

# L'expérience MAP sur les phénomènes de mésoéchelle dans les Alpes

## Premier bilan

**Philippe Bougeault<sup>(1)</sup>, Évelyne Richard<sup>(2)</sup> et Frank Roux<sup>(2)</sup>**

(1) Météo-France

Centre national de recherches météorologiques

42, avenue Gaspard-Coriolis

31057 Toulouse Cedex

Courrier électronique : philippe.bougeault@meteo.fr

(2) Laboratoire d'aérodynamique

Centre national de la recherche scientifique et université Paul-Sabatier

Toulouse

## Résumé

La campagne de terrain du programme MAP (Mesoscale Alpine Programme) s'est déroulée du 7 septembre au 15 novembre 1999, avec une très forte participation française. Elle avait pour but d'améliorer nos connaissances de base sur la physique des principaux risques météorologiques en montagne : les fortes pluies, les forts vents de vallée et la turbulence d'altitude. Il s'agissait aussi d'éprouver les capacités de la dernière génération de modèles numériques à maille très fine. Grâce à la bonne coopération des très nombreux chercheurs participants et grâce à des conditions météorologiques exceptionnellement favorables, la campagne a été un plein succès et la plupart des objectifs expérimentaux ont pu être atteints. Le but de cet article est de présenter un premier bilan « à chaud » de l'expérience.

## Abstract

**The Mesoscale Alpine Programme (MAP) field experiment: first assessment**

The MAP field experiment ran from 7 September to 15 November 1999 with a very strong French presence. The objectives were to improve knowledge of the basic physics of some processes that generate meteorological hazards in mountain, such as heavy rainfall, strong valley winds, and turbulent airflow. Another objective was to test the new generation of high resolution numerical models. The field campaign benefited from excellent cooperation between the numerous scientists involved from many nations, and also from exceptionally favourable weather conditions. Almost all the experimental objectives were attained. This paper gives the hot news of the preliminary findings.

## Les objectifs scientifiques de MAP

Le programme international MAP (Mesoscale Alpine Programme) s'est fixé pour objectif d'améliorer les connaissances de base et la prévision des phénomènes météorologiques dangereux en zone de montagne. Des retombées sont particulièrement attendues dans le domaine des précipitations en montagne, des vents de vallée et de la turbulence d'altitude.

## Les précipitations intenses ou prolongées en montagne

L'observation montre qu'en zone montagneuse, des précipitations extrêmement intenses (de 100 à 300 mm en quelques heures) peuvent se produire sur des zones restreintes (quelques centaines de km<sup>2</sup>). Lorsqu'un tel événement se produit au-dessus d'un bassin versant ayant tendance à concentrer fortement le ruissellement, il peut entraîner des crues catastrophiques, comme celle de l'Ouvèze qui endeuilla tragiquement la ville de Vaison-la-Romaine en septembre 1992 ou, plus récemment, celle de l'Aude en novembre 1999. Ces crues ont un temps caractéristique de montée en puissance de quelques heures, ce qui les rend

imprévisibles par les méthodes actuelles. Nous savons toutefois détecter, dans la situation météorologique à grande échelle, des périodes et des régions où de tels phénomènes sont susceptibles de se produire. Ainsi, le prévisionniste peut indiquer, vingt-quatre heures à l'avance, une fourchette temporelle (de douze heures environ) et spatiale (de 10 000 km<sup>2</sup>, la surface de plusieurs départements français) correspondant à un risque fort de pluies intenses. Mais cette précision est insuffisante pour que les autorités de la sécurité civile et les particuliers puissent prendre des mesures efficaces de protection.

## Quand la pluie devient malédiction

Il pleut, plus ou moins selon les régions et selon les saisons. La pluie est une bénédiction car, sans elle, la végétation et les cultures dépérissent puis meurent, les populations partent et le désert avance. Mais la pluie est aussi une malédiction lorsque, trop drue ou trop persistante, elle s'accumule, déborde, dévale, entraîne toutes sortes de débris, ruine paysages et constructions, détruit la vie des hommes.

En termes plus quantitatifs, 5 à 7 % du territoire français, où vit 10 % de la population, sont sujets aux inondations. Les trois quarts environ des dégâts matériels et près de 40 % des accidents mortels dus aux catastrophes naturelles en France leur sont imputables. Et le développement de l'urbanisation, l'occupation de plus en plus pressante de terrains à risque accentuent la menace pour les années à venir...

Il y a plusieurs causes météorologiques aux pluies susceptibles de provoquer des inondations : orages intenses mais relativement isolés, systèmes dépressionnaires moins violents mais plus étendus, cyclones tropicaux gorgés d'humidité océanique... Ces différents phénomènes peuvent être encore amplifiés par la configuration du terrain sous-jacent. Ainsi, les crues-éclair se produisent quand de fortes pluies sont entraînées, par les pentes sur lesquelles l'eau ruisselle, vers le fond d'une vallée où un maigre ruisseau se transforme rapidement en un flot dévastateur emportant tout sur son passage.

Le programme international MAP est axé, entre autres objectifs scientifiques, sur l'étude des événements de pluies intenses sur le relief alpin. Il s'agit d'une préoccupation largement partagée, puisque d'autres expériences d'envergure (Coast II en décembre 1995 et Caljet pendant l'hiver 1997-1998 sur la côte pacifique des États-Unis, Ipex en janvier 2000 sur les Rocheuses) ont concerné l'étude des précipitations orographiques et de leur environnement. S'il était nécessaire de montrer la pertinence de telles études, les terribles inondations qui ont frappé le Sud de la Suisse et le Nord de l'Italie en octobre 2000 – dans la zone même où fut conduite la phase expérimentale de MAP un an plus tôt – ont cruellement mis en évidence la fragilité des sociétés technologiques vis-à-vis des événements extrêmes.

Il est certain que l'on ne pourra pas, dans un avenir imaginable, modifier le temps ; mais il est sûr que les connaissances acquises à la suite de programmes

comme MAP permettront de mieux comprendre les processus physiques qui conduisent à ces phénomènes dangereux, de les prévoir plus précisément et plus longtemps à l'avance, et de transmettre vers un large public des recommandations utiles pour prévenir les risques associés.

Vue aérienne de Neubrück-Stalden, en Suisse, où trois personnes ont disparu après qu'une coulée de boue due aux pluies diluviennes ait balayé quatre maisons, le 15 octobre 2000. L'épisode de pluies diluviennes de la mi-octobre a causé au moins dix-sept victimes en Italie du Nord, en Suisse méridionale et en France. (© AFP Photo, L. Gillieron)



La rivière Chisone en crue à Pinerolo, une petite ville italienne située près de Turin, le 15 octobre 2000. En Italie du Nord, après plusieurs jours de pluies fortes, rivières et lacs ont vu leur niveau monter, inondant les routes et provoquant des glissements de terrain dans les villages de montagne. (© AFP Photo, A. Giaimo)

Dans ce domaine, le programme MAP s'est fixé pour objectif, sur une période de dix ans, de faire progresser la précision de la prévision des précipitations intenses, à la fois dans l'espace et dans le temps : on cherche en effet à valider une nouvelle génération de modèles numériques de simulation de l'atmosphère, reposant sur un maillage spatial précis au kilomètre (c'est-à-dire dix fois plus précis que le maillage actuel) et représentant donc la topographie avec beaucoup de finesse. L'objectif est d'atteindre une précision de l'ordre d'une dizaine de kilomètres sur la position des zones de fortes précipitations et de l'ordre d'une heure sur leur déroulement temporel, avec une anticipation de l'ordre de douze à vingt-quatre heures.

L'amélioration de la prévision numérique de la pluie devrait ouvrir la voie au couplage entre les modèles numériques de l'atmosphère et ceux de l'écoulement dans les rivières. Les études développées dans le cadre de MAP ont pour but d'atteindre, dans quelques années, une prévision numérique automatisée du débit des principales rivières alpines.

### Les vents violents dans les vallées

Ces phénomènes, moins connus que ceux créés par les fortes précipitations, surviennent parfois soudainement et peuvent affecter profondément le climat de certaines vallées ou zones de piémont. Ce sont le foehn, qui se produit surtout en Allemagne et en Autriche, mais aussi dans quelques vallées des Alpes françaises et des Pyrénées, et le mistral. Ils présentent des dangers pour les transports, les constructions et les activités de plein air, pour la navigation en Méditerranée et sur les grands lacs alpins ; ils influencent également la qualité de l'air, en dispersant activement les polluants divers émis au fond des vallées.

Dans ce domaine, l'objectif est également de faire progresser notre capacité de prévision en précision spatiale et temporelle. On se donne pour objectif, à l'issue du programme, de pouvoir indiquer douze à vingt-quatre heures à l'avance, à une heure près, le début et la fin des épisodes de vent fort, la vitesse du vent à quelques mètres par seconde près, ainsi que la localisation des zones de vent fort dans les vallées avec une précision de l'ordre de la dizaine de kilomètres.

### La turbulence en haute altitude

Il est enfin fréquent de rencontrer des zones fortement turbulentes au-dessus des massifs montagneux. Ces phénomènes sont source d'inconfort, et parfois de danger, pour l'aviation commerciale et l'aviation d'affaires. Les zones affectées varient fortement dans l'espace et dans le temps, car elles dépendent des caractéristiques générales de l'écoulement atmosphérique en amont ; il n'existe actuellement pas de loi simple pour prévoir le lieu et la durée de ces épisodes de turbulence. La nouvelle génération de modèles de simulation numérique de l'atmosphère a potentiellement la capacité de représenter ces zones avec une très grande précision, et les premiers essais en temps réel ont été faits à l'occasion du programme MAP.

### Partenaires et organisation

Des objectifs aussi ambitieux ne peuvent être atteints que dans le cadre d'une forte coopération internationale. Le programme MAP a été proposé initialement en 1994 par MétéoSuisse et l'École polytechnique de Zurich (Binder et Schär, 1996). Il fait suite au programme Alpex, qui a été mené en 1982 sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale et a conduit à de nombreux progrès en météorologie alpine, et au programme Pyrex, mené sur les Pyrénées en 1990 par Météo-France, le CNRS et l'Institut météorologique espagnol (Bougeault et al., 1996).

Une forte communauté s'est mobilisée suite à la proposition suisse : tous les pays alpins ont été impliqués, à la fois au niveau des services météorologiques et des agences de science fondamentale. Pour la France, Météo-France et le CNRS ont cofinancé, à parts égales, l'ensemble des dépenses de MAP. Le Centre national d'études spatiales (Cnes) et EDF ont également contribué au programme.

La dynamique ainsi créée a convaincu d'autres partenaires (États-Unis, Canada, Royaume-Uni, Espagne et Grèce) d'apporter une importante participation. Pour ces pays, l'intérêt réside dans l'existence d'un réseau exceptionnel de mesures permanentes dans les Alpes et dans l'espoir de transposer à leurs propres massifs montagneux les résultats obtenus sur les massifs alpins.



De plus, depuis 1998, le programme MAP a été reconnu comme la première réalisation d'une nouvelle action de l'Organisation météorologique mondiale, le Programme mondial de recherche en prévision du temps, qui a pour objectif de favoriser la collaboration internationale en matière de recherche sur les phénomènes météorologiques violents.

Au total, ce sont quatorze pays et plusieurs centaines de chercheurs et d'ingénieurs qui se sont mobilisés durant plusieurs années pour atteindre les objectifs de MAP. Le budget pour l'année 1999, qui marquait l'apogée du programme avec la réalisation de l'expérience de terrain, se situait aux alentours de 20 mégaeuros (dont environ 1 mégaeuro, soit environ 7 millions de francs, pour la France).

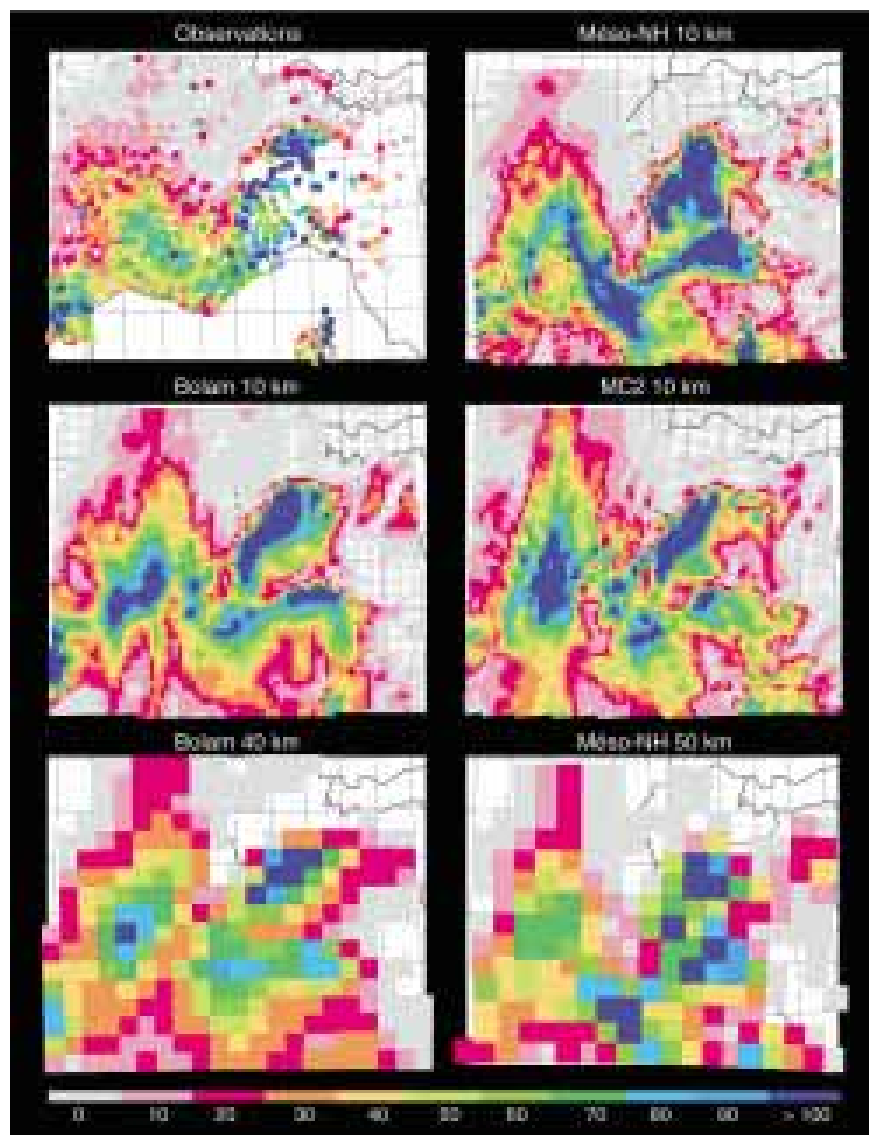


Figure 1 - Comparaison des simulations numériques par divers modèles de recherche et des observations de précipitations. Toutes les figures montrent des quantités de pluie cumulées sur 24 heures (en mm) du 23.09.93 à 6 h UTC au 24.09.93 à 6 h UTC. Le cas du 23 septembre 1993 est célèbre à cause de l'inondation survenue dans la ville suisse de Brig. Ce cas a été sélectionné comme exercice préparatoire pour MAP et les résultats des comparaisons internationales sont disponibles sur le site Internet du MAP Data Center à Zurich [[www.map.ethz.ch](http://www.map.ethz.ch)].

MAP repose sur plusieurs éléments : un centre de données permanent hébergeant un site Internet et un serveur de données météorologiques, l'expérience de terrain qui a eu lieu à l'automne 1999 et l'organisation régulière de réunions scientifiques.

Le Centre de données MAP est hébergé par l'École polytechnique fédérale de Zurich et cofinancé par l'ensemble des partenaires institutionnels. Il recueille l'ensemble des archives météorologiques utiles pour faire progresser les



connaissances sur les phénomènes évoqués, sur les cinq années les plus récentes. Ces données étaient auparavant dispersées dans plus d'une vingtaine d'instituts différents, et leur seule concentration représente un progrès évident pour les chercheurs. De plus, le Centre de données met progressivement à la disposition de l'ensemble de la communauté scientifique les données spéciales recueillies pendant l'expérience de terrain.



À côté des observations, le Centre de données contient un ensemble de simulations numériques de référence de situations particulièrement intéressantes du passé, réalisées par les principaux contributeurs. La figure 1 montre ainsi plusieurs simulations sur la situation de précipitations intenses du 23 septembre 1993 (inondation de la ville suisse de Brig). La plupart des grandes inondations des dernières années ont ainsi fait l'objet d'un travail de comparaison des différents modèles numériques disponibles, afin d'évaluer les bénéfices respectifs des diverses formulations scientifiques utilisées.

Photo-souvenir symbolisant la coopération internationale pour MAP. De gauche à droite, Herbert Pümpel (Autriche), Philippe Bougeault (France) et Richard Dirks (États-Unis). (Photo Météo-France CNRM/PAD, Pascal Taburet)

## L'expérience de terrain

L'expérience de terrain a eu lieu dans les Alpes du 7 septembre au 15 novembre 1999. Les principales zones instrumentées étaient la région du lac Majeur en Italie, la vallée du Rhin en Suisse et la vallée du Wipp en Autriche (figure 2). Les centres d'opérations correspondants étaient situés à Milan (Italie), Bad Ragaz (Suisse) et Innsbruck (Autriche). D'autres mesures étaient activées dans l'ensemble du massif.

L'expérience était structurée autour de huit projets, en compétition pour l'accès à certains moyens de mesure, notamment aéroportés. Leur intitulé est le suivant :

P1	Mécanismes fondamentaux des précipitations orographiques
P2	Anomalies de tourbillon potentiel au niveau de la tropopause
P3	Mesures hydrologiques et prévision d'inondations
P4	Dynamique de l'écoulement dans un col
P5	Prévision du foehn dans la vallée du Rhin
P6	Déferlement des ondes de relief
P7	Structure du sillage engendré par les Alpes
P8	La turbulence dans les vallées alpines

Les objectifs détaillés de ces projets sont exposés dans le plan scientifique de MAP (Bougeault et al., 1998).

Les moyens mis en œuvre par la France étaient les suivants (voir aussi le tableau 1) :

- L'avion *Merlin IV* de Météo-France, présent à Milan pendant deux mois, a été actif sur les projets P1, P5 et P7 (60 heures de vol).
- L'avion *Fokker 27* du consortium Arat (IGN, Météo-France, Cnes, CNRS), également présent à Milan pendant deux mois, a été actif sur les projets P1, P4, P5 et P7 (70 heures de vol).
- Les équipes françaises ont par ailleurs contribué à développer et à mettre en œuvre trois grands instruments aéroportés engagés dans l'expérience. Ce sont le lidar *Leandre*, embarqué sur l'avion *Fokker 27*, le lidar *Doppler Wind*, embarqué sur l'avion allemand *Falcon*, et le radar *Doppler Astraia*, embarqué sur l'avion américain *Electra*. Dans le dernier cas, la France cofinancéait les vols scientifiques correspondants.
- Des radars profileurs de vent VHF et UHF ont été installés par Météo-France près du lac Majeur pour les besoins du projet P1, ainsi qu'un système de radio-sondage à Nice.
- Le radar *Ronsard* du CNRS était une des pièces maîtresses du dispositif mis en place près du lac Majeur. Il effectuait des balayages coordonnés avec les radars suisse et américain, permettant de reconstituer en temps réel la dynamique des zones de pluie.



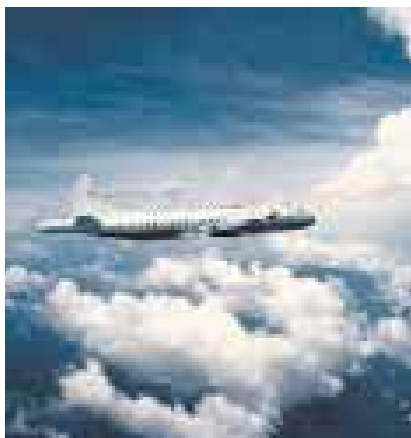


Figure 2 - L'expérience MAP : les principales zones instrumentées au sol.

- Plusieurs autres instruments ont été mis en place par le CNRS : un lidar dans la vallée du Rhin, un ensemble de mesures de l'électricité atmosphérique dans la zone du lac Majeur, ainsi qu'un système de suivi des masses d'air par ballons à altitude constante, avec la contribution du Cnes.
- D'autres instruments existant en France ont été activés sur place, de manière renforcée pendant la campagne, pour contribuer à une connaissance complète des masses d'air arrivant sur les Alpes. C'était le cas des systèmes de radiosondage de Météo-France et des radars profileurs de vent de plusieurs laboratoires du CNRS. EDF a mis en œuvre des sodars et un profileur UHF dans la vallée du Rhône.
- Les chercheurs et ingénieurs français ont aussi participé, bien évidemment, aux organes de conduite de l'expérience : le PC général à Innsbruck et le PC radar à Milan.
- Météo-France a mis quatre ingénieurs prévisionnistes à la disposition d'un centre de prévision dédié à l'opération, au PC d'Innsbruck.

Tableau 1 - La contribution des différents partenaires français à la campagne de terrain de MAP.

Laboratoire	Contribution
Centre d'études des environnements terrestre et planétaires (CETP)	Radar Ronsard, spectro-pluviomètre optique
Centre national d'études spatiales (Cnes)	Ballons plafonnants
Centre national de recherches météorologiques (CNRM)	<i>Merlin IV</i> , profileurs UHF/VHF/RASS, sondage Nice, modélisation numérique
Électricité de France (EDF)	Profileurs et sodars
Institut national des sciences de l'univers, Division technique (INSU)	<i>Arat</i>
Laboratoire d'aérodynamique	Missions <i>Arat</i> et <i>Merlin</i> , ballons plafonnants, électricité atmosphérique, missions <i>Electra</i> , profileur VHF Lannemezan, modélisation numérique
Laboratoire de météorologie dynamique (LMD)	Lidar vent transportable, lidar Wind
Laboratoire de météorologie physique (LAMP)	Profileur VHF Clermont-Ferrand
Laboratoire des sondages électromagnétiques de l'environnement terrestre (LSEET)	Profileur VHF Toulon
Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE)	Prévision de pluie par analogues, performance des radars hydrologiques
Service d'aéronomie	Missions <i>Arat</i> et <i>Leandre II</i>
Services opérationnels de Météo-France	Prévisionnistes, renforcement des sondages, transmission des données en temps réel



L'avion américain *Electra* ausculte les nuages pendant MAP. (© MAP Data Center)

Ces moyens s'inséraient dans un dispositif international d'une grande richesse, dont nous ne mentionnerons que quelques points saillants. Pour plus de détails, on pourra consulter le plan d'opérations de MAP (Binder et al., 1999). Au niveau aérien, citons les avions de recherche à long rayon d'action *Electra* du NCAR (National Center for Atmospheric Research, USA), *P3* de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), *C130* du UK Meteorological Office ; les avions de recherche moyens-courriers *Falcon* et *Dornier 228* du DLR (Agence de recherche aérospatiale allemande) ; divers avions légers engagés par l'Italie et la Suisse. Ces avions étaient répartis sur les aéroports d'Innsbruck, Milan et Oberpfaffenhofen, d'où ils effectuaient des missions coordonnées.

Au niveau du sol, six radars météorologiques de recherche américains, français, suisses et allemands étaient installés dans la région du lac Majeur en Italie, où les précipitations intenses sont climatologiquement les plus probables. Ces radars s'ajoutaient au réseau opérationnel italien. L'instrument le plus perfectionné était le radar américain S-Pol, doté d'une capacité de mesures polarimétriques permettant d'identifier la nature des hydrométéores.

Dans les vallées du Pô, du Rhin, du Wipp, de l'Inn, de la Toce et du Tessin, un très grand nombre de moyens de mesure étaient rassemblés : stations automatiques de surface, radiosondages, profileurs de vent, sodars, scintillomètres, mesures du bilan d'énergie, mesures de l'humidité des sols, microbarographes, etc. Les instruments les plus « pointus » étaient les lidars Doppler à balayage, français (vallée du Rhin) et américains (vallée du Wipp), capables de reconstituer des champs volumiques de vent en l'absence de nuages.

On notera également que l'expérience MAP a coïncidé dans le temps avec un exercice du programme Eucos (Gérard, 1999), consistant à renforcer fortement la fréquence de certains radiosondages européens. La synergie entre ces deux programmes a permis d'acquérir une quantité exceptionnelle d'observations.

## La prévision météo pendant la campagne

Les opérations de MAP ont été soutenues par une équipe de vingt-cinq prévisionnistes originaires de tous les pays alpins et rassemblés à Innsbruck. Les prévisions étaient formulées en termes de probabilité d'occurrence des événements reliés aux objectifs scientifiques. Les produits de base utilisés étaient les images satellitaires, les images radar, le modèle numérique du CEPMMT, le modèle suisse et le modèle Aladin-Lace développé en collaboration entre Météo-France et de nombreux pays d'Europe centrale et orientale. Tous les services météorologiques alpins ont fait un effort considérable pour fournir en temps réel les produits et les données météorologiques utiles à la conduite de l'expérience.

Plusieurs produits météorologiques nouveaux ont été testés pendant la période de l'expérience et le retour d'expérience devrait permettre un débouché opérationnel rapide.

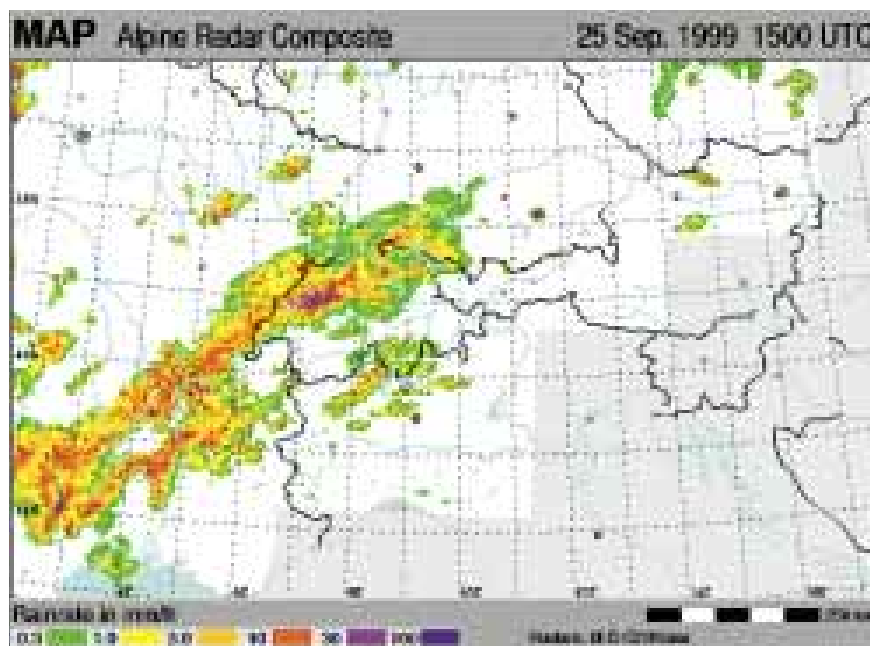
Une carte composite de l'ensemble des données des radars météorologiques des pays alpins a été produite par le DLR allemand pendant toute la durée de l'expérience (figure 3). Grâce à la transmission des données sur les divers réseaux opérationnels d'échange de données météorologiques et sur Internet, cette carte était disponible dans tous les centres d'opérations MAP environ 15 minutes après chaque observation. Elle a permis d'utiliser au mieux les moyens aéroportés à l'échelle des Alpes et de valider les prévisions de précipitations.

Les données de localisation des impacts de foudre au sol, fournies par des systèmes radioélectriques existant dans plusieurs pays alpins, ont également été centralisées avec plus de détails qu'en temps normal. Grâce à ces échanges, les positions des impacts ont été déterminées en temps réel avec une précision plus grande, atteignant le kilomètre sur l'ensemble de l'arc alpin. Ces cartes de foudre étaient disponibles en temps réel pour les prévisionnistes et les scientifiques du centre opérationnel d'Innsbruck.

L'agence spatiale Eumetsat a mis en œuvre, pour les besoins de MAP, un nouveau produit, le balayage rapide d'une petite partie de la surface du globe par le satellite *Météosat 6*. La zone balayée était centrée sur les Alpes et avait une extension en latitude d'environ 15 degrés. Dans ces conditions, une image



Figure 3 - L'image composite radar sur les Alpes produite par le DLR pendant MAP. Les intensités de précipitations sont indiquées en mm/heure, selon le code couleur en bas à gauche. (Image produite par M. Hagen)



satellitaire était disponible toutes les cinq minutes (toutes les trente minutes en temps normal), ce qui permettra de reconstituer le développement et le mouvement des masses nuageuses avec une plus grande précision (figure 4). Ces balayages rapides ne sont possibles techniquement que pour des durées limitées (environ vingt-quatre heures) et sur préavis de douze heures. Leur fonctionnement a été excellent, si bien qu'il est envisagé de généraliser dans un proche avenir ce type de prestation, en offrant deux fenêtres de balayage rapide, sur l'Europe et sur l'Afrique.

Enfin, la réalisation la plus spectaculaire a été la mise en place, pour la durée de l'expérience, d'une minichaîne de prévision numérique à haute résolution sur l'ensemble des Alpes, qui préfigure la nouvelle génération de modèles à l'origine du programme MAP. Cette minichaîne repose sur un modèle de recherche canadien (Benoit et al., 2001), alimenté en données initiales et aux limites par le modèle opérationnel suisse. Le modèle canadien fonctionnait avec un point de calcul tous les trois kilomètres sur un domaine de 1 000 km de côté, résolution qui avait été atteinte précédemment par Météo-France lors des Jeux olympiques d'Albertville en 1992 avec le modèle Périot, mais sur un domaine beaucoup plus petit. Les moyens de calcul étaient fournis par les universités suisses : le modèle fonctionnait toutes les nuits, effectuant une simulation de la période allant de 21 heures à 24 heures de la nuit suivante (vingt-sept heures de prévision). Les résultats, disponibles tôt le matin, étaient très précieux pour la dernière

Figure 4 - Un exemple d'image *Météosat* dans le canal visible (20 septembre 1999, 9 h 42 UTC), extrait d'une séquence de balayage rapide permettant de reconstituer très précisément le développement des nuages convectifs sur le Nord de l'Italie pendant une période d'observation intensive de MAP. (Image communiquée par V. Levizzani)



phase de planification des missions aériennes de la journée. Dans l'ensemble, les résultats de ce modèle expérimental ont séduit les chercheurs par leur finesse. Leur qualité dépendait néanmoins de celle des champs de plus grande échelle fournis par le modèle suisse. La forme, l'intensité, la chronologie et la localisation des zones pluvieuses ont été assez bien simulées, notamment sur la zone du lac Majeur, au centre du dispositif expérimental. Les écoulements simulés par le modèle dans les vallées du Rhin et du Wipp et ceux associés au sillage des Alpes se sont révélés en assez bon accord avec les observations aéroportées (voir un exemple en figure 15). Le principal échec concerne le déferlement des ondes de relief. Nous pensons actuellement qu'il faudrait augmenter encore la résolution d'un facteur deux (un point de calcul tous les 1,5 km) pour simuler correctement ces effets. Cette hypothèse sera vérifiée grâce aux mesures effectuées pendant la campagne MAP.

## Résultats expérimentaux

La période choisie, celle de l'automne 1999, s'est révélée riche en événements météorologiques intéressants. En dix semaines, dix-sept périodes d'observations intensives ont pu avoir lieu, totalisant trente-cinq jours d'observation. Tous les phénomènes intéressants pour MAP se sont produits avec une fréquence supérieure à la moyenne, deux fois plus que la moyenne pour certains d'entre eux. Aucune des dix années précédentes n'aurait pu fournir une combinaison plus favorable aux observations de MAP.

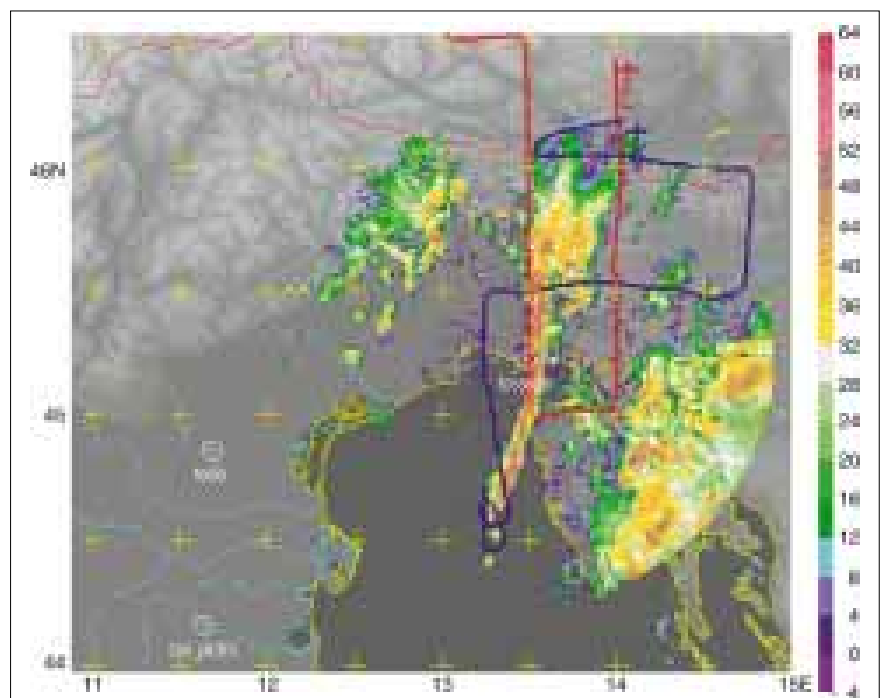
Environ 110 missions aériennes ont été effectuées, pour un total de 500 heures de vol. Le nombre total de radiosondages a été de 6 800, dont 4 000 en plus du programme normal d'observation. Il y a eu 84 vols de ballons à altitude constante, 17 séquences d'images *Météosat* à haute cadence (406 heures). Les radars de recherche ont fonctionné pendant 864 heures et les lidars pendant 187 heures.

Nous présenterons quelques résultats saillants dans l'ordre des projets. Pour une présentation plus complète, on pourra se reporter à Bougeault et al. (2001).

## Mécanismes des précipitations orographiques

Le choix de la zone du lac Majeur pour réaliser l'expérience s'est révélé excellent. Plusieurs événements de fortes pluies se sont déroulés durant la période expérimentale, avec des maxima dépassant parfois 200 mm par jour et même une fois 400 mm en deux jours. À titre indicatif, de telles quantités sont observées beaucoup plus rarement en France, même si, ironie du sort, les pluies très exceptionnelles du 12 novembre 1999 sur l'Aude ont largement dépassé ces valeurs. Plusieurs inondations locales se sont produites. Vingt-deux journées de mesures ont été obtenues

Figure 5 - Missions aériennes de l'*Electra* (en rouge) et du *P3* (en bleu) au matin du 4 octobre 1999. Les trajectoires des avions sont superposées à l'image du radar opérationnel italien de Fossalon di Grado, mis spécialement à la disposition du PC de Milan pour les besoins de l'expérience. Les réflectivités radar sont données en dBZ, selon l'échelle de couleurs de droite.



Le radar Doppler Ronsard (CNRS-CETP),  
situé dans la région du lac Majeur  
pendant l'expérience MAP.  
(Photo Météo-France, P. Taburet)

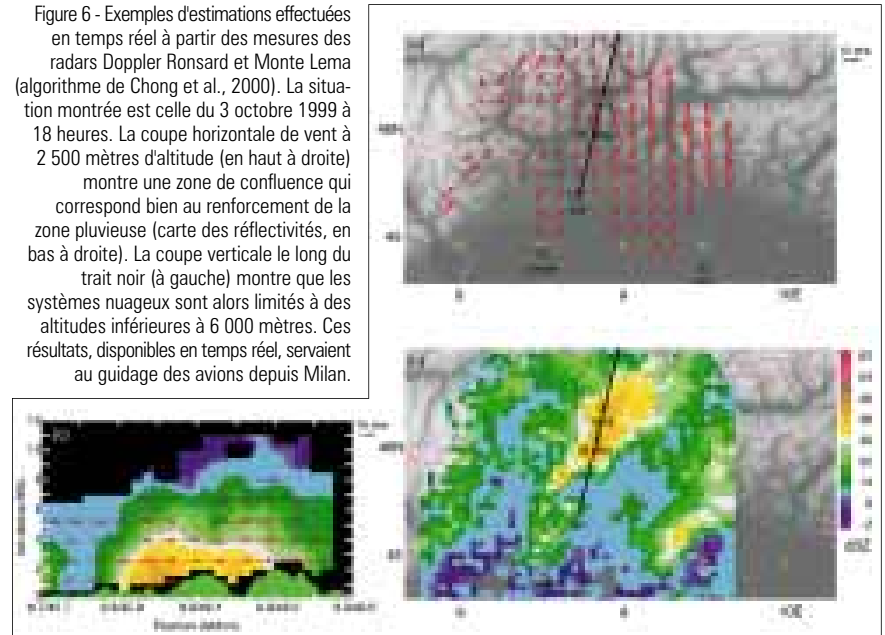


L'équipe française du PC de Milan-Linate  
montre à Bob Houze les premiers vents reconstitués  
en temps réel à partir des radars  
Doppler Ronsard et Monte Lema.  
(Photo Météo-France CNRM/Pad, Pascal Taburet)

dans le cadre de ce projet, dont quatre à cinq seront très largement étudiées en raison de leur intérêt. Ces journées couvrent des cas de nature variée : pluie convective ou stratiforme, locale ou généralisée, d'intensité faible, modérée ou intense.

Lors de ces événements, les données de l'ensemble des radars de la zone étudiée étaient retransmises en temps réel au centre d'opérations de Milan et une mosaïque des zones pluvieuses était constituée toutes les quinze minutes. Cette mosaïque a servi aux scientifiques à guider les avions de recherche vers les systèmes pluvieux les plus actifs, avec la complicité des contrôleurs aériens qui inséraient ces opérations dans un trafic commercial intense.

Figure 6 - Exemples d'estimations effectuées en temps réel à partir des mesures des radars Doppler Ronsard et Monte Lema (algorithme de Chong et al., 2000). La situation montrée est celle du 3 octobre 1999 à 18 heures. La coupe horizontale de vent à 2 500 mètres d'altitude (en haut à droite) montre une zone de confluence qui correspond bien au renforcement de la zone pluvieuse (carte des réflectivités, en bas à droite). La coupe verticale le long du trait noir (à gauche) montre que les systèmes nuageux sont alors limités à des altitudes inférieures à 6 000 mètres. Ces résultats, disponibles en temps réel, servaient au guidage des avions depuis Milan.



Des événements ont aussi été observés dans des zones géographiques différentes, notamment la chaîne de Apennins, sur les bords du golfe de Gênes, et les Alpes juliennes, à la frontière italo-slovène. Ces mesures accroissent la richesse et la diversité de la base de données recueillie. La figure 5 montre la mission effectuée le 4 octobre 1999 par les avions *Electra* et *P3* au voisinage d'un front convectif très actif, près de la frontière entre l'Italie et la Slovénie. Ces missions ont demandé un très gros travail de coordination entre les deux avions et avec le contrôle aérien.

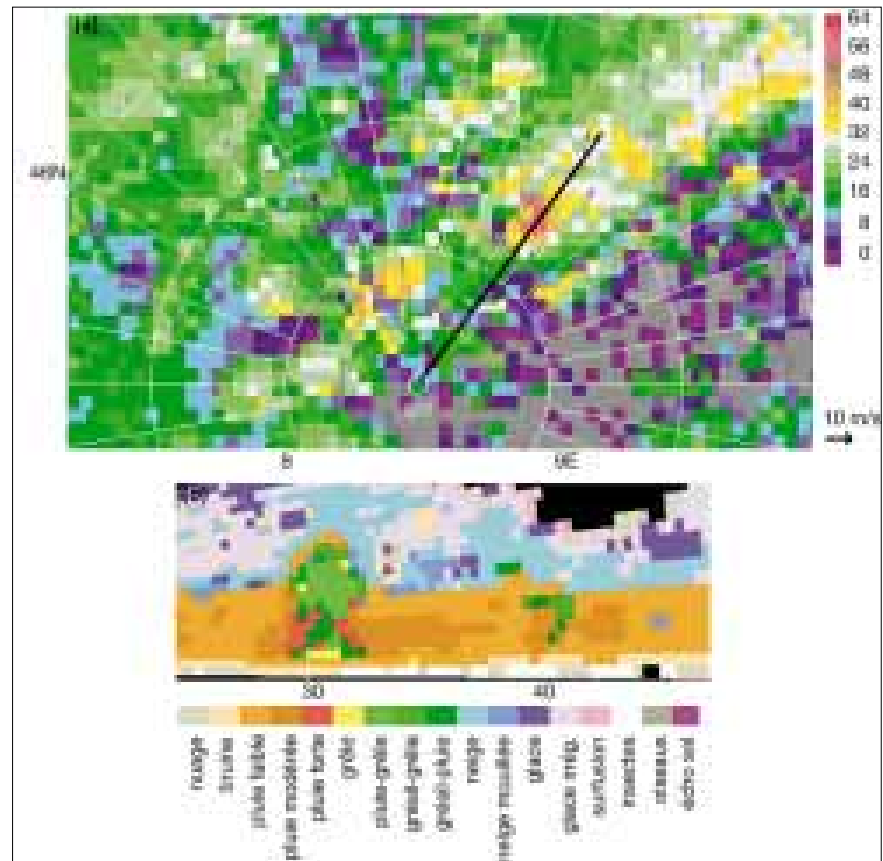
Un programme de calcul développé par Météo-France et le CNRS (Chong et al., 2000) a permis de reconstituer en temps réel les champs de vitesse des masses nuageuses avec une grande précision, en exploitant les mesures simultanées des radars Doppler Ronsard du CETP et Monte Lema de MétéoSuisse, distants de



70 kilomètres, avec la technique Dual Doppler (figure 6). De tels calculs sont effectués en temps différé depuis plusieurs années, mais leur mise en œuvre en temps réel représente une première mondiale.

Les radars de surface et les radars aéroportés permettaient ainsi d'obtenir, toutes les quinze minutes environ, des cartes en trois dimensions de la quantité totale d'eau de pluie et de glace en suspension dans ces nuages, ainsi que des vitesses de déplacement, avec une résolution de l'ordre du kilomètre sur l'horizontale et de la centaine de mètres sur la verticale. De telles cartes seront utiles pour comprendre les processus dynamiques qui permettent aux systèmes pluvieux de se déplacer et de se régénérer sur les reliefs. Elles permettront également de vérifier le réalisme des simulations numériques qui seront effectuées.

Figure 7 - En haut, réflectivité mesurée par le radar S-Pol le 3 octobre 1999 (coupe horizontale, en dBZ). En bas, coupe verticale le long de la ligne noire et interprétation des types de particules par l'algorithme de Vivekanandan et al. (1999). (Figure aimablement communiquée par R. Houze).



Les systèmes étudiés étaient rarement intenses, mais ils stationnaient très longtemps sur les reliefs autour du lac Majeur, produisant ainsi des quantités totales de pluie très importantes. Des zones d'intensification locale des précipitations ont pu être observées. Ces zones sont probablement déterminées par la topographie sous-jacente, mais selon une relation complexe que seule la simulation numérique permettra d'appréhender. Dans certains cas, des « panaches orographiques » (encore appelés systèmes en V) semblent émaner de zones bien particulières au sol. Ces panaches sont connus sur tous les reliefs de l'arc méditerranéen, en particulier en France sur les Alpes du Sud et les Cévennes. Les observations de MAP permettront de mieux comprendre le mécanisme de leur formation.

Un autre point notable est l'observation de minces courants d'air froid descendant de la montagne vers la plaine du Pô, sous les systèmes pluvieux. Ces courants sont probablement engendrés par l'évaporation des pluies au voisinage du sol ; ils pourraient créer un forçage supplémentaire important, contribuant à la permanence des systèmes nuageux. Enfin, dans au moins un cas, des cellules pluvieuses semi-circulaires ont été observées. Il faudra comprendre le mécanisme qui préside à cette organisation inédite.

Les manifestations électriques de ces systèmes nuageux ont pu être documentées sur cinq journées de mesures dans un site situé sur le lac Majeur. Les courants électriques associés aux précipitations ont atteint des valeurs encore jamais observées. L'activité électrique était fortement corrélée à la présence de cristaux de glace dans les nuages.





Michel André et Marie-Pierre Lefebvre dans le *Merlin IV*, juste avant son décollage de Milan-Linate pendant la campagne MAP. (Photo Météo-France CNRM/PAD, Pascal Taburet)

Le radar américain S-Pol était équipé d'un système à diversité de polarisation permettant, sous certaines hypothèses, de reconnaître le type d'hydrométéores, et en particulier de détecter les cellules de grêle et la neige (figure 7). Ces techniques sont encore au stade de test, et les avions de recherche (notamment le *Merlin IV* de Météo-France) ont effectué de nombreuses mesures in situ dans les systèmes pluvieux en vue

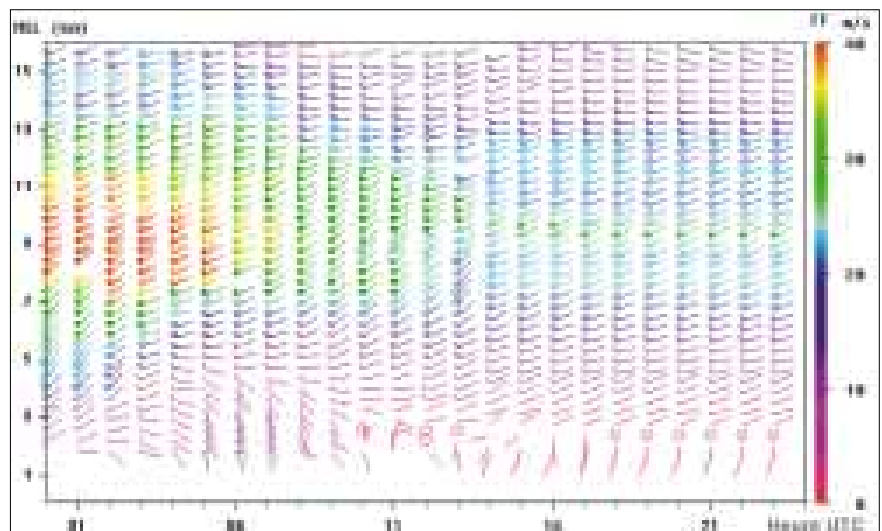
d'une plus ample validation. Ces mesures consistent en des comptages extrêmement rapides des gouttelettes nuageuses, ainsi que des déterminations de leur taille et de leur forme par une technique d'occultation lumineuse. Les gouttelettes varient en rayon de 2 microns à 6 millimètres et les cristaux de glace peuvent avoir des formes très variées. La taille des gouttes de pluie a également été observée au sol par des instruments spéciaux.

De manière générale, les chercheurs ont observé une très grande variété de comportements microphysiques au sein de ces systèmes nuageux. Cela n'est pas une bonne nouvelle, car cela signifie que ces nuages sont encore plus complexes qu'on ne le pensait.

Dans cet environnement, le *Merlin IV* de Météo-France a également conduit quelques missions dédiées à l'étude du givrage en vol des aéronefs. L'objectif de ce sous-programme est de cibler les conditions de givrage sévère qui ont récemment provoqué des accidents de turbopropulseurs. On cherchait notamment à mettre en évidence la présence éventuelle et le rôle des larges gouttes d'eau liquide surfondue à des températures comprises entre -5 et -15 degrés Celsius, ainsi que les capacités de détection de ces phénomènes par les radars centimétriques. Ce premier essai sera poursuivi par une expérience de plus longue durée en 2001.

Pour l'interprétation plus complète des phénomènes observés, il est très important de bien connaître les caractéristiques de la masse d'air en amont et le forçage par les flux de surface dans la zone considérée. C'est pourquoi les équipes françaises ont aussi mis en place des mesures complémentaires. Directement en amont de la zone du lac Majeur, les profileurs VHF, UHF et RASS du CNRM ont suivi en permanence le profil vertical des trois composantes du vent. La figure 8 montre un exemple de l'évolution de ces profils le 4 octobre 1999. Par ailleurs l'*Arat* a réalisé un grand nombre de missions sur le golfe de Gênes, entre Pise et Nice, pendant les événements pluvieux, tandis que l'*Arat* et le *Merlin* ont cartographié les flux de surface dans la vallée du Pô à deux reprises au cours de l'expérience.

Figure 8 - Évolution temporelle du profil vertical de vent observée le 4 octobre 1999 par le profileur VHF du CNRM, installé à Lonate Pozzolo, en amont de la zone cible du lac Majeur. Il s'agit d'une coupe z-t, l'axe vertical indiquant l'altitude et l'axe horizontal le temps. Les vents mesurés sont des vents horizontaux, représentés par une hampe qui indique la direction d'où vient le vent (rose des vents) et des barbules qui donnent sa vitesse en nœuds. L'échelle de couleurs donne cette vitesse en m/s. (Figure communiquée par V. Klaus)



## Anomalies de tourbillon potentiel en altitude



Roger Durbe intervient dans les boîtes de relais du profileur de vent du CNRM, installé pendant MAP à Lonate Pozzolo (Italie). (Photo Météo-France CNRM/PAD, Pascal Taburet)

Six journées de mesures ont permis d'étudier des intrusions d'air polaire, à fort tourbillon potentiel, arrivant sur les Alpes. L'un des objectifs consistait à étudier l'interaction entre ces phénomènes et la formation des pluies intenses. Cet objectif ne pourra pas être atteint, car aucune situation météorologique favorable n'a été rencontrée. Un autre objectif était d'étudier la destruction de ces poches d'air polaire par un mélange accéléré avec l'air environnant, sous l'influence des ondes excitées par le relief alpin. Cet objectif sera probablement atteint. Des mesures ont pu être réalisées dans ces poches d'air par les profileurs de vent du réseau français et par l'avion *Falcon* du DLR. En ce qui concerne le réseau de profileurs de vent, les capacités de détection des courants-jets qui se développent en haute altitude (8-12 km) sur les bords de ces poches d'air polaire ont été confirmées. La mesure de l'altitude de la tropopause, qui est plus basse à l'intérieur de ces poches, a également pu être obtenue. Cela donne accès à un suivi temporel fin qui permettra de mieux comprendre le mécanisme de dissipation.

L'avion *Falcon* a effectué plusieurs pénétrations dans ces zones et les a décrites, notamment au moyen d'un lidar à haute sensibilité pour la mesure de la vapeur d'eau (figure 9). Cela fournit des coupes verticales au-dessus des Alpes et en amont, dans la zone d'air polaire. Les modifications apportées par le forçage orographique devraient alors apparaître clairement. Une retombée de ces études sera une meilleure connaissance des échanges d'air entre la troposphère et la stratosphère au-dessus des montagnes.

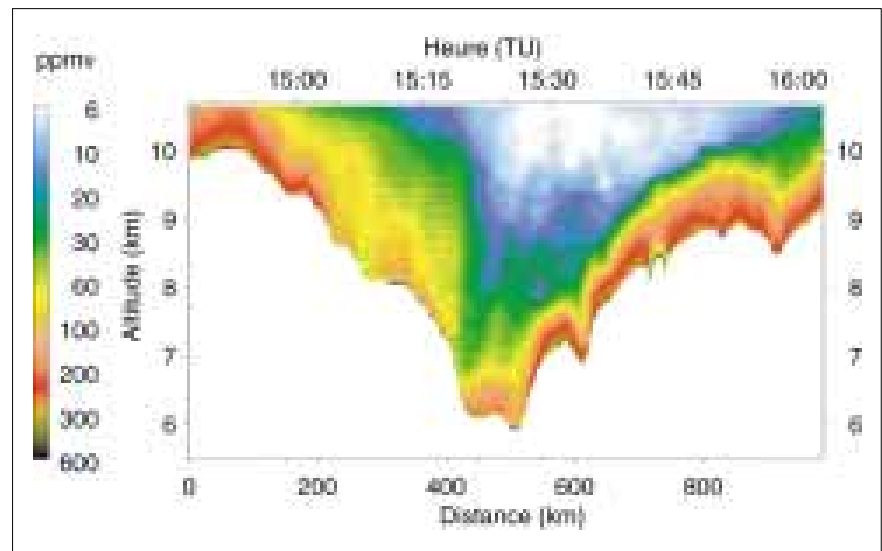


Figure 9 - Coupe verticale de l'humidité dans la foliation de tropopause associée à l'anomalie de tourbillon potentiel sur les Alpes, le 6 novembre 1999. L'humidité est ici exprimée par la concentration relative de la vapeur d'eau, en parties par millions. Mesures réalisées par le lidar à absorption différentielle (méthode Dial) du DLR, embarqué sur l'avion *Falcon*. (Figure communiquée par K. P. Hoinka)

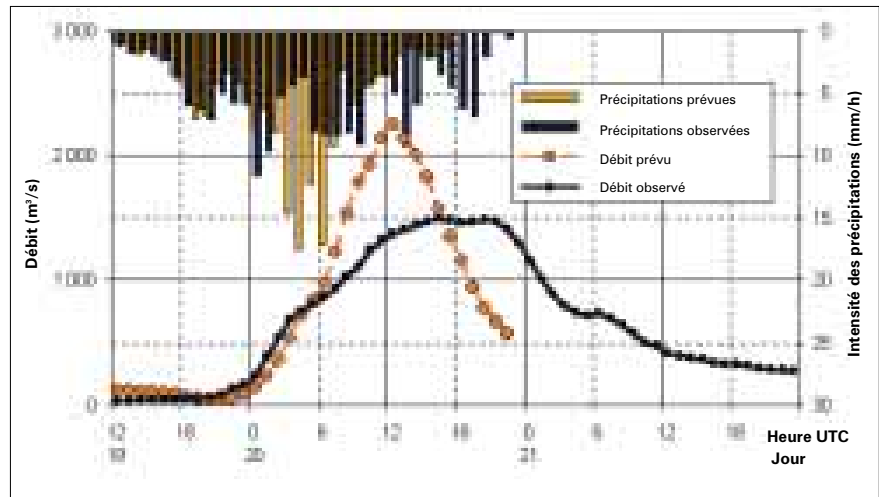
## Mesures hydrologiques et prévision des inondations

Les bassins versants des deux affluents principaux du lac Majeur, le Tessin et la Toce, avaient été choisis pour le volet hydrologique de MAP. La plupart des mesures supplémentaires effectuées dans le cadre de ce programme se concentraient sur la Toce. Il s'agissait de mesurer l'humidité du sol, les échanges d'eau entre le sol et l'atmosphère et, bien sûr, les précipitations. À deux reprises, la zone a été survolée par un hélicoptère équipé d'un radiomètre dans la gamme des micro-ondes, en vue d'établir l'utilité de ce type de mesures pour la connaissance de l'eau du sol superficiel.

Plusieurs crues intéressantes ont été enregistrées, notamment les 20 et 25 septembre 1999. Des modèles numériques d'écoulement ont été activés en temps quasi réel sur ces événements, en utilisant pour les données de précipitations des observations ou des prévisions de modèles atmosphériques (figure 10). Les quantités d'eau stockées ou déstockées par les barrages hydroélectriques ont également été communiquées par les agences concernées, ce qui permettra d'étudier la sensibilité des prévisions à la connaissance de ces données en temps réel. Les premiers résultats montrent que l'intensité des crues est à peu près bien simulée par les modèles, mais pas leur déroulement temporel, le maximum pouvant être simulé avec plusieurs heures de décalage.



Figure 10 - Débit observé et prévu de la Toce à Candoglia, les 19 et 20 septembre 1999 (échelle de gauche, en m<sup>3</sup>/s). La prévision est réalisée par le modèle hydrologique Dimosop de l'université de Brescia, forcé par les résultats du modèle météorologique Bolam du Fisbat (Bologne). Les précipitations prévues et observées sont indiquées en haut de la figure (échelle de droite). La surestimation des précipitations par le modèle atmosphérique conduit à la surestimation du débit. Toutefois, l'événement est assez bien signalé, et une telle prévision pourrait être utile. (Figure communiquée par R. Ranzi)



Dans le cadre de ce programme, le Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE) a également réalisé une prévision des pluies par bassins reposant sur la méthode des analogues, qui a donné des résultats intéressants. Il conviendra de comparer en détail dans un futur proche les mérites comparés des prévisions de pluie par modèle numérique et par cette dernière méthode.

### Dynamique de l'écoulement dans un col

Ce projet se déroulait dans la vallée du Wipp, au sud d'Innsbruck, qui s'ouvre vers l'Italie par le très large col du Brenner (1 300 m), la principale trouée dans l'arc alpin. Il a donné lieu à six journées de mesures. D'après la théorie, en situation de vent synoptique de sud ou sud-ouest, le vent est canalisé par le col et atteint des valeurs fortes susceptibles de déclencher des phénomènes de surcriticité et de ressaut hydraulique. Ces phénomènes peuvent également déclencher des ondes de relief intenses et de fortes turbulences. La réalité de ce phénomène a pu être établie grâce à plusieurs missions aériennes dans le col du Brenner et la vallée du Wipp. Le lidar Léandre embarqué à bord de l'avion français *Arat* a notamment fourni une belle coupe longitudinale de l'écoulement (figure 11), montrant une forte descente des masses d'air en aval du col suivie d'une brusque remontée, conformément à la théorie hydraulique. Le courant-jet ainsi engendré a pu être identifié jusque dans la vallée de l'Inn, où il débouche brusquement en créant des conditions extrêmement dangereuses pour l'aéronautique. Il a pu aussi être observé par un lidar Doppler américain situé dans la vallée du Wipp. Ces observations continues permettront de mieux comprendre l'évolution de ces phénomènes locaux en fonction de la situation météorologique à plus grande échelle.

En marge de ce projet, l'avion *Falcon* a effectué deux missions d'essai d'un instrument tout nouveau, le lidar Doppler franco-allemand Wind. Cet instrument a démontré à cette occasion sa capacité, grâce à un balayage conique, à mesurer le vent dans tout un volume situé sous l'avion et s'étendant jusqu'au sol en l'absence de nuages. La résolution atteinte est de l'ordre de quelques centaines de mètres. Les comparaisons avec des mesures conventionnelles de vent montrent une restitution très fiable de la vitesse horizontale.

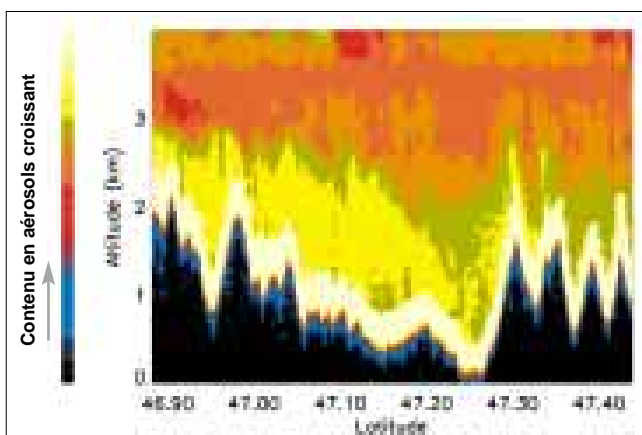


Figure 11 - Coupe verticale sud-nord le long de la vallée du Wipp, obtenue par le lidar Léandre (sur le *Fokker 27 Arat*) le 30 octobre 1999. La topographie sous-jacente est figurée en noir. À gauche, le col du Brenner est la principale percée dans l'arc alpin. À droite, la ville d'Innsbruck est à peu près à 47,25° Nord, alors que la vallée de l'Inn s'étend dans la direction est-ouest perpendiculairement au plan de la figure. La couche de vent fort est figurée en jaune ; elle est mise en évidence grâce à son fort contenu en aérosols. On note le comportement de type hydraulique, suivi d'un quasi-ressaut dans la vallée de l'Inn. (Figure communiquée par C. Flamant)

## Prévision du foehn

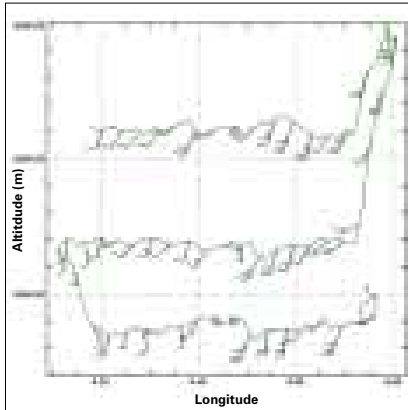


Figure 12 - Coupe verticale à travers le foehn réalisée par le *Merlin* le 5 novembre 1999. Le vent horizontal est donné en vitesse et en direction par une hampe et des barbules, comme sur la figure 8. Les trois niveaux de vol permettent d'appréhender la structure verticale de la veine de vent fort et la position du maximum. (Image communiquée par M.-P. Lefebvre)

Ce projet, qui a donné lieu à huit journées de mesures, se déroulait dans la vallée du Rhin, à cheval sur la Suisse, le Liechtenstein et l'Autriche. Le foehn est un vent de sud violent qui se déclenche dans cette vallée quand le vent synoptique s'oriente au sud ou au sud-ouest. On parle de foehn mince quand le vent tourne rapidement à l'ouest au-dessus des crêtes et de foehn profond quand le vent reste orienté au sud sur une large profondeur de l'atmosphère. Les deux types de conditions ont été observés pendant l'expérience. On a pu noter que le foehn s'établissait sur une période de plusieurs heures, mais disparaissait très rapidement. L'intensité du foehn a été cartographiée en trois dimensions grâce aux mesures de l'avion *Merlin* (figure 12), à celles de l'avion léger suisse *Dimona*, à de très nombreux radiosondages de l'armée suisse et à des mesures de surface réalisées par plusieurs universités. Des coupes à l'aide de scintillomètres ont également été réalisées d'un versant à l'autre, à 500 mètres au-dessus du sol de la vallée. Ces mesures continues dans le temps ont révélé des vents atteignant parfois une vitesse de 30 m/s à cette altitude. Une attention particulière a été accordée à la zone de confluence entre deux vallées située près de Vilters. Le lidar vent transportable du Laboratoire de météorologie dynamique (Drobinski et al., 2000) a été installé sur ce site, afin d'examiner le comportement de l'écoulement, très variable d'un jour à l'autre (figure 13).

La turbulence engendrée par la variation brutale du vent au sommet de la zone de foehn a été particulièrement bien observée par le *Merlin*. Au voisinage des crêtes, l'énergie cinétique de la turbulence atteignait des valeurs fortes, de l'ordre de  $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , c'est-à-dire plus que ce qui a été observé il y a dix ans sur les Pyrénées (expérience Pyrex). Ce type de mesure est extrêmement rare.

Par ailleurs, des ballons à volume constant lancés au sud des Alpes ont pu être localisés par le système GPS tout au long de leur traversée de la chaîne, ce qui a donné une mesure très précise de la trajectoire des masses d'air à l'origine du foehn.

Le foehn n'atteint pas toujours ni partout le sol de la vallée, qui reste parfois protégé par une inversion thermique forte. La distinction entre les deux masses d'air est marquée par la vitesse du vent et la température, mais aussi par le contenu en ozone. Un des buts du programme était d'arriver à une meilleure compréhension des mécanismes qui permettent de dissiper ces lentilles d'air froid. Les mesures de MAP devraient en effet permettre de comparer l'intensité des différents effets qui interviennent : réchauffement par le rayonnement solaire pendant la journée, écoulement de l'air froid vers l'aval, mélange avec la couche de foehn facilité par la turbulence forte, etc. On a observé avec surprise que ces lentilles d'air froid sont parfois chassées en très peu de temps par le foehn, ce qui conduit à l'existence temporaire d'une limite quasi verticale entre les deux masses d'air.

## Déferlement des ondes de relief

Figure 13 - Vitesse radiale observée le 29 octobre 1999 entre 17 h 20 et 18 h 22 UTC par le lidar vent transportable du LMD. Le lidar est positionné à Vilters, dans un carrefour de vallées. La vallée principale, celle du Rhin, descend de Chur, à droite, et continue vers le Bodensee au nord. À l'ouest, s'ouvre une vallée adjacente dans la direction de Seez. Les vitesses sont comptées négativement quand elles se dirigent vers le lidar et positivement quand elles s'en éloignent. (Figure communiquée par P. Drobinski)

Plusieurs ondes de relief fortes ont été observées pendant l'expérience grâce aux avions de recherche (neuf journées de mesures). Ces systèmes étaient localisés dans des zones variées des Alpes. Des ondes provoquées par le mont Blanc ont ainsi fait

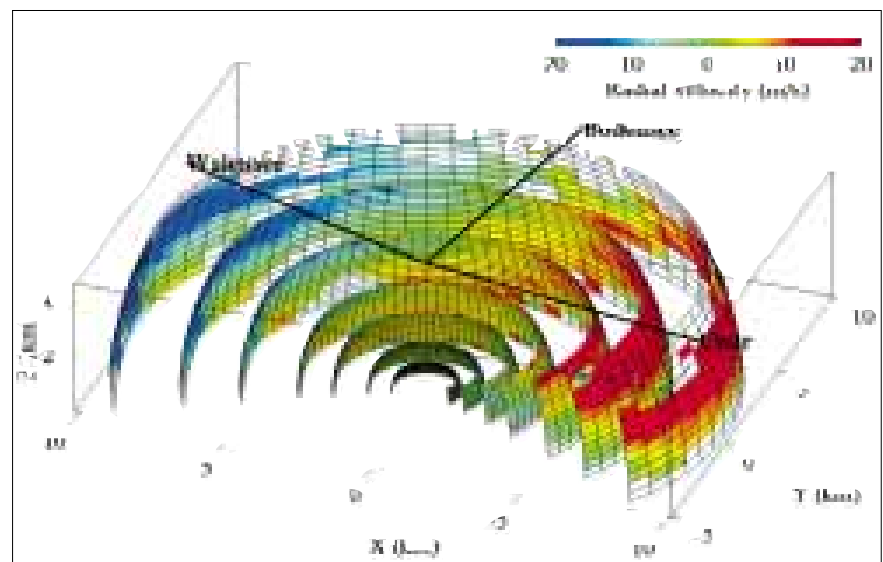
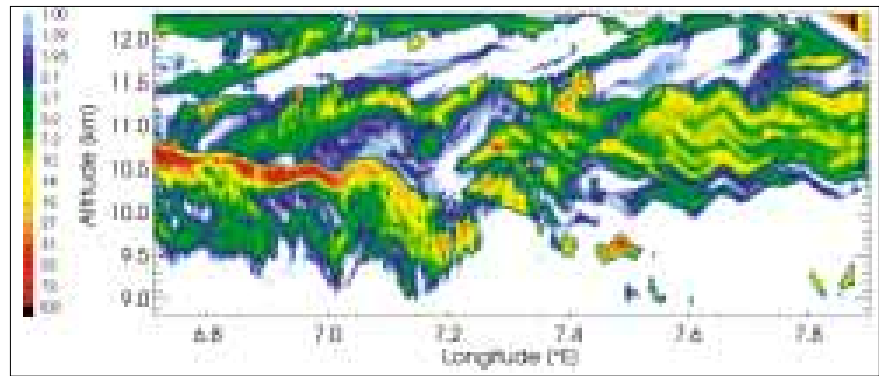


Figure 14 - Ondes de relief observées le 2 novembre 1999 à la verticale du mont Blanc par le lidar du DLR embarqué sur l'avion *Falcon*. Ce lidar est employé dans ce cas en rétrodiffusion simple à 1,064  $\mu\text{m}$ . L'intensité du signal rétrodiffusé (échelle de couleurs à gauche) donne la signature des filets d'air originaires d'altitudes diverses et permet de visualiser le mouvement ondulatoire de manière beaucoup plus claire qu'avec tout autre instrument. Cette mission qui rassemblait cinq avions fut la plus importante de l'expérience. (Figure communiquée par H. Volkert)



l'objet d'une mission conjointe de cinq avions, la plus importante en nombre de toute l'expérience (figure 14). D'autres missions coordonnées se sont déroulées sur le Monte Rosa et sur les Hohe Tauern en Autriche. Lors de ces missions, des vitesses verticales de l'air atteignant localement 8 m/s à 5 000 m d'altitude ont été observées, ce qui représente une première dans les Alpes, mais aussi un danger certain pour l'aviation légère. Toutefois, les fortes zones de turbulence créées par des ondes de relief déferlantes n'ont pas été découvertes, ce qui constitue le principal échec. C'est peut-être dû à l'absence de situations météorologiques favorables, mais plus sûrement au fait que ces zones sont en général petites et sporadiques et que l'on ne risque pas de les trouver si l'on ne sait pas à priori où les chercher.

Le projet aura néanmoins servi à maîtriser l'utilisation de nouveaux moyens de mesure pour la recherche de ces phénomènes, comme les lidars aéroportés, qui se sont révélés très performants. Par ailleurs, les mesures obtenues dans les ondes très développées, à la limite du déferlement, permettront quand même de critiquer et d'améliorer les modèles numériques. On pourra notamment étudier l'effet des poches d'air froid dans les vallées, qui limitent l'altitude efficace des montagnes pour la génération des ondes, ainsi que la réponse des ondes en présence de plusieurs crêtes successives. Ces améliorations permettront peut-être le succès lors d'une prochaine expérience.

## Structure du sillage engendré par les Alpes

L'avion américain de recherche *Electra* décolle d'Innsbruck  
(Photo Météo-France CNRM/PAD, P. Taburet)



La structure du sillage des Alpes a été documentée en plusieurs endroits (six journées de mesures) : l'étude du mistral au large de la Côte d'Azur a fait l'objet de plusieurs missions coordonnées des avions français et américains. Les mesures ont confirmé l'existence d'une transition très brutale entre la zone de mistral, où le vent atteint 30 m/s, et la zone protégée par l'effet d'abri des Alpes, où le vent est faible. On a établi que cette zone de transition s'étend jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de la montagne et donne lieu à des phénomènes de création de tourbillons par instabilité, qui peuvent ensuite influencer l'évolution météorologique en aval des Alpes. La structure tridimensionnelle de cette zone pourra être déduite des mesures et des simulations numériques.

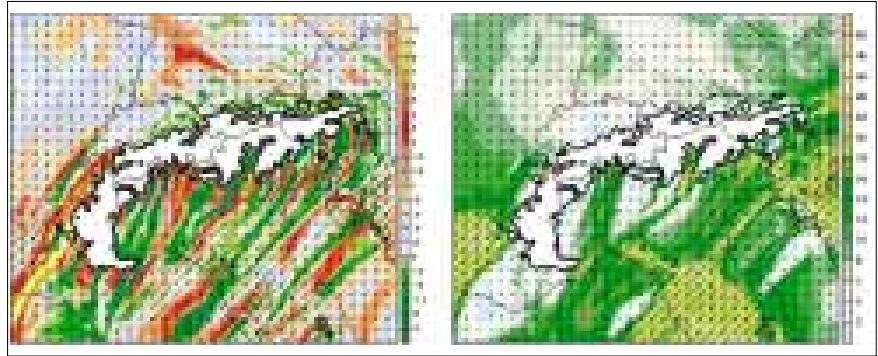
La structure de l'écoulement au voisinage de la surface est, par ailleurs, très différente d'un côté et de l'autre de la zone de transition. Des valeurs tout à fait exceptionnelles des flux turbulents d'humidité à la surface de la Méditerranée ( $500 \text{ W/m}^2$ ) ont été observées pendant ces vols, ce qui amènera sans doute à réviser certaines des équations des modèles de prévision.

Mais le principal résultat réside dans la vérification directe de l'existence, sur la plaine du Pô, des bandes secondaires de tourbillons créées par les grands cols alpins, comme le Saint-Gothard et le Brenner (figure 15). Par vent synoptique de nord, les accélérations locales du vent en aval de ces cols sont toujours présentes à plusieurs centaines de kilomètres de la

Figure 15 - Simulation numérique par le modèle canadien MC2, valable pour le 8 novembre 1999.

À gauche, le tourbillon potentiel à 850 hPa montre des bandes alternées de valeurs positives et négatives, qui matérialisent le sillage de la montagne.

L'objectif du projet P7 était de valider cette structure mise en évidence par la simulation. Les mesures aéroportées ont effectivement largement confirmé l'existence de ces structures : à droite, la vitesse du vent à la même altitude montre les zones de ralentissement créées par l'effet d'abri. (Figure communiquée par C. Schär et R. Benoit)



crête ; cette structure particulière de l'écoulement doit avoir des conséquences fortes sur l'ensemble de la dynamique de l'atmosphère dans cette région. Cette structure très complexe a pu être observée par des missions coordonnées des avions français et américains. Jusqu'à quatre avions ont volé simultanément à des altitudes différentes pour découvrir la structure du sillage alpin. Grâce à ces mesures, nous pourrions améliorer les modèles numériques jusqu'à obtenir une structure réaliste pour ce « sillage alpin », avec toutes ses conséquences. Des phénomènes similaires ont également été observés au nord des Alpes et au large des Alpes dinariques, sur l'Adriatique.

## La turbulence dans les vallées alpines

Le dernier projet a consisté à mesurer l'intensité de la turbulence atmosphérique dans une petite vallée en V : la Riviera (Suisse). Les mesures, effectuées essentiellement par beau temps (environ quinze journées), permettront d'améliorer la représentation du frottement de l'atmosphère et des échanges de chaleur avec la surface terrestre. Elles comprenaient des vols d'avion léger, des mesures par ballon captif, par scintillométrie et par anémométrie sonore, deux sodars et des lâchers de traceurs (figure 16). Un instrument d'un type nouveau, le profileur de température par micro-ondes, a aussi été expérimenté. Le principal résultat est la confirmation que l'air de la vallée est très largement isolé de la circulation générale supérieure.

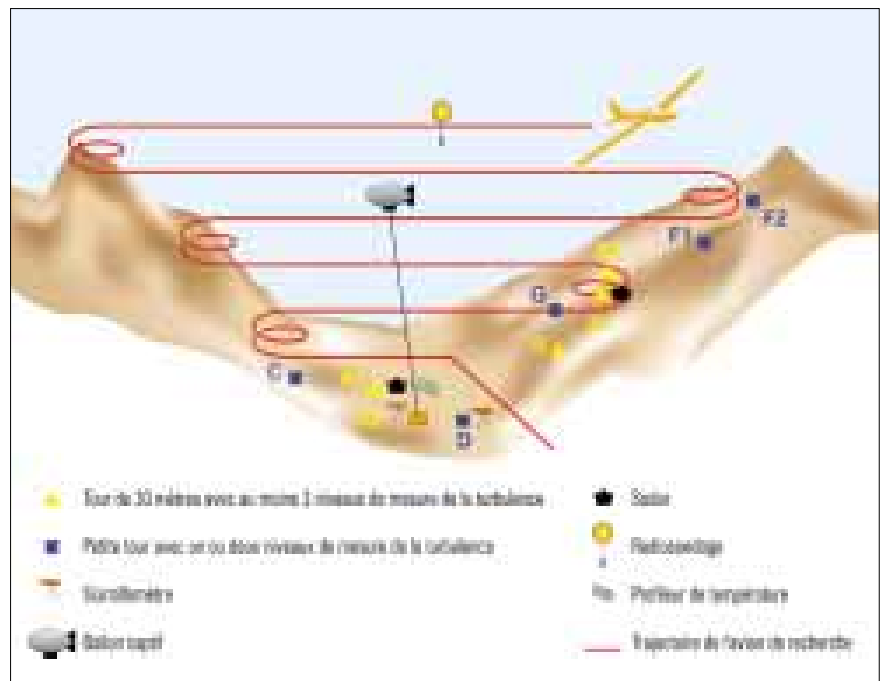


Figure 16 - Panorama des instruments déployés dans la vallée de la Riviera. (Figure communiquée par M. Rotach)

Des mesures similaires ont été effectuées par plusieurs universités italiennes sur la plaine du Pô. La comparaison entre ces deux ensembles de données permettra de découvrir comment la présence du relief augmente ou inhibe les échanges d'énergie et de matière entre la surface et l'atmosphère.



## Conclusions et perspectives

La contribution française à MAP a été substantielle et particulièrement appréciée par nos partenaires. Nous tenons à remercier ici l'ensemble des participants sur le terrain, pour leur motivation sans faille, ainsi que tous ceux qui, restés sur leur lieu de travail habituel, ont permis le bon déroulement des opérations par une surveillance régulière.

La participation française a été rendue très visible par une politique de contribution active au « Data Field Catalog », qui permettait à l'ensemble des participants d'avoir accès rapidement aux résultats des autres équipes. Les équipes françaises étaient bien souvent les premières à y déposer images et comptes rendus. On peut encore consulter ces différentes informations sur Internet à l'adresse [[www.joss.ucar.edu/map/catalog/](http://www.joss.ucar.edu/map/catalog/)].

Le dépouillement complet des mesures et la vérification de leur qualité va prendre environ un an aux très nombreuses équipes françaises, européennes et américaines engagées dans MAP. Il s'agit en effet souvent d'instruments de pointe, tels les lidars et les radars aéroportés, qui ne sauraient fournir un résultat complètement validé sans un examen attentif. L'un des points les plus difficiles pour les équipes françaises sera le traitement des données des radars Doppler, tant installés au sol qu'aéroportés, en présence du relief alpin très complexe. Il est nécessaire d'identifier clairement l'effet du sol sur les mesures et de l'éliminer pour reconstituer une vision précise des masses nuageuses et de leur mouvement. Ce travail sera partagé avec les équipes américaines. Une autre difficulté est constituée par le traitement des mesures aéroportées en présence de givrage des instruments, les vols ayant eu lieu dans des conditions parfois difficiles.

Parallèlement, les travaux de simulation numérique ont débuté par la qualification des conditions initiales pour chaque journée d'observation. Les données les plus classiques, comme les radiosondages et les observations au sol, sont assimilées dans les modèles pour créer des états initiaux réalistes. Les simulations numériques sont comparées aux mesures, notamment celles concernant la microphysique des nuages, et l'on tentera d'améliorer les paramètres des modèles numériques pour se rapprocher des observations. À ce stade, une convergence entre les découvertes des huit projets devrait s'établir et l'on devrait arriver à une vision claire de l'écoulement à l'échelle de l'ensemble des Alpes. En dernier lieu, on tentera d'initialiser les calculs en tenant compte des observations plus sophistiquées, comme les champs de vitesse reconstitués à partir des observations des radars Doppler ou des lidars. On pourra alors conclure, d'ici à deux ou trois ans, sur l'apport de chaque système d'observation pour la prévision et faire des recommandations pour l'évolution du réseau opérationnel de mesures météorologiques.

Les progrès de l'exploitation scientifique du programme MAP seront exposés régulièrement dans les conférences scientifiques. Le programme MAP organise lui-même une réunion annuelle qui tourne d'un pays à l'autre. Cette réunion a eu lieu en 1998 en France, à Chamonix. Le site Internet de MAP donne accès à l'ensemble des observations et à de nombreux documents de synthèse permettant de suivre ces progrès. Notez son adresse : [[www.map.ethz.ch](http://www.map.ethz.ch)].

## Bibliographie

- **Benoit R. et al.**, 2001 : The realtime ultrafine scale forecast support during the Special Observing Period of the MAP. À paraître au *Bull. Amer. Meteor. Soc.*
- **Binder P. et C. Schär**, 1996 : *MAP Design Proposal*. 75 p. Disponible au MAP Programme Office, SMI, CH-8044 Zurich, Suisse.
- **Binder P., A. Rossa, P. Bougeault, J. Moore, D. Jorgensen et M. Bolliger**, 1999 : *MAP Implementation Plan*. Disponible au MAP Programme Office, SMI, CH-8044 Zurich, Suisse.
- **Bougeault P., B. Benech, P. Bessemoulin, B. Carissimo, A. Jansa, J. Pelon, M. Petitdidier et E. Richard**, 1996 : Les résultats de Pyrex. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 16, 11-30.
- **Bougeault P., P. Binder et J. Kuettner**, 1998 : *MAP Science Plan*. 64 p. Disponible au MAP Programme Office, SMI, CH-8044 Zurich, Suisse.
- **Bougeault P., P. Binder, A. Buzzi, R. Dirks, R. Houze, J. Kuettner, R. B. Smith, R. Steinacker, H. Volkert and all MAP scientists**, 2001 : The MAP Special Observing Period. À paraître au *Bull. Amer. Meteor. Soc.*
- **Chong M., J.-F. Georgis, O. Bousquet, S. R. Brodzik, C. Burghart, S. Cosma, U. Germann, V. Gouget, R. A. Houze Jr., C. N. James, S. Prieur, R. Rotunno, F. Roux, J. Vivekanandan et Z. X. Zeng**, 2000 : Realtime wind synthesis from Doppler radar observations during the Mesoscale Alpine Programme. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2953-2962.
- **Drobinski P., A. M. Dabas et P. H. Flamant**, 2001 : Remote measurement of turbulent wind spectra by heterodyne Doppler lidar technique. À paraître au *J. Appl. Meteor.*
- **Gérard F.**, 1999 : Eucos, l'observation météorologique à l'heure européenne. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 27, 47-52.
- **Vivekanandan J., D. S. Zrnic, S. M. Ellis, R. Oye, A. V. Ryzhkov et J. Straka**, 1999 : Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 381-388.