

Prix AAM 2001...

Étude d'un épisode de pluies intenses sur la région alpine durant la campagne MAP

par Philippe Héreil¹

Résumé

Le sud est de la France, et plus généralement les régions au voisinage des Alpes, sont régulièrement frappés par des épisodes de pluies torrentielles qui entraînent parfois de véritables catastrophes naturelles (e. g. Nîmes, 1987, Vaison-La-Romaine, 1992). En raison de la complexité des mécanismes mis en jeu et de l'interaction entre phénomènes météorologiques d'échelles très différentes, les pluies torrentielles influencées par le relief sont encore mal prévues par les modèles opérationnels de prévision du temps.

Face à ce constat, le programme MAP (Mesoscale Alpine Programme) marque un engagement fort de la communauté météorologique internationale pour comprendre, et donc mieux prévoir, les processus physiques gouvernant les précipitations et déterminant la circulation tridimensionnelle de l'atmosphère au voisinage d'une chaîne montagneuse. La campagne de mesures de MAP qui s'est déroulée du 7 septembre au 15 novembre 1999 dans les Alpes, a permis d'échantillonner des épisodes de précipitations alpine avec une qualité jusqu'alors inégalée.

Cet article présente l'étude d'un épisode pluvieux qui a entraîné localement un cumul important de précipitations (proche de 100 mm en 24 heures) pendant la campagne de mesures de MAP. Les données collectées constituant la référence, le modèle numérique de méso-échelle Méso-NH est utilisé pour explorer les mécanismes de l'épisode de fortes pluies. La modélisation numérique permet de bâtir un scénario pour expliquer la localisation et la chronologie des précipitations.

La région alpine : un terrain favorable aux épisodes de pluies violentes

Le sud est de la France, et plus généralement les régions au voisinage des Alpes, sont régulièrement frappés par des épisodes de pluies torrentielles qui entraînent parfois de véritables catastrophes naturelles. Les inondations de Nîmes en 1987, de Vaison-La-Romaine en 1992... sont autant d'exemples ponctuels des dégâts humains et matériels que peuvent engendrer les pluies violentes dans ces régions. Sur une plus longue période, l'étude de la climatologie montre également que la région alpine est propice aux épisodes de pluies intenses. De par leur position privilégiée par rapport aux trajectoires des systèmes météorologiques et la proximité de la mer Méditerranée, les Alpes constituent un forçage important qui influence la locali-

sation et le déclenchement des précipitations. En raison de la complexité des mécanismes mis en jeu et de l'interaction entre phénomènes météorologiques d'échelles très différentes, les pluies torrentielles influencées par le relief sont encore mal prévues par les modèles opérationnels de prévision du temps.

La campagne MAP : un laboratoire installé au cœur des Alpes

Face à ce constat, le programme MAP (Mesoscale Alpine Programme) marque un engagement fort de la communauté météorologique internationale pour comprendre, et donc mieux prévoir, les processus physiques gouvernant les précipitations et déterminant la circulation tridimensionnelle de l'atmosphère au voisinage d'une chaîne montagneuse. La phase préparatoire de MAP a permis de définir les grands objectifs visés par l'expérience ainsi que les moyens humains et matériels pour y parvenir. La campagne de mesures de MAP (phase terrain) s'est déroulée du 7 septembre au 15 novembre dans les Alpes. La période automnale est particulièrement favorable aux épisodes de fortes pluies, en grande partie à cause de la température élevée de la mer Méditerranée à cette époque, qui constitue un réservoir idéal de chaleur et d'humidité pour alimenter les systèmes nuageux.

En plus des stations de mesure fonctionnant souvent de manière renforcée sur l'ensemble du massif durant la phase terrain de MAP, des systèmes d'observation supplémentaires ont été concentrés dans différentes zones afin d'échantillonner finement les phénomènes météorologiques intéressants. En particulier, sept radars météorologiques étaient présents dans la région du Lac Majeur. Un nombre sans précédent d'instruments étaient concentrés dans les vallées du Po, du Rhin, du Wipp de la Toce et du Tessin : stations automatiques de surface, profileurs de vent, lidars, etc. A cet important dispositif instrumental au sol,

s'ajoutaient des avions de recherche français, anglais, allemands suisses et américains qui ont effectué des missions coordonnées de mesure.

Dans les centres d'opérations de MAP, des chercheurs, des ingénieurs et des prévisionnistes issus des différents pays ont permis de mener à bien dix sept Périodes d'Observations Intenses (POI), qui ont fourni un échantillonnage spatio-temporel de très grande qualité. La phase d'évaluation de MAP est maintenant bien entamée. Les données récoltées sont utilisées pour véri-



¹Météo-France, Direction des systèmes d'Observation, division QMR/CEP, 7 rue Teisserenc de Bort 78190 Trappes. Philippe.hereil@meteo.fr

fier la cohérence des hypothèses formulées par les chercheurs, mais également pour étudier finement les processus dynamiques gouvernant le déplacement et la régénération des systèmes pluvieux au voisinage des reliefs.

L'épisode du 4 novembre 1999 : un cumul de pluies approchant les 100 mm en 24 h

Parmi les différentes POI réalisées, la POI14 (3 et 4 novembre 1999) a permis de documenter finement un épisode de précipitations intenses sur la région alpine par conditions d'écoulement de sud. La seconde journée présente une situation météorologique particulièrement intéressante avec des cumuls importants de précipitations sur la Côte d'Azur (50 mm en 12 h à Cap Cepet), la Corse et l'extrême nord de l'Italie. D'après les relevés du réseau pluviométrique de la région du Piémont italien, ces précipitations ont atteint ponctuellement un cumul de 90 mm au nord de Turin pour la journée du 4 novembre.

Dans la figure 1 est présentée l'image satellitaire dans le canal vapeur d'eau le 04/11/99 à 12 UTC. Les valeurs de radiance dans cette partie du spectre fournissent une mesure du contenu intégré en vapeur d'eau entre 300 hPa et 500 hPa. Les parties sombres sont associées à de l'air sec d'origine stratosphérique. Les régions plus claires sont associées à de l'air humide d'origine troposphérique. Dans cette image, on remarque la présence d'un filament sombre s'étendant de la Scandinavie à la mer Méditerranée. Le filament est caractéristique d'une alimentation en air (d'origine stratosphérique) froid et sec d'altitude venant du nord, reflétant la descente de la tropopause². La superposition de l'air froid d'altitude, porteur d'une énergie importante, et de l'air chaud et humide en basses couches forme un système particulièrement instable et favorable au développement de la convection³ dans cette région. On devine également un début d'enroulement dépressionnaire autour d'un centre localisé à l'est de la Corse. Cette configuration particulière avec isolement d'une poche d'air froid d'altitude en Méditerranée est caractéristique de la formation d'une goutte froide associée à un système dépressionnaire de méso-échelle. Il faut noter que l'échelle caractéristique d'une goutte froide (échelle méso-b ~ 100 km sur l'horizontale) est d'un ordre de grandeur inférieure à celle d'une dépression classique (échelle synoptique ~ 1000 km), ce qui rend sa prévision plus délicate. Dans les heures qui suivent, la circulation cyclonique en basses couches associée à la stagnation de la goutte froide dans le Golfe de Gênes va entraîner la persistance d'un écoulement de sud sur les Alpes italiennes.

La modélisation numérique : un outil pour explorer le comportement de l'atmosphère

Comme il est difficile de reproduire le comportement de l'atmosphère en laboratoire, on a souvent recours à la simulation à l'aide d'un modèle numérique basé sur les équations météorologiques. Pour décrire correctement le cycle de vie d'une goutte froide, il est nécessaire d'employer un modèle capable de travailler à une échelle suffisamment fine. Le modèle Méso-NH (Lafore et al., 1998), développé conjointement par Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique, est un

modèle de recherche non hydrostatique à méso-échelle. Dans ce modèle, l'atmosphère est découpée en petits volumes à l'aide d'un maillage tridimensionnel dont la base épouse les contours de la topographie. Les paramètres atmosphériques sont alors calculés en chacun des points de ce maillage. On parle de modèle à points de grille. Un des gros avantages du modèle Méso-NH est qu'il peut utiliser, de par les hypothèses sur lesquelles il repose, des mailles horizontales assez petites pour autoriser la simulation de phénomènes d'échelles allant de l'échelle synoptique jusqu'à l'échelle des petits tourbillons de la couche limite (typiquement quelques dizaines de mètres). A ces échelles, il n'est plus possible de faire l'approximation hydrostatique qui consiste à considérer l'atmosphère comme un fluide au sein duquel règne constamment un équilibre vertical entre force de pression et force de gravité (on néglige les accélérations verticales). De plus, le modèle comprend un ensemble étendu d'outils (paramétrisations) permettant de prendre en compte les phénomènes physiques tels que la turbulence, le rayonnement, les échanges sol-atmosphère, les processus de changement d'état des différentes phases de l'eau, etc.

Un autre avantage du modèle Méso-NH est sa possibilité de fonctionner avec des modèles emboîtés (" grid nesting "). Dans un modèle de résolution assez grossière couvrant un domaine géographique assez large, on imbrique, à la manière de poupées gigognes, des modèles dont la résolution va croissant, pour terminer par un modèle de résolution très fine concentré sur la zone où l'on veut étudier à petite échelle le phénomène d'intérêt. Les modèles communiquent entre eux à intervalle de temps régulier (" two way nesting "), ce qui permet de prendre en compte l'interaction entre les différentes échelles, une des principales difficultés pour la simulation des épisodes de pluies influencées par le relief. La configuration d'imbrication choisie pour simuler la journée du 4 novembre est présentée sur la figure 2. Trois modèles sont imbriqués, avec des résolutions horizontales de 40, 10 et 2,5 km. Les conditions aux limites du premier modèle à 40 km de résolution sont fournies par les analyses du modèle opérationnel ARPEGE⁴ de Météo-France toutes les 6 h. Les modèles à 10 km et 2,5 km sont centrés sur les régions où des fortes pluies ont été observées durant la journée du 4 novembre.

Etude des mécanismes des précipitations à l'aide du modèle Méso-NH

La simulation numérique de cet épisode débute le 4 novembre à 00 UTC pour se terminer 24 heures plus tard. L'étude des premiers résultats de cette simulation a montré que le modèle numérique Méso-NH est capable de reproduire de façon satisfaisante la circulation atmosphérique au voisinage du massif alpin et les caractéristiques observées de l'épisode pluvieux. En particulier, comme on peut le voir sur la figure 3, la comparaison des résultats de la simulation avec les observations du réseau radar de MAP durant la journée du 4 novembre montre que le modèle retrouve bien la chronologie de l'événement précipitant, avec notamment une baisse des précipitations à partir de 15 UTC. De plus, le cumul de précipitations mesuré

2/ La tropopause, interface entre la troposphère et le stratosphère, se situe vers 12km d'altitude à nos latitudes. Les descentes de tropopause favorisent les échanges d'énergie entre l'altitude et la surface.

3/ Mouvements verticaux organisés permettant à l'atmosphère de récupérer

une partie de la chaleur emmagasinée par la surface terrestre. En présence d'humidité, la convection peut entraîner la formation de nuages.

4/ Utilisant encore à cette époque le schéma d'assimilation d'observations variationnel 3D

par le réseau de pluviomètres est très bien retrouvé par le modèle avec une maille de 10 km. Pour preuve, sur la figure 4, le maximum observé de 90 mm au NE de Turin est très bien placé par le modèle qui donne une estimation réaliste de l'intensité du noyau observé. La simulation est également en accord avec la langue de précipitations intenses observée au sud du maximum de Turin. La comparaison avec les observations issues du réseau MAP valide donc la simulation numérique. Les ingrédients de l'épisode pluvieux étant présents dans la simulation, celle-ci peut servir de base pour essayer de comprendre les mécanismes qui ont dirigé l'événement. Pour étudier finement ces mécanismes, il est intéressant de mettre à profit les outils offerts par la modélisation numérique pour mettre en évidence les caractéristiques des différentes masses d'air. Parmi ces outils, la méthode des traceurs lagrangiens développée par Gheusi et al. (2000) dans le modèle Més0-NH permet de remonter à l'origine des particules d'air qui sont présentes dans le domaine de simulation à un endroit et à un instant donnés. De cette façon, il est possible de reconstituer les trajectoires des particules d'air qui alimentent les phénomènes d'intérêt, comme les systèmes précipitants dans le cadre de MAP.

Cette technique a été appliquée avec succès à la simulation de la journée du 4 novembre (cf. Fig. 5a). On choisit comme zone d'intérêt un point dans la région à l'ouest de Milan où des précipitations intenses se produisent à 15 UTC. A la verticale de ce point, trois particules sont sélectionnées à trois altitudes différentes : 1, 3 et 5 km. A l'aide des traceurs lagrangiens, on remonte ensuite à la trajectoire qu'ont suivie ces particules dans les 15 heures précédentes. Comme on peut le voir sur la figure 3, ces particules ont des origines très différentes. La particule terminant sa course à 1 km d'altitude provient de l'est de l'Italie tandis que les deux autres particules viennent du sud en transitant au-dessus de la mer Méditerranée avant d'arriver dans la région alpine. La figure 5b présente une coupe verticale dans la direction Nord-Sud dont la trace horizontale est repérée par le trait noir épais dans la figure 5a. Dans cette coupe verticale, sont superposés la température potentielle équivalente, le rapport de mélange en eau nuageuse ainsi que la projection des trajectoires des trois particules. La température potentielle équivalente⁵ qe est une grandeur qui permet de tenir compte de l'énergie que possède une particule d'air atmosphérique du fait de sa température et de la vapeur d'eau qu'elle contient. Plus une particule est chaude et humide pour une altitude donnée, plus sa qe est élevée. Les fortes valeurs (typiquement supérieures à 0,2 g/kg) de rapport de mélange en eau nuageuse⁶ (rc) donnent une bonne indication sur la localisation des systèmes nuageux.

Dans la coupe verticale, on s'aperçoit que la particule provenant de l'est et qui termine sa course à 1 km d'altitude reste au cours de son trajet confinée dans les basses couches de l'atmosphère. De plus, cette particule possède une qe assez faible. En basses couches, on a donc de l'air froid provenant de l'est qui reste canalisé entre les Alpes et les Apennins. La particule terminant sa course à 5 km d'altitude change peu de hauteur au cours de son déplacement au-dessus de la mer Méditerranée. En revanche, la particule qui suit la trajectoire sud-nord arrivant à 3 km d'altitude subit une

ascendance de près de 2500 m. On constate que lors de sa course, cette particule passe dans des régions où l'air froid d'altitude surplombe de l'air plus chaud, ce qui constitue une configuration instable favorable au développement de mouvements ascendants importants. De plus, elle possède une qe élevée et se trouve co-localisée avec les fortes valeurs de rc en fin de période. L'ascendance de cette particule chargée initialement en chaleur et en humidité chaleur participe ainsi à la formation des masses nuageuses dans la région alpine. Les différentes trajectoires des particules permettent ainsi de bâtir un scénario pour expliquer la chronologie de l'épisode pluvieux :

- 1- Sous l'influence d'une goutte froide stagnante dans le Golfe de Gênes, de l'air en provenance des basses couches chaudes et humides au-dessus de la mer Méditerranée se dirige vers les côtes italiennes.
- 2- De l'air froid et sec de basses couches est canalisé par les Alpes et les Apennins pour venir former un forçage supplémentaire sur les pentes sud des Alpes italiennes.
- 3- Sous l'action conjuguée des forçages de l'orographie et de l'air froid de basses couches, l'air méditerranéen subit une ascension importante. Lors du soulèvement, la vapeur d'eau présente dans cet air se condense sous l'effet du refroidissement pour former des nuages. Le soulèvement se poursuivant, les précipitations se déclenchent pour entraîner des cumuls importants au voisinage des pentes alpines. Il faut noter que c'est la goutte froide qui pilote l'événement : la stagnation de ce système dans le golfe de Gênes entraîne la persistance du flux de sud sur les Alpes.

Perspectives

A travers cette étude d'un cas de précipitations influencées par le relief, on a pu se rendre compte du potentiel offert par les modèles numériques de méso-échelle tel Més0-NH. Non seulement, la modélisation a permis de retrouver la localisation fine et la chronologie de l'événement, mais l'utilisation de diagnostics du modèle a aussi permis de mieux en appréhender ses mécanismes. Pour ce type de phénomène de méso-échelle, une étude de sensibilité menée en parallèle à ce travail (Hérel, 2000) a renforcé l'idée que la description fine des conditions initiales est une condition nécessaire, mais hélas pas toujours suffisante, à la réussite de la simulation.

Parmi les perspectives de cette étude, il sera intéressant de simplifier le problème du cas réel pour analyser séparément l'effet de certains paramètres comme la forme du relief, les échanges de chaleur sol-atmosphère, etc. Ce travail est en cours au CNRM, en parallèle à l'étude d'autres POI de MAP. Les recherches dans le cadre du programme MAP devraient permettre de mieux comprendre, et donc de mieux prévoir, les épisodes de précipitations intenses se produisant régulièrement au voisinage du massif alpin. On peut ainsi imaginer que l'utilisation dans un futur proche d'un modèle à très fine échelle comme modèle d'alerte permettra d'annoncer suffisamment à l'avance aux populations concernées l'occurrence des épisodes de pluies diluviennes, de façon à limiter l'ampleur des dégâts humains et matériels engendrés par de tels événements.

5/ Température potentielle qu'aurait une particule d'air humide si toute l'humidité qu'elle contient était condensée, et le dégagement de chaleur latente utilisé pour réchauffer la particule.

6/ Quantité d'eau nuageuse par kilo d'air sec.



Figure 1 : Image Meteosat dans le canal vapeur d'eau le 04/11/1999 à 12 UTC.

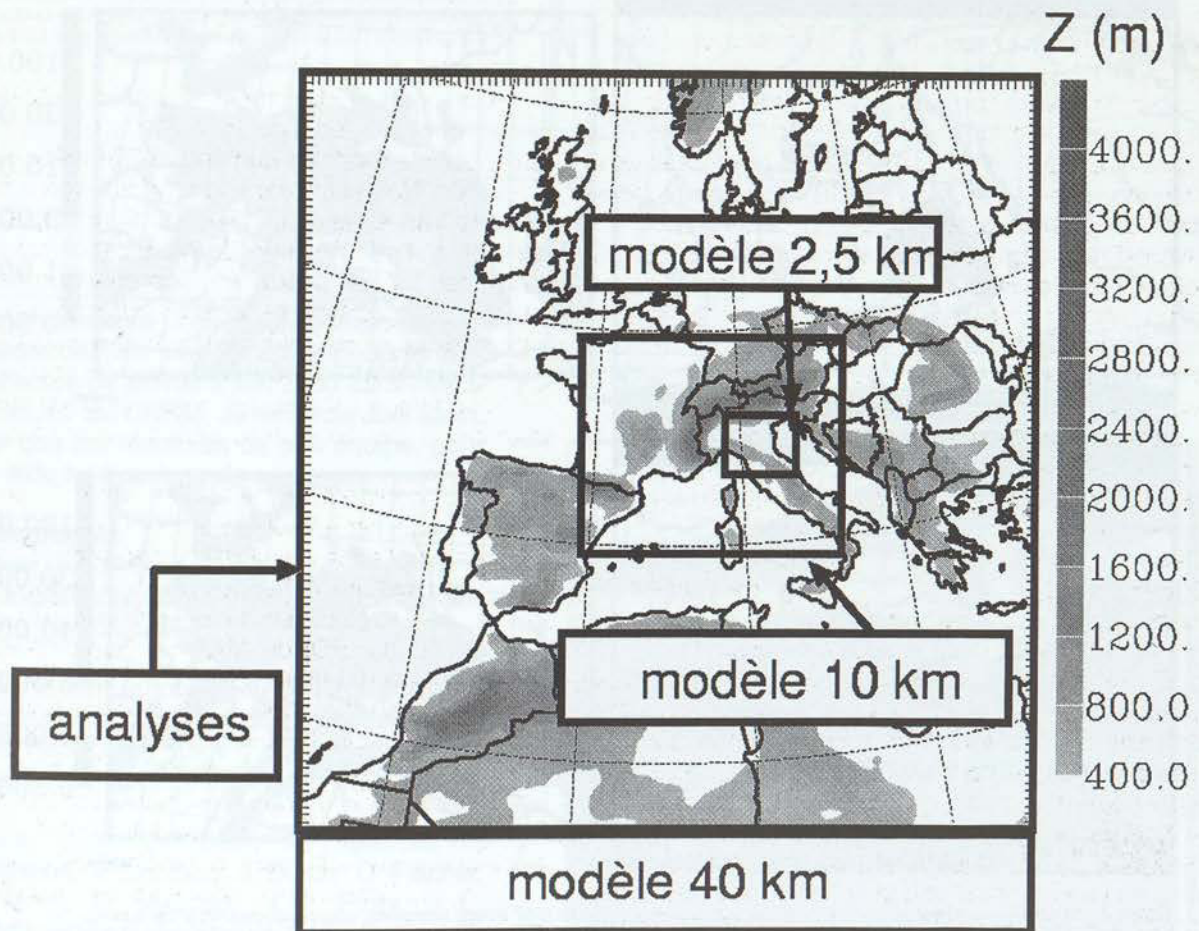


Figure 2 : schéma d'imbrication des trois modèles (résolutions horizontales respectives de 40, 10 et 2,5 km) pour la simulation numérique de la PO14. Le relief supérieur à 400 m est reporté en contours grisés.

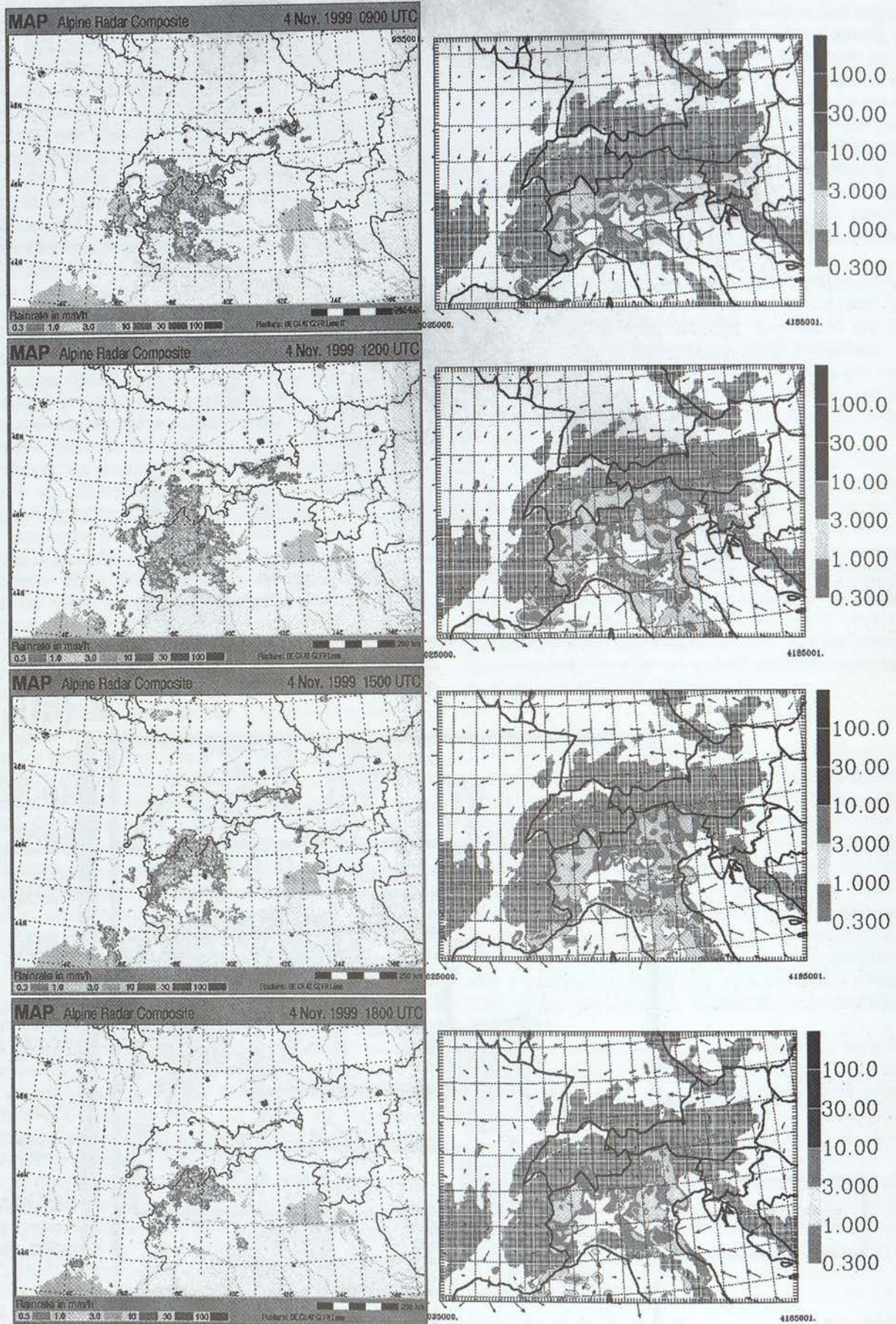


Figure 3 : précipitations instantanées (mm) observées par le réseau de radars MAP (image composite, colonne de gauche) et par la simulation Meso-NH avec résolution horizontale de 10 km (colonne de droite). La topographie supérieure à 500 m est superposée en plages grisées et le vent à 10 m d'altitude est indiqué par des vecteurs.

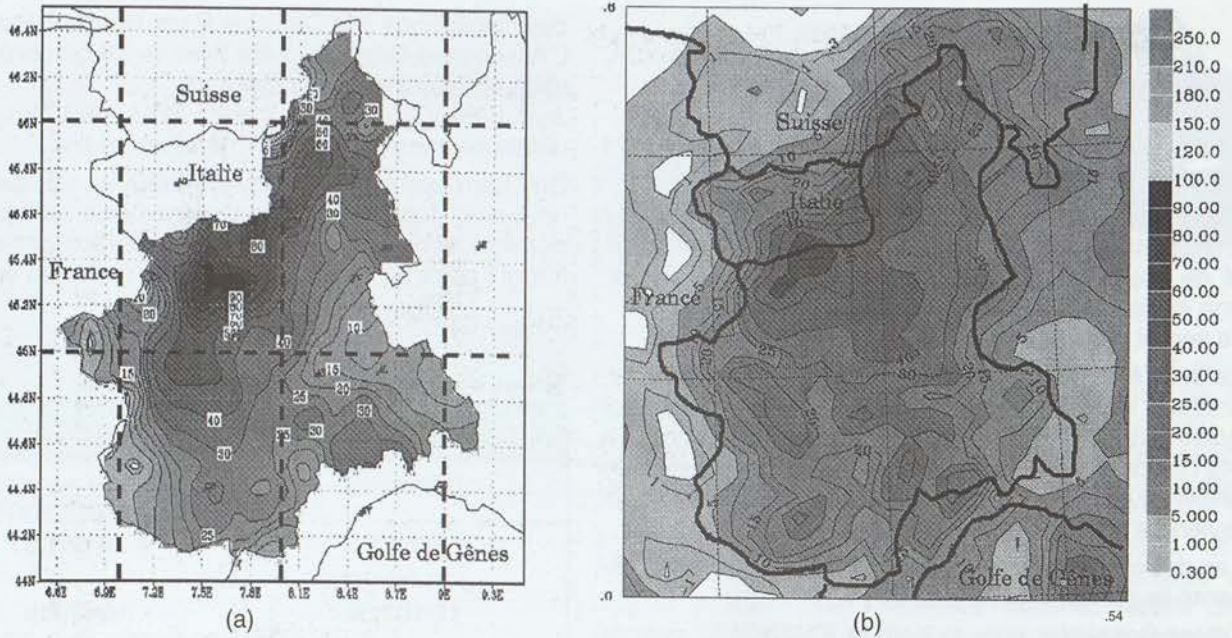
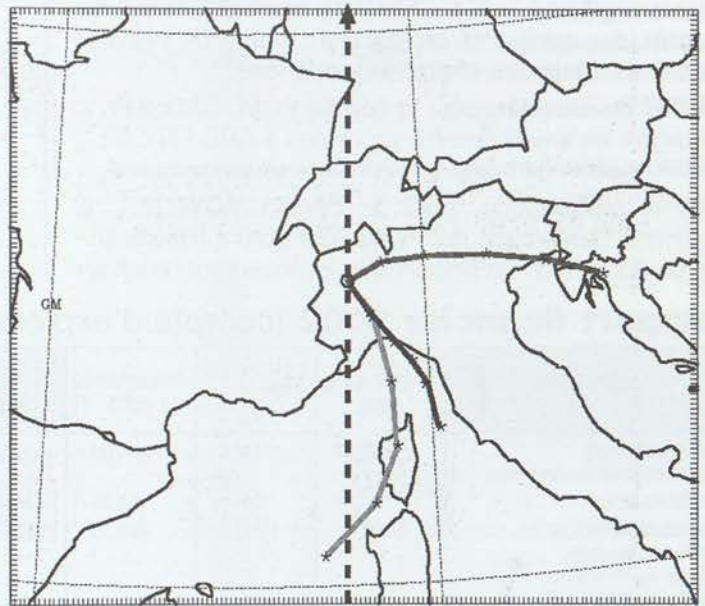


Figure 4 : précipitations cumulées (mm) sur 24 h pour la journée du 04/11/1999. (a) Observations du réseau de pluviomètres de la région Piémont. (b) Simulation Meso-NH avec résolution de 10 km.

Figure 5 : trajectographie arrière de trois particules localisées à la verticale du cercle le 04/11/1999 à 15 UTC. L'intervalle entre deux points consécutifs est de 3 h (la croix en début de trajectoire représente l'échéance du 04/11/1999 à 00 UTC). Projection des trajectoires (a) dans le plan horizontal ; (b) dans un plan sud nord. Dans (a) la flèche en tirets épais représente la trace de la coupe verticale présentée en (b). Dans (b) sont superposés la température potentielle équivalente (K, en contours colorés), les rapports de mélange en eau nuageuse supérieures à 0,2 g/kg (grisés) et les vecteurs vent le 04/11/1999 à 15 UTC.



Remerciements : l'étude a été réalisée dans le cadre de mon stage d'approfondissement IT effectué de janvier à juin 2000 dans l'équipe RELIEF du CNRM. Je remercie Joël Stein, ainsi que les membres de son équipe, pour leur aide tout au long de ce stage.

Bibliographie

Gheusi, F., J. Stein et N. Asencio, 2000. A lagrangian analysis of the diabatic processes during the MAP IOP2. MAP Meeting 2000.

Hérelil, P. Simulations multi-échelles d'un cas de convection alpine tiré de l'expérience MAP, 2000. Rapport de stage d'approfondissement IT de l'ENM, Note de travail de l'ENM n° 718.

Lafore, J.-P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fischer, P. Hérelil, P. Mascart, J.-P. Pinty, J.-L. Redelsperger, E. Richard et J. Vilà Guerau de Arellano, 1998. The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I : Adiabatic formulation and control simulations. Annales Geophysicae, 16, 90-109.

