leur présence entraîne des problèmes particulièrement localisés aux frontières spatiales, lorsqu'elle est indésirable.

- Des ondes « acoustiques » : assez régulières, où la vitesse d'une crête est égale à celle d'un groupe de crêtes.
- Des ondes de gravité : liées au relief et à la stabilité de l'air, à ne pas trop filtrer dans les modèles d'échelle régionale ou locale, pour conserver le rôle de la topographie locale (fig. 13).
- Des ondes planétaires, à conserver dans les modèles globaux, car elles expriment la circulation générale (Ondes de Rosby).
- Des ondes numériques, qui ne sont qu'un artefact informatique, à éliminer impérativement...

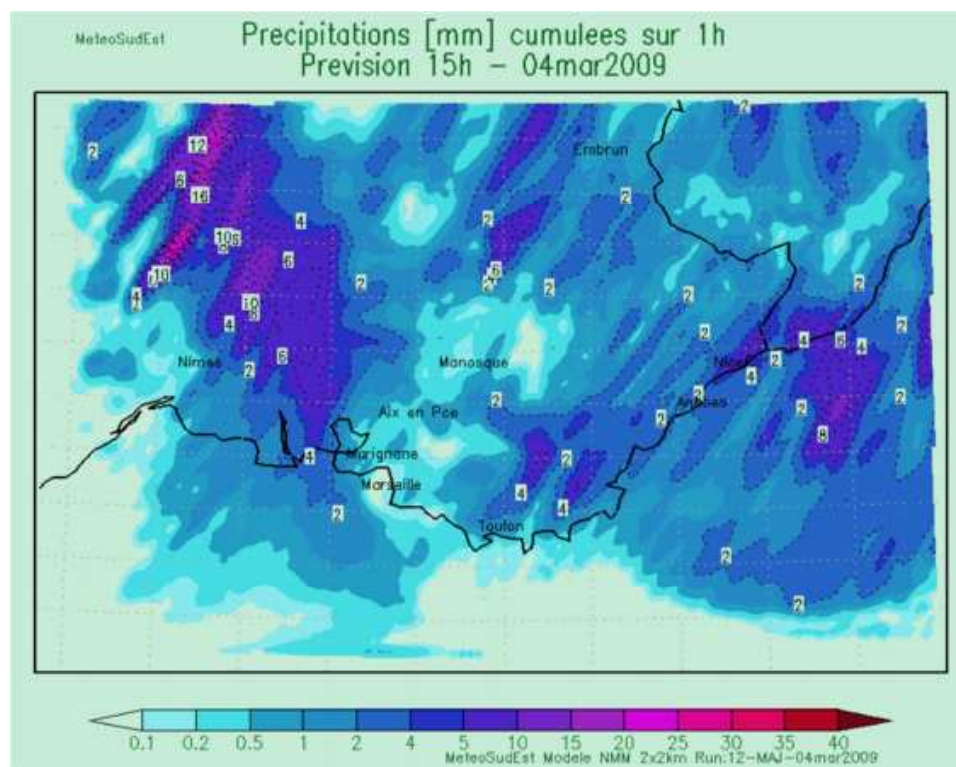


Figure 13. Exemples d’ondes de gravité visibles dans la prévision des précipitations sur la région PACA à échéance +3 heures (modèle NMM du WRF). Source : www.meteosudest.org

2.2.3. Choisir un type de coordonnées σ (sigma) pour l’altitude.

Les concepteurs des modèles font toujours un choix dans la prise en compte de l’altitude, qu’il vont représenter à l’aide de « coordonnées σ ». L’un des objectif recherché étant la gestion d’un flux, par exemple situé au niveau du géopotentiel 850 hPa (à une altitude standard d’environ 1500m) lorsque le relief atteint 3000m...

Il existe ainsi plusieurs options possibles :

- Les coordonnées $\sigma = Pa / Pa_{surf}$:

avec

P_a = pression de l’air à une altitude donnée

$P_{a_{surf}}$ = pression de l’air en surface

But : faire en sorte qu’aucun flux ne bute sur un relief,

Inconvénient : il faut ensuite convertir les coordonnées σ d’un « run » en coordonnées pression ou altitude.

L’atmosphère est ainsi découpée verticalement en plusieurs dizaines de niveaux σ séparant des couches d’épaisseur variable, d’autant plus minces que le relief est élevé (fig. 14).

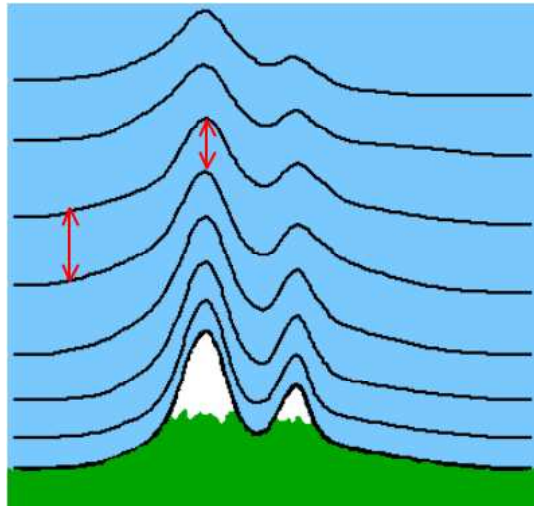


Figure 14. Les coordonnées $\sigma = Pa / Pa_{\text{surf}}$

- **Les coordonnées $\sigma - p$ (sigma-pressure) :**

Elles sont utilisées par les modèles hydrostatiques, et le modèle NMM-WRF.

- La base et le sommet du domaine sont considérés comme des surfaces constantes (mais pas l'épaisseur des couches).

$$\sigma = (Pa - Pa_{\text{top}}) / (Pa_{\text{surf}} - Pa_{\text{top}})$$

Avec Pa = pression de l'air à une altitude donnée,

Pa_{surf} et Pa_{top} = pression de l'air en surface et au sommet du modèle.

$$Pa = Pa_{\text{top}} + s (Pa_{\text{surf}} - Pa_{\text{top}})$$

- Au-dessus du sommet du domaine, seules sont utilisées des coordonnées pression.

Il en résulte une superposition de deux modes de représentation (fig. 15 et 16) :

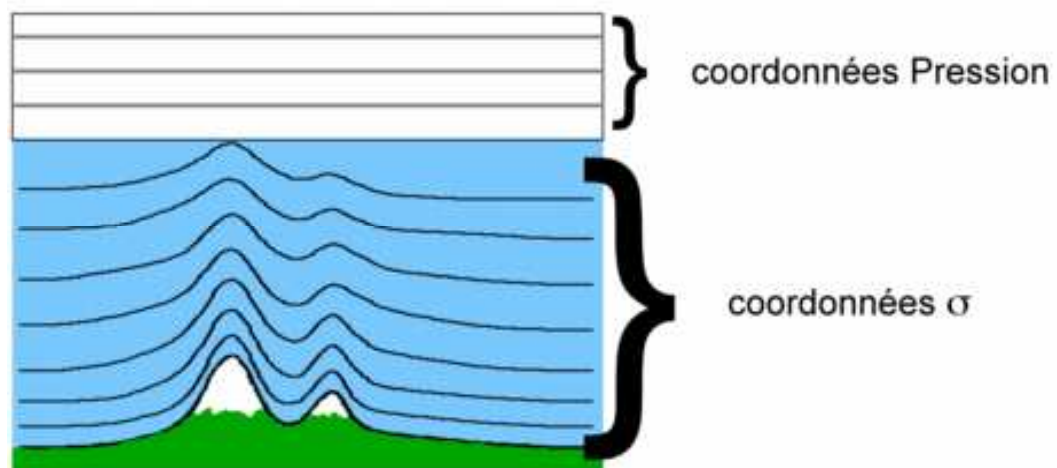


Figure 15. Les coordonnées $\sigma - p$ (sigma-pressure)

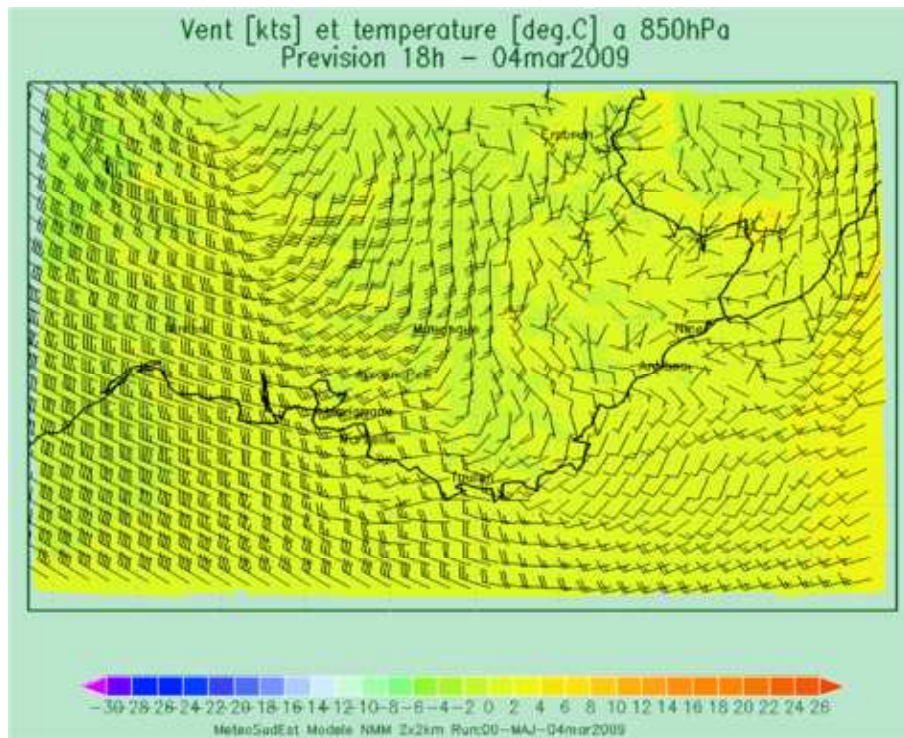


Figure 16. « Non-Masquage » du relief lié à l'utilisation des coordonnées sigma – pression (NMM WRF 2km).

- Les coordonnées s - z (sigma-altitude) :

Ici, l'épaisseur des couches est constante, et ce type est utilisé pour des modèles non-hydrostatiques comme MM5 ou RAMS, ou encore BOLAM (fig. 17).

$$\sigma = (Z \text{ top} - Z) / (Z \text{ top} - Z \text{ surf})$$

avec Z = altitude donnée,

Z surf et Z top = altitude au niveau du sol, et au sommet du modèle.

Z = Z top - s (Z top - Z surf)

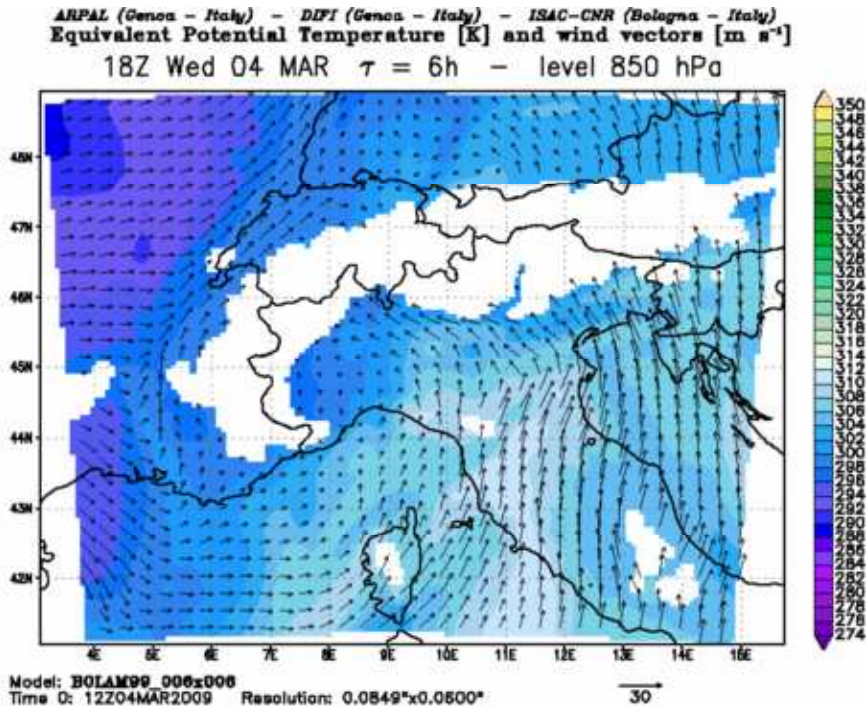


Figure 17. « Masquage » du relief lié à l'utilisation des coordonnées sigma – altitude (BOLAM 6,5km)

2.3. Les types de modèles

Les résultats d'un modèle varient selon l'échelle de la topographie, de la grille de calcul, et avec le filtrage des ondes. Le tableau I récapitule quelques exemples de choix opérés par deux grands modèles planétaires comme le GFS américain, ou le GEM canadien, ainsi que ceux du laboratoire de l'équipe GVE de l'UMR Espace, ou encore du site internet meteosudest.org.

Tableau I

MODELE	MNT	GRILLE	CALCUL	METEO	FILTRAGE D'ONDES
Hydrostatique					
GFS	30 sec arc (1km)	0°5	55km	planétaire	accoustique +++ gravité ++
GEM	30 sec arc (1km)	0°3	33km	planétaire	ondes numériques +++ *
Non- Hydrostatique					
MM5	2km (refuse 1km/PC)	SE 12km	(refuse < 1km)	idem avec PACA	4km gravité +
NMM WRF	30 sec arc (1km)	2km	(refuse < 1km)		idem avec gravité +
RAMS **	130m	2km,	et 500m jusqu'à 2m (« nesting »)		idem avec gravité +

* Les ondes numériques sont générées par le calcul, et augmentent si la grille de calcul devient trop fine par rapport au MNT

** Filtrage topographique possible, et obligatoire, sinon refroidit trop (dans la configuration retenue)...

3. EXEMPLES DE DIVERGENCES DE RESULTATS SELON L'ECHELLE.

3.1. Sous estimation des précipitations, due à une topographie trop simplifiée.

La figure 18 est un bon exemple d'erreur -spatialement étendue- de prévision de précipitations par un modèle (GFS), liée à une mauvaise prise en compte du relief. Le GFS annonce, à seulement 24h d'échéance, des précipitations cumulées en 6 heures nettement inférieures à 10 mm sur l'essentiel des Alpes-Maritimes entre minuit et 6h le 7 janvier 2009 (fig. 18). En cumulant les prévisions sur 24 h (du 7 à 0h au 8 à 0h), le total prévu atteint 16 mm pour la région proche de Nice (Vence) ; et 17 mm sur 36h jusqu'au 8 à 12h).

Les totaux réellement atteints y seront respectivement de 60 et 81 mm.

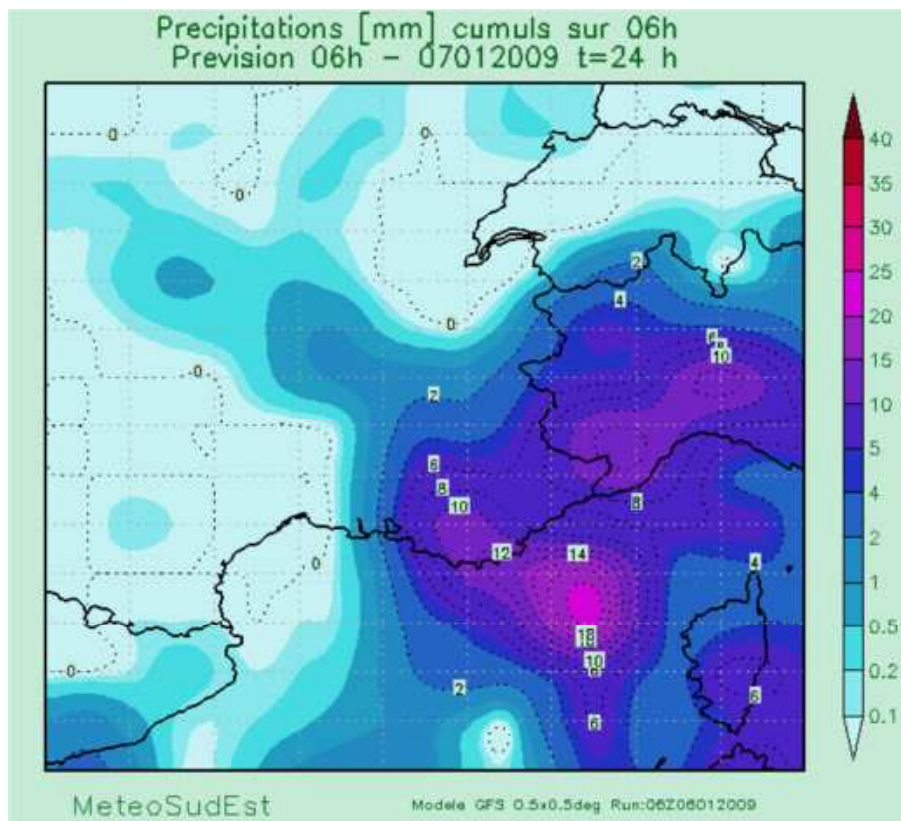


Figure 18. Des précipitations faibles prévues par le GFS, sur les Alpes-Maritimes, pour le 7 janvier 2009.

La simplification excessive du relief par le MNT, a engendré une modification totalement artificielle du flux de basses et moyennes couches qui, dévié au NE alors qu'il est d'E en réalité sur l'ensemble du département, au sud de la crête frontière de l'Argentera-Mercantour, va foehner et donc devenir subsident, d'après le modèle. Cette dynamique totalement virtuelle inhibe évidemment les précipitations modélisées qui seront de l'ordre du cinquième de la réalité mesurée (fig.19).

La figure 19 donne les vitesses verticales prévues, qui sont subsidentes (positives car exprimées en gain de pression à la seconde) sur les Alpes-Maritimes (flèche rouge). On note au contraire de l'ascendance (flèches bleues) sur la face nord du massif (Piémont) et sur le littoral Varois ainsi qu'en mer, informations à comparer avec la pluie prévue en figure 18.

Sur les cartons, à droite, on note, de haut en bas :

- Le flux prévu à 850 hPa, de NE sur les Alpes-Maritimes, et d'E sur la côte Varoise,

- Le MNT du GFS qui indique une altitude de ligne de crête frontière atteignant 1200 m au maximum (contre plus de 3000m en réalité) et 800m à l'extrême Nord-Est du département (contre plus de 2000m en réalité),

- Une carte de la topographie « réelle » du département.

En bref, la topographie filtrée du GFS a généré une orientation méridienne du relief et donc une déviation du flux modifiant les précipitations (flèche blanche du 2ème carton).

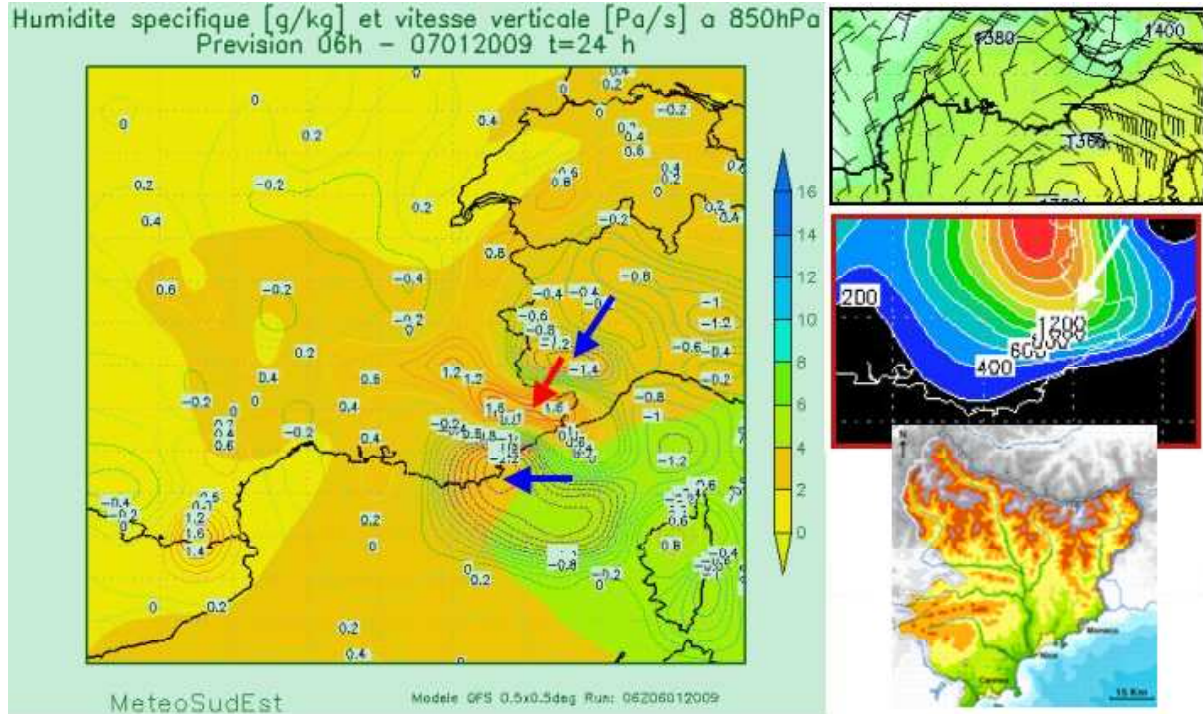


Figure 19. Vitesses verticales prévues par le GFS pour le 7 janvier à 6h

Source : meteosudest.org. Cartons : flux prévus à 850 hPa, MNT du GFS, relief moins simplifié. Les flèches colorées sont orientées selon la direction du flux.

3.2. Influences de la grille de calcul météorologique et de la grille topographique sur l'écoulement de l'air.

Il s'agit ici de développer deux exemples montrant, pour le modèle méso-échelle RAMS, comment une meilleure résolution de la grille de calcul modifie les écoulements d'air sur un même MNT, et comment une meilleure résolution du MNT change également les écoulements, pour une même grille de calcul météorologique.

3.2.1. Influence de la grille de calcul météorologique pour une même grille MNT (130m), le 16 avril 2007 à 12h TU.

Une résolution de 2 km pour la maille calcul donne un flux assez homogène sur la région niçoise, de SE à SSE dominant, s'incurvant à l'E en faiblissant, à l'intérieur des terres (fig. 20). Pour un même MNT de 130m de résolution, beaucoup de différences apparaissent lorsque la maille calcul s'affine en descendant à 500m : le flux maritime de SSE se heurte à un flux de N résiduel à Saint Martin du Var (brise de terre résiduelle) au nord, et à un flux d'W à SW au sud-ouest du domaine, tandis que vers Contes, le flux passe à l'E (fig.21). Il est évident que les conséquences de ces changements sont très importantes pour certaines applications, comme dans le domaine de la pollution atmosphérique, par exemple.

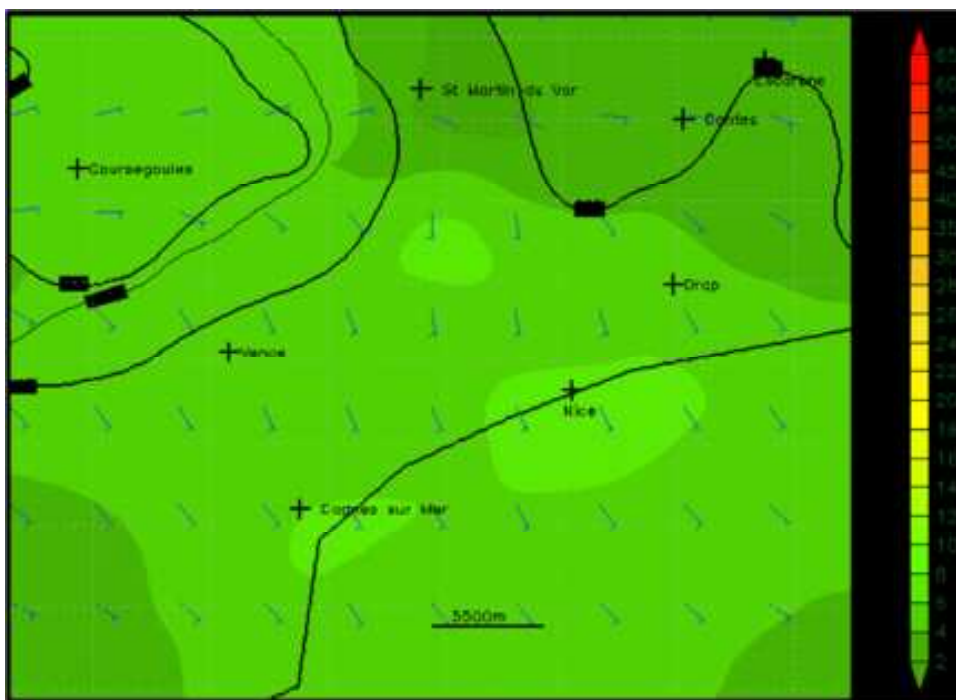


Figure 20. Vent modélisé sur la région niçoise pour le 16 avril 2007 à 12h TU. Modèle RAMS. Grille de calcul 2km. MNT 130m.

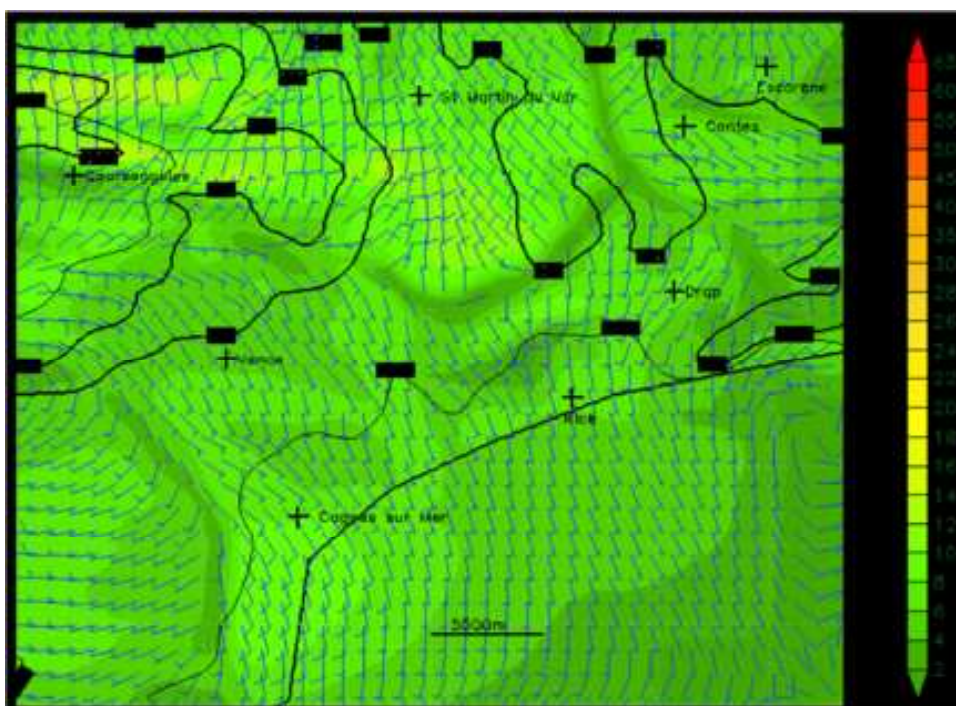


Figure 21. Vent modélisé sur la région niçoise pour le 16 avril 2007 à 12h TU. Modèle RAMS. Grille de calcul 500m. MNT 130m.

3.2.2. Influence de la grille MNT pour une même grille de calcul (500m), le 16 avril 2007 à 04h TU.

Dans ce cas, la grille de calcul météorologique demeure inchangée (500m), et seule change la résolution du MNT.

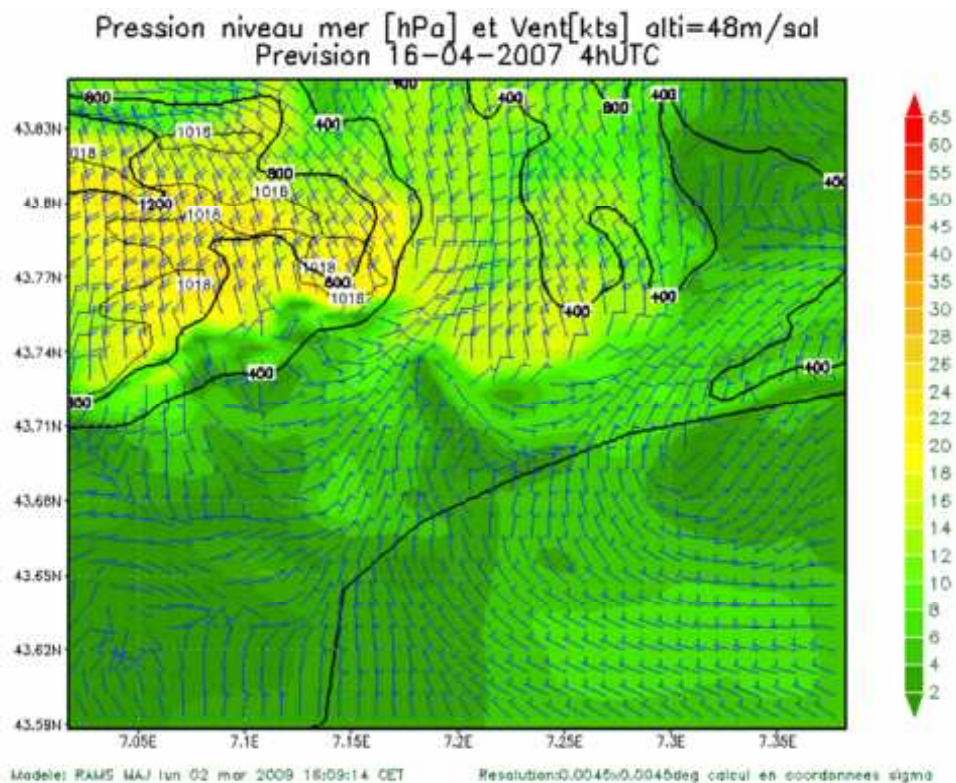


Figure 22. Vent modélisé sur la région niçoise pour le 16 avril 2007 à 04h TU. Modèle RAMS. Grille de calcul 500m. MNT 400m.

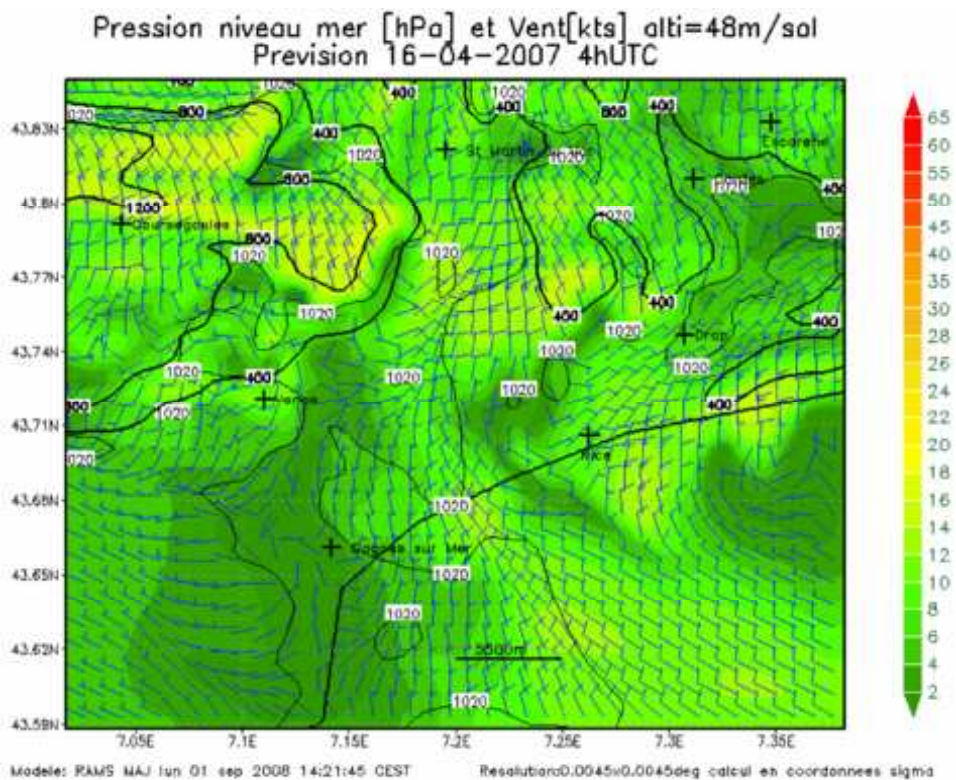


Figure 23. Vent modélisé sur la région niçoise pour le 16 avril 2007 à 04h TU. Modèle RAMS. Grille de calcul 500m. MNT 130m

Avec une résolution MNT de 400m, le trait dominant est le régime de brise de terre de N, assez rapide soit dans la vallée du Var par effet Venturi (au centre), soit surtout à l'ouest, sur les Préalpes de Grasse-Vence (fig.22).

Affiner la résolution à 130m se traduit par un changement des vitesses plus que des directions (sauf au Sud-Ouest du domaine). Les vitesses augmentent (conformément à l'observation) sur les collines littorales élevées à l'est de Nice, tandis qu'elles diminuent sur les Préalpes, ce qui est également observé (fig. 23).

Il apparaît ainsi que non seulement la résolution du MNT, mais aussi la résolution du calcul pèsent d'un poids important sur les résultats.

Conclusion :

Les modèles numériques pronostiques en météorologie sont des outils puissants, mais très complexes, puissant, et pas du tout « clés en main », en particulier dans les régions où la topographie est complexe. Il sont sensibles aux nombreux réglages inévitables, mais aussi, et surtout, à l'échelle spatiale à laquelle ont les fait travailler, tant sur le « support » géographique résumé par le MNT, que sur la finesse spatiale souhaitée pour le calcul météorologique.

C'est pourquoi, une fois de plus, il est impératif de rechercher la validation au maximum, par exemple à l'aide de mesures et d'observations, et tout particulièrement en secteur au relief accusé.

Les nuances régionales des modèles globaux calculant le futur des climats devront donc être l'objet d'attentions spéciales...

Bibliographie :

- CARREGA P. et al. 2007 : « Information géographique et climatologie ». Hermès- Lavoisier, Paris, 2007, 239 p.
- HOLTON J. : « An introduction to dynamic meteorology » Elsevier Academic press
- JACOBSON M. 1999 : « Fundamentals of Atmospheric Modeling ». Cambridge University Press
- NCAR : « Mesoscale Modeling System, User's guide: MM5 Modeling System » 2005
- Meteoliguria : modèles BOLAM21 et BOLAM 6.5 <http://www.metaoliguria.it>
- MeteoSudEst : modèles GFS, GEM, MM5, NMM WRF <http://www.meteosudest.org>
- WALKO R., TREMBACK C.: « RAMS The Regional Atmospheric Modeling System Technical Description » 2006. <http://www.atmet.com>