

No. 150

LE PROGRAMME MESOMOD DE L'ISM

(Développement d'un modèle numérique de prévision  
à méso-échelle)

Jean Quiby, Francis Schubiger, Peter Binder

Octobre 1988

Prévision numérique

551.509.313

**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt  
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie  
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia  
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**



No. 150

LE PROGRAMME MESOMOD DE L'ISM

(Développement d'un modèle numérique de prévision  
à méso-échelle)

Jean Quiby, Francis Schubiger, Peter Binder

Octobre 1988

Prévision numérique

551.509.313

## Résumé

Tous les services météorologiques basent aujourd'hui leurs prévisions du temps sur les résultats de simulation numérique. En Europe, les modèles à aire limitée qui sont en exploitation recouvrent un large domaine spatial (toute l'Europe de l'ouest plus une partie de l'Atlantique). Il a été décidé de ne pas rajouter un modèle à cette série, mais plutôt de développer un modèle à méso-échelle. Vu la modicité de notre effectif, il a été choisi, pour gagner du temps, de prendre un modèle à domaine limité étranger existant et de l'adapter pour en faire un modèle à méso-échelle. La simulation numérique à méso-échelle étant un domaine difficile et nouveau ne pouvant pas s'appuyer sur beaucoup d'expérience, il a aussi été décidé de ne pas faire ce travail seul, mais en collaboration avec une autre institution. Après une évaluation minutieuse, notre choix s'est porté sur le Service météorologique de la RFA qui prévoit de développer un modèle à méso-échelle à partir de son modèle régional Europa. En plus de la collaboration avec le Deutscher Wetterdienst, nous voulons poursuivre et si possible intensifier la collaboration avec l'EPF de Zurich dans le domaine de l'analyse à méso-échelle. De part le relief très tourmenté que connaît la Suisse, il s'agit d'un problème très difficile.

## Zusammenfassung

Heutzutage stützen alle Wetterdienste ihre Vorhersagen auf die Resultate von numerischen Simulationen. In Europa decken alle in Betrieb stehenden Ausschnittmodelle ein grosses geographisches Gebiet ab (ganz Westeuropa und einen Teil des Atlantiks). Es wurde beschlossen, nicht ein gleichartiges Modell den bestehenden hinzuzufügen, sondern vielmehr ein mesoskaliges Modell zu entwickeln. Angesichts der Beschränktheit unserer Mittel und um Zeit zu gewinnen wurde entschieden, ein ausländisches Ausschnittmodell zu übernehmen und daraus ein mesoskaliges Modell abzuleiten. Da die mesoskalige, numerische Simulation ein schwieriges Gebiet ist, bei dem man sich nicht auf viel Erfahrung abstützen kann, wurde auch beschlossen, diese Arbeit nicht allein, sondern in Zusammenarbeit mit einer anderen Institution durchzuführen.

Nach eingehender Prüfung ist unsere Wahl auf den Deutschen Wetterdienst gefallen, der seinerseits die Entwicklung eines mesoskaligen Modells, ausgehend von seinem regionalen Europa-Modell, vorsieht. Zusätzlich zur Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst wollen wir die Zusammenarbeit mit der ETH Zürich auf dem Gebiet der mesoskaligen Analyse, welche angesichts der komplizierten Oberfläche der Schweiz ein sehr schwieriges Problem darstellt, weiterführen und wenn möglich ausbauen.

### Riassunto

Oggigiorno tutti i servizi meteorologici basano le loro previsioni del tempo sui risultati di simulazioni numeriche. In Europa i modelli ad area limitata in esercizio coprono tutti una vasta superficie comprendente l'Europa occidentale e parte dell'Atlantico. E' così stato deciso di non aggiungere un altro modello a questa serie, ma piuttosto di sviluppare un modello a meso-scala. Data la ristrettezza del personale e per accelerare i già esistente e di trasformarlo in uno a meso-scala con gli adattamenti opportuni. Inoltre, essendo la simulazione numerica a meso-scala un campo nuovo e difficile, dove non ci si può basare su molte esperienze, è caduta sul Servizio meteorologico tedesco (DWD), che pure prevede di sviluppare un modello a meso-scala a partire dal suo modello "Europa" ad area limitata. Nel campo dell'analisi a meso-scala, oltre alla collaborazione con il DWD, si vorrebbe continuare e se possibile ancora intensificare la cooperazione con il Politecnico federale di Zurigo. Dato il rilievo molto accidentato della Svizzera il problema si presenta infratti molto complesso.

### Summary

All the meteorological services rely nowadays on the results of numerical simulations for their weather forecasts. In Europe, the limited area models which are in operation cover a large domain, usually all Western Europe plus a part of the Atlantic Ocean. It has been decided by the Swiss Meteorological Institute not to add another model to that series,

but rather to develop a meso-scale model. Because of the modicity of our staff, we have chosen in order to save time to take an already existing foreign limited area model and to derive a mesoscale model from it. Mesoscale numerical simulation being a new and difficult field where only a limited amount of experience has been accumulated, it has also been decided not to endeavour this task by ourselves but to look for a collaboration with another institution. After a thorough evaluation, we have chosen to work with the Meteorological Services of the Federal Republic of Germany which planned to develop a mesoscale model from their limited area model (their so-called Europa model). Next to the collaboration with the German Weather Services, we want to pursue and if possible to intensify the already existing collaboration with the Swiss Federal Institute of Technology in the field of mesoscale analysis. It is for Switzerland a very difficult problem because of the steep and complicated orography of that country.

## Table des matières

	<u>Page</u>
1. <u>Définition, but et généralités</u>	1
1.1 Importance de la prévision numérique pour la prévision du temps	1
1.2 Définition d'une voie suisse	2
1.3 Spécificités et difficultés de la simulation numérique à méso-échelle	3
2. <u>Choix d'un modèle et d'un partenaire</u>	5
2.1. Considérations générales	5
2.2 Choix et caractéristiques des modèles retenus pour évaluation	6
2.2.1 Formulations adiabatiques	7
2.2.2 Formulations diabatiques	9
2.2.3 Conditions initiales	10
2.2.4 Etats opérationnels	11
2.2.5 Modifications prévues pour ces prochaines années	12
2.3 Décision	13
3. <u>Das EUROPA-Modell</u>	15
4. <u>Organisation du travail</u>	20
4.1 Définition de la stratégie	20
4.2 Collaboration avec l'EPF de Zurich pour l'analyse	21
4.3 Description de la première étape: Projet FORLAM	21
4.4 Etape suivante	22
4.5 Façon de travailler actuelle	23
4.6 Groupe de travail MESOMOD	24
5. <u>Concept pour l'exploitation future du modèle</u>	25
5.1 Ce que devrait apporter le modèle	25
5.2 Schéma du mode d'exploitation envisagé	26
5.3 Schéma du Programme MESOMOD	29
6. <u>Description des projets de soutien</u>	30
6.1 SHWAMEX	30
6.2 DIABIN	31

	<u>Page</u>
6.3 ANOPIN	33
6.4 MATHIN	34
6.5 MOPOPAC	36
7. Liste des modèles à domaine limité opérationnels en Europe occidentale	38
8. Références	40

## 1. Définition, but et généralités

### 1.1 Importance de la prévision numérique pour la prévision du temps

Tous les services météorologiques nationaux européens utilisent les résultats de simulations numériques pour l'établissement de leurs prévisions du temps.

Les résultats les plus utilisés sont ceux des modèles de simulation globaux ou hémisphériques. Ils servent à l'établissement de prévisions jusqu'à cinq jours à l'avance.

Tous les pays européens utilisent aussi les données livrées par des modèles à domaine limité, c'est-à-dire des modèles dont l'extension géographique est plus restreinte que l'hémisphère. A cause de la contrainte physique reliant la grandeur du domaine d'intégration à l'échéance maximale de la prévision, les modèles à aire limitée ne peuvent produire des prévisions qu'à courte échéance. L'avantage de ces modèles sur les modèles globaux et hémisphériques est leur plus grande résolution spatiale.

Les modèles à domaine limité peuvent être utilisés de deux façons distinctes: en mode adaptif ou en mode d'analyse.

En mode adaptif, les conditions initiales sont déterminées par interpolation, sur la grille du modèle limité, de champs météorologiques à grande échelle normalement fournis par un modèle hémisphérique ou global. Ces champs sont soit des analyses, soit des champs prévus, par exemple les champs à +24h, +48h, etc. Le modèle ajuste ces champs aux caractéristiques locales, spécialement à l'orographie.

Le mode d'analyse se distingue du précédent par le fait que, contrairement à ce dernier, des observations sont introduites dans le processus de la détermination des conditions initiales.

Ces dernières années, des modèles numériques à très haute résolution spatiale ont été développés. Leur but est de simuler, pour un domaine spatial restreint, les processus atmosphériques avec un maximum de détails. Comme exemple d'un tel modèle, citons celui présentement en développement au Service météorologique britannique. Une fois opérationnel, il couvrira les îles du même nom avec une maille de 15 km, peut-être 10.



## 1.2 Définition d'une voie suisse

Actuellement, en Europe, l'on a en exploitation par les différents services météorologiques nationaux, un modèle global (en plus, il y a celui du Centre européen), deux modèles hémisphériques et 11 modèles à domaine limité, dont environ la moitié sont des copies plus ou moins modifiées de modèles importés (voir liste sous Point 7). Tous ces modèles effectuent en routine au moins une prévision par jour. Un fait capital à noter est que la Suisse se trouve entièrement comprise dans tous les domaines spatiaux de ces modèles. Ceci est dû à trois facteurs:

- sa position centrale en Europe,
- sa faible superficie,
- la présence des Alpes, car il est préférable de ne pas avoir la limite du domaine d'intégration sur un relief élevé.

Cette chance n'a jusqu'à ce jour peut-être pas été suffisamment exploitée par l'ISM: nos prévisionnistes pourraient à notre connaissance disposer de meilleurs produits que certains qu'ils utilisent actuellement, notamment en considérant les cartes du LAM de Bracknell. Nous persistons à croire qu'en faisant le bon choix dans tous les modèles étrangers incluant la Suisse, un potentiel non négligeable pour l'amélioration des prévisions du temps reste à exploiter.

Le domaine spatial de la majorité des modèles à domaine limité en exploitation dans les différents services météorologiques européens comprend une partie plus ou moins grande de l'Atlantique et s'étend en gros jusqu'à l'Oural et dans la direction méridionale du Nord de la Scandinavie jusqu'à la Méditerranée. Nous estimons inutile de rajouter un modèle opérationnel à cette série. Les cartes en prévision à cette échelle nécessaires pour nos prévisionnistes devraient continuer à être fournies par l'étranger comme c'est le cas actuellement.

Un autre fait important doit être considéré: avec son réseau de stations automatiques et son réseau radar, la Suisse dispose d'un

système d'observation à méso-échelle en temps réel qui recouvre tout le pays. Il s'agit de données à haute résolution temporelle qui ne peuvent pas être considérées dans la définition des conditions initiales des modèles en exploitation à l'étranger car la résolution spatiale de ces derniers est insuffisante et, en grande partie, elles ne seront de toute façon pas disponibles à l'étranger.

Ces deux faits - le grand nombre de modèles à domaine limité couvrant toute l'Europe de l'Ouest et l'existence d'un réseau d'observation à méso-échelle en Suisse - nous conduisent à proposer que l'activité en prévision numérique à l'ISM s'engage sur une voie qui consiste à se concentrer sur un domaine restreint mais à le traiter avec la résolution la plus grande possible afin d'essayer de livrer à nos prévisionnistes un maximum de détails. Ce but ne peut être atteint que par l'exploitation d'un modèle à méso-échelle. La démarche pour atteindre ce but est l'objet du Programme MESOMOD.

### 1.3 Spécificités et difficultés de la simulation numérique à méso-échelle

A la différence des modèles à grande échelle, un modèle à méso-échelle doit posséder une physique très élaborée puisqu'il doit prévoir le temps - et cela localement - et pas seulement les champs météorologiques à l'échelle synoptique.

La détermination d'analyses à méso-échelle à partir des observations est une tâche éminemment compliquée dans les Alpes vu les grandes différences qu'il peut y avoir entre deux stations situées dans des vallées voisines (par exemple de part et d'autre de la crête des Alpes) et aussi du découplage entre la circulation de vallée et la situation synoptique.

Concernant la dynamique d'un modèle à méso-échelle devant être utilisé en région très montagneuse, elle devrait peut-être, afin de pouvoir traiter l'orographie au mieux, renoncer à certaines facilités usuelles pour les modèles à domaine limité. Par exemple, une coordonnée verticale suivant le terrain n'est peut-être pas idéale car elle ne bloque pas assez le flot. De plus, si l'orographie est abrupte, des précautions doivent être prises pour éviter la réflexion des ondes de gravité au sommet du modèle.

Le domaine spatial d'un modèle à méso-échelle étant par la force des choses petit, sa capacité prévisionnelle s'en trouve fort restreinte. La cause est due au fait que l'information fournie sur les frontières du domaine est une information à une échelle plus grande que celle que le modèle est capable de traiter explicitement ce qui fait que le modèle perd au cours de l'intégration de la précision sur les échelles plus petites que celle de l'information fournie aux frontières. Par suite de l'interaction entre les différentes échelles (non linéarité !), il perd aussi dans son domaine de la précision sur les échelles plus grandes. La seule façon d'amoindrir ce problème - sous l'hypothèse que l'on ait un bon modèle (la théorie dit un modèle parfait!) - est d'augmenter le domaine d'intégration afin de retarder l'arrivée de l'influence de la frontière au centre du modèle. Cette solution a le grand inconvénient d'augmenter de façon très significative le temps de calcul et surtout, elle n'est pleinement satisfaisante que si l'on dispose d'un système d'observation à l'échelle du modèle sur tout le domaine.

La Suisse étant un pays de faible superficie, les considérations précédentes ne laissent donc supposer qu'une capacité prévisionnelle à méso-échelle de quelques heures pour les situations très actives. Mais, dans ces cas les Alpes risquent d'avoir un effet positif en ce sens que le forçage orographique (forçage hydrodynamique) risque d'être très nettement supérieur au forçage thermique au point de rendre ce dernier négligeable et d'influencer ainsi de façon positive la prévisibilité.

Il est aussi important de réaliser que la prévision numérique à méso-échelle est encore dans son enfance. Il n'existe aujourd'hui en 1988 qu'un seul service météorologique dans le monde qui exploite (et pas encore comme cela est prévu de le faire) un vrai modèle à méso-échelle: c'est le Service météorologique britannique avec un modèle de 15 km de résolution. Suit le modèle Périidot de la Météorologie Nationale française avec une maille de 38 km dont le domaine recouvre entièrement la Suisse.

En résumé, la modélisation à méso-échelle des processus atmosphériques est très difficile aussi bien pour la détermination des conditions initiales que pour la formulation de la dynamique et surtout de la physique du modèle.

## 2. Choix d'un modèle et d'un partenaire

### 2.1 Considérations générales

C'est un fait qui est prouvé par toutes les statistiques: ce sont les modèles les plus compliqués, les plus sophistiqués qui donnent les meilleurs résultats. Il est tout à fait illusoire de penser aujourd'hui qu'il existe - ou qu'il existera - une méthode simple (statistique ou dynamique) qui donne - ou donnera - des résultats aussi bons (ou même meilleurs !) que ceux livrés par les modèles complexes. Nous bâtissons cette certitude sur le fait que dans la nature les processus atmosphériques sont influencés par un très grand nombre de facteurs (par exemple les contrastes de température à la surface du sol ou l'extension de la couche nivale). Même une légère modification d'un facteur d'influence peut avoir un grand effet (pas forcément immédiatement) à cause de la non-linéarité des interactions et du déclenchement des processus instables. Donc, en règle générale, les modèles comprenant le plus grand nombre de facteurs d'influence seront les plus performants, pour autant que la représentation mathématique de ces derniers soit correcte. Ce qui est vrai, c'est qu'aujourd'hui - et cela ne changera pas dans l'avenir - une amélioration des résultats des prévisions numériques ne se laisse gagner que par un travail et des moyens de calcul de plus en plus conséquents. En d'autres termes, chaque pourcent d'amélioration des prévisions numériques coûte de plus en plus cher.

Comme nous aimerions - c'est le but du Programme MESOMOD - livrer à nos prévisionnistes les meilleurs produits possibles (ce qui nécessite l'utilisation d'un modèle très élaboré) et que nous aimerions atteindre ce but dans un délai pas trop éloigné, il a été décidé - vu la modicité de notre effectif - de ne pas développer un modèle à méso-échelle depuis le début en partant de rien, mais plutôt de prendre un modèle à domaine limité étranger existant et de l'adapter pour en faire un modèle à méso-échelle.

Nous avons écrit au chapitre précédent que la simulation numérique à méso-échelle appliquée à la prévision du temps est un domaine difficile et nouveau, ne pouvant pas s'appuyer sur beaucoup d'expérience. Nous avons donc désiré ne pas faire ce travail seuls mais si possible en collaboration avec une autre institution.

D'emblée nous avons éliminé les Universités car nous avons recherché une coopération à long terme. Or celle-ci ne peut pas être assurée par une haute école où les groupes de travail - par suite des nombreux mouvements de personnel - ne sont en général pas stables. De plus, les Universités n'ont aucune expérience concernant les problèmes liés à l'exploitation des modèles numériques de prévision du temps. Comme partenaires potentiels restaient donc les services météorologiques européens et le CEPMMT (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme).

## 2.2 Choix et caractéristiques des modèles retenus pour évaluation

Cinq modèles ont été retenus pour évaluation. Ce sont:

Le modèle "Péridot" de la Météorologie Nationale Française

Le modèle "Meso-scale" du Service météorologique britannique

Le modèle "Europa" du Service météorologique de la RFA

Le modèle régional à point de grille du CEPMMT

Le modèle régional spectral du CEPMMT

Nous allons tout d'abord mettre en évidence certains traits caractéristiques des formulations adiabatiques et diabatiques des cinq modèles retenus. Ensuite, nous indiquerons les façons dont les conditions initiales sont déterminées actuellement et nous poursuivrons en indiquant l'état opérationnel de chaque modèle tel qu'il se présente aujourd'hui.

### 2.2.1 Formulations adiabatiques

Il faut d'entrée faire une distinction entre le "Meso-scale" et les quatre autres modèles car le premier est non-hydrostatique alors que les autres sont hydrostatiques.

C'est un fait que l'atmosphère n'est pas hydrostatique, mais cette propriété ne devient significative que pour les processus atmosphériques à petite échelle, c'est-à-dire d'une longueur caractéristique maximale de, disons, 20 km. D'autre part, il est admis en prévision numérique qu'il faut 4 points par longueur d'onde pour représenter un processus correctement. Donc avec une maille de 10 km, ce ne sont que les processus de longueur d'onde de 40 km et plus qui sont correctement représentés et, pour ces processus, la composante non-hydrostatique devient négligeable. Avec un modèle hydrostatique utilisé sur une maille de 10 km, on représente explicitement il est vrai des phénomènes où dans la nature la non-hydrostaticité n'est plus négligeable, mais on les représente de façon déformée. On est donc en droit de se demander s'il est judicieux d'utiliser la non-hydrostaticité pour des phénomènes de toute façon mal représentés.

Il est un fait que nous avons en prévision numérique que fort peu d'expérience avec les modèles non-hydrostatiques. Il se peut que ces modèles présentent pour l'avenir des avantages que nous ne soupçonnons pas encore aujourd'hui, surtout lorsque les ordinateurs permettront de les utiliser avec une distance de maille significativement plus faible que celle utilisée aujourd'hui à Bracknell. Il devra alors, par exemple, être possible de traiter la convection de façon explicite et non plus paramétrisée.

Des autres modèles, tous hydrostatiques, le modèle Europa nécessite une explication liminaire. Ce modèle est construit sur une grille alternée dans le temps (une technique permettant l'utilisation d'un pas dans le temps valable pour 67.5 km alors que le modèle a une distance entre points de calcul de 45 km pour deux pas adjacents dans le temps). A part ce gain de temps de calcul, cette technique ne présente que des inconvénients dont le principal est l'impossibilité d'utiliser une technique semi-implicite pour l'intégration du modèle. Ce modèle a pour coordonnée verticale un système hybride discontinu: coordonnée sigma à l'exception des trois derniers niveaux qui sont des surfaces de pression.

Or ces deux points négatifs - la grille alternée et la coordonnée verticale discontinue - auront disparu au début de l'an prochain: la grille alternée sera remplacée par la grille Arakawa C et le schéma d'intégration temporelle par la même occasion deviendra semi-implicite; la coordonnée verticale sera remplacée par une coordonnée hybride continue, la même que celle utilisée dans le modèle global du CEPMMT. Dans la suite de ce chapitre, nous ne considérerons que la nouvelle version du modèle du DWD.

Tous les modèles hydrostatiques à point de grille utilisent la grille Arakawa C. Avec le modèle spectral du Centre, ils sont aussi tous semi-implicites, c'est-à-dire que les termes responsables des ondes de gravité sont traités de façon implicite alors que les autres termes (par exemple la force de Coriolis) sont traités explicitement.

Le modèle britannique utilise aussi la grille C et est aussi semi-implicite, mais les termes qui sont traités implicitement dans ce modèle sont les termes des ondes de compression (ondes sonores) alors que ceux responsables des ondes de gravité sont traités explicitement.

Pour tous les modèles à point de grille, le schéma de différentiation horizontale est du deuxième ordre.

Concernant les schémas de différentiation temporelle, on notera que ceux du Centre européen et de Péridot conservent l'énergie et, dans leur formulation barotrope, l'enstrophie. Ces deux propriétés rendent ces schémas particulièrement robustes mais compliquent l'écriture des équations. Le modèle Europa conserve l'énergie mais pas l'enstrophie. Le modèle spectral conserve les invariants analytiques jusqu'à la précision de la troncature.

Concernant le choix de la coordonnée verticale - qui est un élément important en présence d'une orographie abrupte - tous les modèles utilisent une coordonnée épousant le terrain. Dans le modèle britannique, cette coordonnée n'est pas normalisée. Elle ne s'aplatit donc pas avec l'altitude comme le font les autres, ce qui est une plus grande source d'imprécision dans le calcul des termes de pression en présence de hautes montagnes pentues comme le sont les Alpes.

### 2.2.2 Formulations diabatiques

La formulation diabatique (ou formulation de la physique) suit des philosophies différentes suivant les pays. C'est la France qui semble avoir la ligne de conduite la plus claire concernant le traitement de la physique. Elle consiste en deux règles qui sont systématiquement respectées:

1. On ne paramétrise que ce qui est bien connu. Ainsi, pour la représentation des précipitations, toute la physique des nuages n'est pas incluse, car - aux dires de nos collègues de la Météorologie Nationale - plusieurs processus tels la nucléation ou l'accrétion sont encore mal connus et les constantes ou coefficients qu'il faut employer n'ont pas encore de valeurs définitives. On préfère dès lors s'abstenir, ce qui limite les possibilités d'accorder le modèle (en anglais: tuning). C'est un point très positif.
2. Toute la physique (précipitations, couche limite, rayonnement, etc.) est entièrement écrite en utilisant la pression comme coordonnée verticale, ce qui rend les routines de physique transportables d'un modèle à l'autre. Il faut bien sûr une relation entre la coordonnée de pression et la coordonnée du modèle, mais cet inconvénient est largement compensé par les avantages de la portabilité.

Chez les Allemands, on est beaucoup plus empirique. Ainsi la physique des nuages est entièrement décrite dans le modèle pour les précipitations stables. Cette même physique s'applique aussi dans la nature aux précipitations convectives. Mais comme la prévision des zones instables est une condition préliminaire indispensable qui n'est pas encore résolue de façon satisfaisante, les Allemands ont jugé inutile d'apporter à ce genre de précipitation beaucoup de sophistication.

Chez les Anglais, l'on remarque qu'un poids important est attaché à la prévision de la visibilité et du plafond (limite inférieure des nuages). Mais, des cinq modèles, c'est ce modèle qui dispose du schéma de convection le plus élaboré et, du point de vue théorique, du mieux adapté à la méso-échelle et aux latitudes moyennes, ainsi que de la meilleure représentation de la couche limite. Dans cette dernière, les flux sont des fonctions expli-



cites de l'énergie turbulente qui est une variable pronostique. Cela pourrait présenter un grand avantage pour d'éventuels calculs de dispersion de polluants.

La physique des deux modèles du Centre européen est la même que celle des deux modèles globaux dont ils découlent respectivement. Cela implique qu'elle n'est pas forcément optimale pour un modèle à domaine limité ayant une plus grande résolution. Mais cette compatibilité de la physique avec un modèle hiérarchiquement plus élevé peut être un avantage, car elle devrait assurer la même déviation climatique pour les deux modèles.

### 2.2.3 Conditions initiales

Un modèle de prévision numérique est un système d'équations différentielles partielles. Pour être résolu, un tel système a besoin de conditions initiales. La détermination de ces dernières est aujourd'hui un travail aussi conséquent et difficile - si ce n'est plus - que le développement du modèle lui-même.

Voyons quels genres de conditions initiales sont utilisées actuellement par les modèles sélectionnés.

Modèle Péri-dot: il dispose de sa propre analyse faite par une méthode statistique, appelée la méthode d'interpolation optimale.

Modèle Meso-scale: les conditions initiales sont interpolées purement mathématiquement des champs produits par le modèle à domaine limité de Bracknell (distance de maille: 75 km). Les observations au sol peuvent être ajoutées et elles influencent les niveaux les plus bas de la couche limite. Le processus de la détermination des conditions initiales pour ce modèle est conçu pour une interaction personne/ordinateur; le système accepte les modifications manuelles introduites à l'écran par un météorologue. Nos collègues britanniques sont convaincus d'obtenir un meilleur résultat avec une intervention manuelle.

Les deux modèles du CEPMMT: pour les deux modèles, les conditions initiales sont dérivées par simple interpolation mathématique des champs des modèles globaux.

Modèle Europa: pour ce modèle, les conditions initiales sont aussi obtenues d'un modèle à plus basse résolution (actuellement le modèle global du CEPMMT), mais pas par simple interpolation mathématique. Le DWD a développé une méthode très soignée pour cette interpolation qui tient compte de façon explicite non seulement de l'orographie mais aussi d'autres contraintes dynamiques.

#### 2.2.4 Etats opérationnels

Modèle Péridot: Ce modèle est opérationnel depuis plusieurs années déjà à la Météorologie Nationale où il est intégré une fois par jour jusqu'à 36 heures sur une grille dont la maille est de 38 km. Ce modèle est très robuste et livre des résultats appréciés (surtout le vent et la température) par les météorologues français.

Le modèle de Bracknell: Bien que de grands changements dans son architecture soient prévus pour ces prochaines années (voir Point 2.2.5), il a atteint le stade semi-opérationnel. Il est intégré deux fois par jour jusqu'à 24 heures avec une maille de 15 km sur un domaine recouvrant les Iles britanniques et l'Irlande.

Le modèle allemand: Ce modèle n'est pas encore opérationnel. Il est installé au centre de calcul du CEPMMT à Reading et à Offenbach sur le nouvel ordinateur ETA-10 du DWD. Il a été testé sur une maille de 63.5 km avec un ensemble de 24 situations météorologiques très diverses, dont une montre un fort courant du sud au-dessus des Alpes. Ce modèle deviendra opérationnel à Offenbach deux fois par jour avec une maille de 50 km au cours de 1989.

Le modèle à point de grille de Reading: Ce modèle n'a jamais été opérationnel au CEPMMT où il n'a servi qu'à des études de cas. La plus haute résolution utilisée fut 52 km. Ce modèle, par contre, a été (ou est toujours) opérationnel dans plusieurs pays européens (Suède, Espagne, Danemark, Hollande) avec une distance entre points de grille de plus de 100 km.

Le modèle spectral de Reading: Ce modèle, qui remplacera le modèle à point de grille au Centre comme modèle à domaine limité, est récent. C'est dire que l'expérience que l'on en a est très maigre (une seule application nous est connue: le hurricane Gloria 1985). Comme pour le modèle à point de grille, ce modèle n'est pas prévu pour une exploitation régulière au Centre et aucun pays jusqu'à ce jour n'a laissé entendre une utilisation possible de ce modèle dans son service.

#### 2.2.5 Modifications prévues pour ces prochaines années

Après avoir brièvement exposé l'architecture et le mode de fonctionnement des cinq modèles retenus, il nous paraît approprié de prendre connaissance pour chaque modèle des grands changements prévus pour ces prochaines années.

Modèle allemand: les modifications prévues (nouvelle grille, nouvelle coordonnée verticale et schéma temporel semi-implicite) ont déjà été décrites au Point 2.2.1.

Modèle britannique: de profondes modifications sont prévues pour ces quatre prochaines années: nouvelle coordonnée verticale (qui sera cette fois normalisée) et nouveau schéma de relaxation sur le bord du domaine. Sur le bord, Bracknell utilise actuellement une procédure qui différencie entre les points "inflow" et "outflow". Cette procédure sera remplacée par une procédure de relaxation, la même que celle utilisée par les quatre autres modèles.

En automne 1988, le modèle sera installé sur le nouvel ordinateur vectoriel de Bracknell, un ETA-10.

Modèle français: le système actuel du modèle Périidot emboîté dans un modèle hémisphérique sera complètement remplacé dans trois à quatre ans par un modèle unique, nommé Arpège, qui sera global et spectral avec la caractéristique que la grille de la transformation spectrale (dite grille de Gauss) sera inhomogène (résolution maximale sur la France et minimale dans la région antipodique).

Modèle à point de grille du Centre: ce modèle ne subit plus aucune transformation. Il sera remplacé d'ici peu par le modèle spectral.

Modèle spectral du Centre: chaque modification de la physique dans le modèle global sera introduite dans ce modèle.

### 2.3 Décision

Nous estimons qu'à l'échelle à laquelle nous allons travailler (maille de 10-15 km), la nécessité d'un modèle non-hydrostatique ne s'impose pas (voir Point 2.2.1). Il en serait différemment si nous voulions exploiter le modèle avec une maille de quelques kilomètres seulement (disons de 2 à 5 km). Dans ce cas, le modèle "meso-scale" britannique se serait imposé.

Concernant les modèles hydrostatiques, nous n'avons pas d'arguments solides pour prétendre, lorsque utilisés avec une maille de 10 km, que l'un de ces modèles sera de façon significative meilleur que les autres.

Nous avons aussi fait une petite enquête auprès des prévisionnistes de l'Institut suisse de météorologie pour leur demander s'ils avaient des souhaits particuliers, par exemple si une priorité devait être donnée à la prévision d'un élément particulier ou d'un type de situation météorologique particulière. La réponse a été négative (voir Référence 1), ce qui n'a apporté aucun critère supplémentaire pour le choix d'un modèle.

Nous nous sommes alors tournés vers l'élément collaboration. Comme déjà mentionné au Point 2.1, nous ne voulons pas du pays duquel nous aurons choisi le modèle simplement recevoir une bande magnétique avec une copie de ce dernier et en rester là. Nous désirons une collaboration - et une collaboration à long terme - avec le service météorologique dont on utilisera le modèle.

Nos offres de collaboration faites aux services météorologiques dont nous avons sélectionné un modèle ont reçu un écho très favorable. La disponibilité et la compréhension montrées par les services allemand, britannique et français (cités par ordre alphabé-

tique) ainsi que par le Centre européen ont été pour nous un sujet de grande satisfaction et une motivation supplémentaire pour notre projet. Ceci est tout à l'honneur de la communauté météorologique européenne.

Avant que nous commencions à chercher un partenaire, le Service météorologique de la RFA avait fait connaître les grandes lignes de son nouveau système de prévision numérique qu'il avait pris la décision de développer (voir Référence 2). Ce système comprend trois modèles emboîtés l'un dans l'autre. Pour le troisième modèle, celui avec la plus grande résolution, il a prévu un modèle d'au moins 20 niveaux avec une résolution horizontale de 10 km. Le plan de travail indiquait une mise en service de ce modèle en 1990. C'était exactement ce que nous cherchions. Le service météorologique allemand prévoit de développer ce modèle à méso-échelle à partir de son modèle régional Europa. Les auteurs de ce rapport ont donc recommandé à la Direction de l'Institut suisse de météorologie de collaborer avec le Service météorologique de la République Fédérale Allemande (cf. Référence 1), ce qui a été accepté le 5 octobre 1987 (voir l'"Aktensnotiz der Direktionssitzung" de cette date).

### 3. Das EUROPA-Modell

#### Allgemeines

Das Europa-Modell ist ein (zur Zeit noch experimentelles) Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Bereich Ostatlantik-Europa. Es ist in den letzten Jahren auf der Rechenanlage des EZMW entwickelt worden. Dieses Jahr (1988) werden am DWD noch Aenderungen in der Dynamik des Modells vorgenommen (neues Gitter und neue vertikale Koordinate; semi-implizites Verfahren für die Integration in der Zeit). 1989 soll das Europa-Modell auf der Rechenanlage ETA-10 des DWD operationell werden.

Diese Beschreibung enthält bereits die vorgesehenen Aenderungen für die operationelle Version des Modells. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Müller et al. (Referenz 3).

#### Numerische Struktur

Das Integrationsgebiet erstreckt sich über den ganzen Ostatlantik und Europa (das Gebiet entspricht etwa demjenigen des BKN-Modells). Zweimal täglich soll eine Vorhersage bis 72 Stunden gerechnet werden. Die horizontale Diskretisierung geschieht auf dem Arakawa-C Gitter in sphärischen Koordinaten mit Polrotation und einer Maschenweite von ca. 50 km.

In der Vertikalen verfügt das Modell über ca. 18 Schichten in einem hybriden System, wobei die Schichtdicke mit der Höhe zunimmt.

8 Flächen liegen dabei in den untersten 2 km.

Die Orographie des Modells wird aus dem Datensatz der US-NAVY Orographie aufgebaut werden.

Die Integration in der Zeit geschieht nach dem semi-impliziten Verfahren (zentriert 2. Ordnung).

#### Gleichungen des Modells

Die prognostischen Variablen des Modellgleichungssystems in der Massenfluss-Formulierung sind: die horizontalen Windkomponenten, die totale Wärme (Enthalpie und latente Wärme), der Gesamtwassergehalt und der Bodendruck.

Diagnostisch findet in jedem Zeitschritt die Zerlegung des Gesamtwassergehalts in Wasserdampf und Wolkenwasser statt.

Als weitere diagnostische Gleichungen werden die hydrostatische Gleichung und die Zustandsgleichung benützt.

## Physik

### 1) Horizontale Diffusion:

Die horizontale Diffusion findet auf den Rechnungsflächen statt. Die horizontalen Diffusionskoeffizienten sind abhängig von der Strömungsdeformation.

### 2) Vertikale turbulente Flüsse:

In der Bodenschicht (Prandtl-Schicht) wird die Aehnlichkeitstheorie nach der Formulierung von Louis benützt. In der Ekman-Schicht und der freien Atmosphäre ist ein Schliessungsansatz 2. Ordnung nach Mellor und Yamada entwickelt worden. Ueber Land ist die Rauigkeitslänge abhängig vom Bodentyp und von der "sub-grid scale" - Orographie.

### 3) Bodenmodell:

Das Bodenmodell (s. Figur 1) ist ein 3-Schichtenmodell mit 2 Bodenschichten (Indizes 2 und 3) und einem variablen Speicher über dem Boden für die Interzeption von Wasser oder Schnee (Index 1). Die Prognose der Temperaturen  $T_s$  und  $T_m$  geschieht mit der 'erweiterten Force-Restore' Methode (siehe Referenz 4). Die Schichtdicken  $DZ_2$  und  $DZ_3$  sind Funktionen des Bodentyps und zeitlich konstant. Die tiefere Schicht  $DZ_{3w}$  (1 m) beinhaltet die Wurzelzone. Verdunstungs- ( $E_s$  und  $E_i$ ) und Transpirationsraten ( $T_r$ ) sind abhängig von der Vegetationsdecke, der Bodenfeuchte und der Gefriertiefe.

### 4) Niederschlagsprozess:

Die Wolken-Mikrophysik, welche sehr aufwendig parametrisiert ist, betont die Rolle der Eisphase für die Niederschlagsbildung, indem dem Bergeron-Findeisen Prozess besonderes Gewicht beigemessen wird. Die Einzelprozesse werden wie mit Hilfe eines erweiterten Kessler-Schemas parametrisiert.

Folgende Prozesse, welche Umwandlungen zwischen Wasserdampf, Wolkenwasser, Regen und Eis beinhalten, werden berechnet (s. Figur 2):

Autokonversion von Wolkenwasser zu Regen (AUT) und zu Eis - genannt Nukleation (NUC), Koagulation (ACC), Vergraupelung (RIM), Anfeuchtung (SHED), Schmelzen (MELT), Sublimation (DEP) und Verdunstung von Regentropfen (EVAP). Danach können die Niederschlagsraten für Regen ( $P_r$ ) und Schnee ( $P_i$ ) vertikal integriert werden.

#### 5) Konvektion:

Es kann zwischen zwei Verfahren gewählt werden:

- ein einfaches Angleichungsverfahren ("soft adjustment"): für die durch die Konvektion anzustrebende Zielschichtung der Atmosphäre werden die über die Wolkenmächtigkeit vertikal gemittelten Werte der feuchtstatischen Energie, des Wolkenwassergehaltes und der Windgeschwindigkeit vorgegeben.
- Parametrisierungsverfahren nach Kuo: Simulation der Einzelwolken mit einem eindimensionalen stationären Wolkenmodell und Bestimmung der Anzahl Wolken pro Flächeneinheit mit einem Feuchtebilanzschema nach Kuo und Anthes.

#### 6) Strahlung:

Die aufwärts- und abwärtsgerichteten Strahlungsströme werden für den gesamten langwelligen und den gesamten kurzwelligen Bereich berechnet. Im Langwelligen wird das Emissivitäts-Verfahren zur Lösung verwendet, wobei H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> und Wolken (Bedeckungsgrad als Funktion der relativen Feuchte) berücksichtigt werden.

Im Kurzwelligen werden die Strahlungsflüsse durch Anwendung der Adding-Methode ermittelt. Dabei werden berücksichtigt: Absorption und Reflexion von Wolken, Rayleigh-Streuung, Aerosol-Effekte, Absorption durch Wasserdampf und Ozon.

#### Steuerung durch ein übergeordnetes Modell

Für die Anfangsfelder sowie für die seitlichen Ränder während der Integration werden Werte von einem übergeordneten Modell benötigt. Es handelt sich dabei um das EZMW-T106 Spektralmodell, welches 1989 für den operationellen Betrieb am DWD installiert wird. Dieses globale Modell wird zweimal täglich eine Vorhersage bis 96 Stunden berechnen. Das Europa-Modell bezieht dessen Mittags- und Mitternachts-Analysen als Anfangswertfelder und benützt mindestens alle 3 Stunden die Vorhersagen des globalen Modells als Randwerte.

#### 1) Anfangswertfelder

Das Europa-Modell hat (noch) kein eigenes Analysensystem. Die Vorhersagen beginnen mit interpolierten grossräumigen Analysen. Die Transformations-Methode um die initialisierten EZMW-Analysen auf das feinere Gitter des Europa-Modells zu bringen, ist in Majewski (Referenz 5) beschrieben. Diese Transformation erhält den balancierten Zustand der Analysen trotz der ganz verschiedenen Gitterstrukturen.



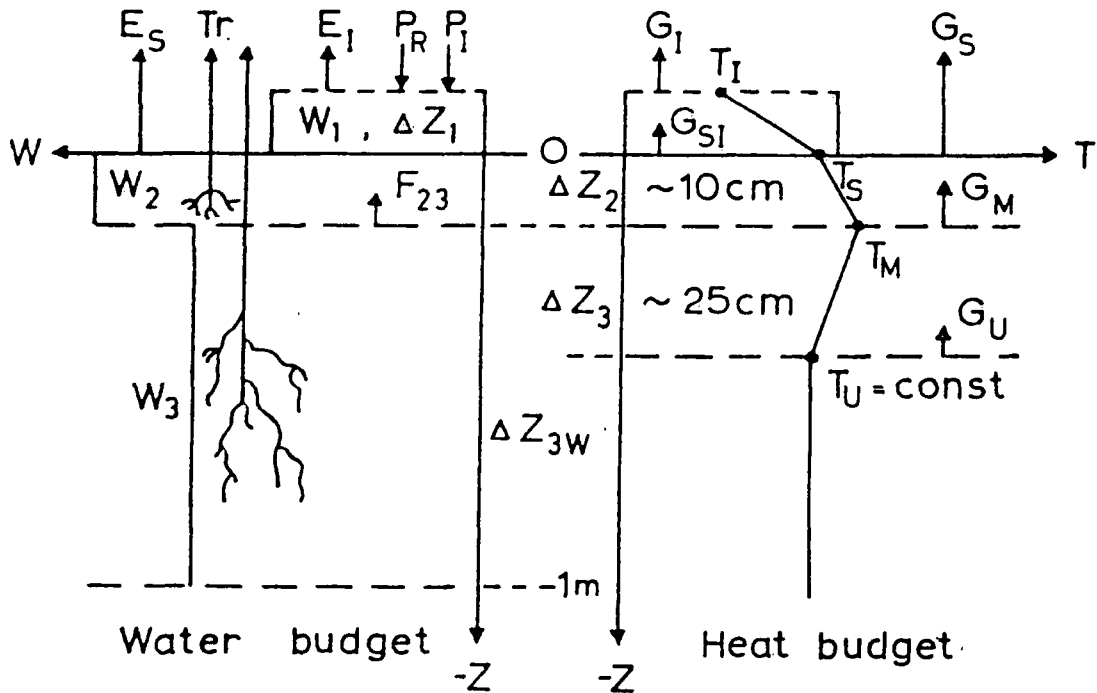


Fig. 1: Schematic representation of the soil model.

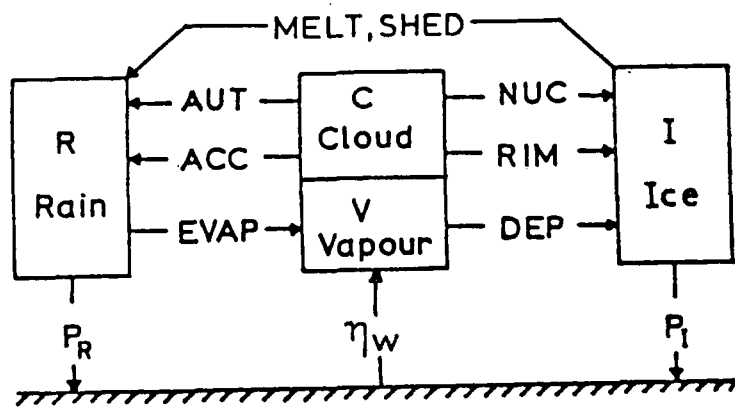


Fig. 2: Schematic diagram of the hydrological cycle: Processes involved in the precipitation parameterization, as well as surface fluxes of rain ( $P_R$ ), ice ( $P_I$ ) and total water ( $\eta_w$ ) from and to the atmosphere.

## 2) Seitliche Ränder

In der äussersten Zone von 8 Gitterpunkten wird das Relaxationsverfahren von Davies-Kallberg angewandt. Die prognostischen Variablen werden in dieser Zone an Werte angepasst, welche von aussen gegeben sind, wobei der Anpassungsgrad abhängig ist vom Abstand des Gitterrandes. Eine Aufdatierungsfrequenz von 3 Stunden ist notwendig um schnelle, kleine synoptische Systeme zu erfassen. Zwischen diesen Zeiten geschieht die Aufdatierung mittels einer linearen Interpolation.

### Experimente

Eine grosse Anzahl Simulationen ist vom DWD anhand 20 typischer Wetterlagen durchgeführt worden. Die Resultate weisen auf das Potential des Europa-Modells hin, die Atmosphäre genauer zu beschreiben. Die vom EZMW-Modell nicht auflösbaren Strukturen werden vor allem von der Unterlage erzeugt, im Bereich von Fronten zusätzlich durch Skalenwirkung. Resultate und Beispiele von Experimenten findet man in Müller et al. (Referenz 3) und Majewski (Referenz 5 und 6).

#### 4. Organisation du travail

##### 4.1 Définition de la stratégie

Le Programme MESOMOD étant une entreprise ambitieuse, difficile et pleine d'inconnues, nous devons adopter une démarche séquentielle de pas à pas dans la direction du but de ce programme qui est l'exploitation d'un modèle à méso échelle par l'ISM.

On s'approchera du but par succession d'étapes. Chaque étape sera définie par un projet principal d'une durée de une à deux années. Parallèlement au projet principal, il est prévu de travailler aussi à des projets de soutien pour aider à atteindre le but que l'on s'est assigné.

Les projets principaux seront définis en commun avec nos collègues du DWD. D'un point de vue organisationnel, ce sont ces projets qui définiront et encadreront la collaboration effective, tangible avec le DWD.

Les projets de soutien sont de deux types: utilitaire ou scientifique. Les projets utilitaires, tel MOPOPAC, servent à l'élaboration des outils nécessaires au développement ou à l'exploitation du modèle. Les projets scientifiques seront pour plusieurs d'entre-eux, tels DIABIN et ANOPIN, entrepris en collaboration avec le groupe du Professeur Davies du Laboratoire de physique de l'atmosphère de l'EPFZ. Une description des projets de soutien est donnée au Chapitre 6.

Ce double effort (projet principal et projets de soutien) sera soumis à la règle de priorité suivante:

Le projet principal, pour lequel des délais sont imposés, aura priorité sur les projets de soutien, c'est-à-dire que du temps de travail prévu pour les projets de soutien pourra être dérivé vers le projet principal afin d'en respecter les échéances.

#### 4.2 Collaboration avec l'EPF de Zurich pour l'analyse

C'est un point très important. Concernant les travaux de développement à effectuer sur le modèle Europa afin d'en dériver un modèle à méso-échelle, nous les effectuerons - comme indiqué auparavant - avec la Division de la Recherche du DWD.

Concernant le problème de l'analyse à méso-échelle, nous voulons poursuivre et si possible intensifier notre collaboration avec le Laboratoire de physique de l'atmosphère de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, spécialement avec le Professeur H.C. Davies. Nous jugeons le problème de la détermination des conditions initiales à méso-échelle sur les reliefs (en premier lieu dans et au voisinage immédiat des Alpes) comme très difficile, car les méthodes classiques utilisées sans adaptation, se révéleront vraisemblablement inadéquates. La méthode d'interpolation optimale nous semble difficile à utiliser car dans une "boîte" au-dessus des Alpes, l'on aura des observations inhomogènes, provenant - si la résolution de l'analyse est faible - par exemple de deux stations situées chacune dans une vallée différente. Si la résolution de l'analyse est haute, un trop grand nombre de boîtes ne comprendront pas d'observation. L'inhomogénéité des observations n'existe pas seulement dans le plan horizontal, mais aussi sur la verticale: deux stations situées, l'une au fond d'une vallée et l'autre sur l'une des crêtes délimitant cette vallée, seront soumises à deux régimes différents: régime de circulation de vallée pour la station basse, régime synoptique pour la station haute. Le problème est encore compliqué par le fait que l'orographie du modèle n'est qu'une approximation de l'orographie réelle, c'est-à-dire que l'altitude de l'emplacement d'une station d'observation n'est pas la même dans le modèle qu'en réalité. En conséquence, nous pensons que pour notre problème la solution ne pourra être approchée que par empirisme.

Ces travaux de recherche sur l'analyse à méso-échelle en collaboration avec le LAPETH sont et feront l'objet de projets de soutien.

#### 4.3 Description de la première étape: Projet FORLAM

Le Projet FORLAM (FOREign Limited Area Model) est le premier projet principal du Programme MESOMOD. Ce projet, qui a débuté en automne 1986, comprend la sélection et l'évaluation d'un certain nombre de modèles étrangers à domaine limité pour le choix d'un

modèle et, simultanément, d'un partenaire. Ce travail a été exposé dans les pages précédentes. Le Projet FORLAM comprend aussi l'apprentissage de l'utilisation du modèle choisi ainsi que l'étude de sa formulation, en priorité de la physique. La dernière phase du Projet FORLAM se déroulera de juin à novembre 1988 et sera consacrée à des études de sensibilité en utilisant la configuration et la résolution actuelle du modèle Europa.

Simultanément ou antérieurement au démarrage du Projet FORLAM, les travaux ont aussi commencé pour les 4 projets de soutien SHWAMEX, MOPOPAC, DIABIN et MATHIN. Le but de ces projets et leur état d'avancement actuel sont donnés au Chapitre 6.

#### 4.4 Etape suivante

C'est avec le projet principal qui succédera au Projet FORLAM que commencera le travail de la réduction de la maille et du domaine. Une rencontre avec nos collègues allemands est prévue pour la fin octobre 1988 afin de planifier le début de ce travail qui se situe au coeur du Programme MESOMOD.

Bien que la stratégie n'ait pas encore été discutée avec notre partenaire, nous pouvons sans trop prendre de risques annoncer que cette diminution de la distance de maille se fera probablement de façon progressive. Il serait en effet très hasardeux de diminuer d'un coup la distance entre points de grille de 50 à 10 km. Le premier pas sera vraisemblablement de diviser la maille par deux et de réduire la dimension du domaine afin de ne pas augmenter dans de trop fortes proportions le temps de calcul nécessaire pour une intégration. A ce niveau se posera déjà la question de savoir si, pour des questions d'homogénéité, le nombre de niveaux devra aussi être augmenté, et si oui, de combien. Concernant l'orographie, plusieurs versions seront définies - par exemple filtrée, non filtrée, avec enveloppe, sans enveloppe - et devront être rigoureusement testées. Pour chaque augmentation de la résolution du modèle, il faudra aussi apporter à la paramétrisation de la physique les changements nécessaires qui pourront être très divers: Simples comme le changement de

la valeur numérique d'un coefficient ou difficile comme le développement d'une nouvelle paramétrisation pour la représentation d'un processus. Il s'agira aussi à chaque pas d'estimer la configuration opérationnelle, c'est-à-dire de définir le nombre de points de calcul pour chaque axe horizontal ainsi que le nombre de niveaux. Ces paramètres seront directement fonction de la puissance de calcul que l'on espère avoir à disposition pour l'exploitation du modèle (voir Point 5.2).

#### 4.5 Façon de travailler actuelle

##### Choix du centre de calcul

En décembre 1987 il a fallu choisir entre deux centres de calcul dotés d'un super-ordinateur (EPFL avec 1 Cray 1S ou CEPMMT avec 1 Cray X-MP 48) et accessibles depuis l'ISM. Nous avons décidé de poursuivre, en collaboration avec le DWD, le développement du modèle Europa au centre de calcul du CEPMMT au moins jusqu'à ce que le futur ordinateur national à hautes performances soit installé à Zürich (1990/91). Les motifs de ce choix sont les suivants (à noter que la décision de doter l'EPFL d'un Cray 2 et l'ETHZ d'un Cray X-MP en 1988 n'était pas encore connue, mais n'aurait en rien changé le choix):

- le DWD a installé toute l'infrastructure nécessaire pour le développement du modèle Europa au CEPMMT;
- la collaboration, souhaitée des deux côtés, sera ainsi la plus étroite (les deux partenaires travaillant sur les mêmes machines);
- nous avons pu commencer immédiatement à travailler: Pas de migration sur un ordinateur qui ne serait de toute façon pas encore le calculateur pour le modèle opérationnel.

##### Stratégie de travail

Le concept "Arbeitsstrategie in Bezug auf die Informatikmittel für den Umgang mit dem am EZMW installierten Europa-Modell im Rahmen des Programms MESOMOD", Groupe NUM, janvier 1988, (Référence 7) définit les principes de base pour le travail informatique, spécifiant notamment que la façon de travailler doit être telle que les problèmes purement informatiques soient minimaux. Nous retiendrons de ce document les deux points suivants:

- l'ISM est reliée au CEPMMT par une ligne fixe de 9600 bauds et dispose d'un Remote Job Entry (RJE). De cette façon, des données peuvent être transmises et des travaux (job) donnés en exécution depuis nos consoles Siemens.
- les sources des programmes résident au CEPMMT. C'est par le software UPDATE (de Cyber, plus tard de Cray) que les programmes sont donnés en exécution. UPDATE a l'avantage de garder l'historique des modifications faites aux programmes (condition nécessaire lorsque plusieurs personnes travaillent sur les mêmes programmes).

#### Programmes de la chaîne du modèle

Les différents programmes du modèle se divisent en trois parties:

- 1) préparation des fichiers initiaux et des bords latéraux: les analyses (et les prévisions) du modèle T106 du CEPMMT doivent être préparées pour le domaine du modèle Europa sur la grille gaussienne et interpolées sur la grille du modèle Europa;
- 2) simulation avec le modèle Europa: le coeur de la chaîne;
- 3) dépouillement des fichiers-résultats du modèle: interpolation des surfaces sigma en surfaces de pression; programme pour imprimer et dessiner ces résultats aussi sur des surfaces verticales.

#### 4.6 Groupe de travail MESOMOD

Il a été créé un groupe de travail appelé "Groupe MESOMOD" dont le but est de servir de point de rencontre entre les utilisateurs possibles du modèle à méso-échelle et ceux dont la tâche est de mettre à disposition un tel modèle.

Pour les scientifiques engagés dans les travaux de développement du modèle, ce groupe est le lieu pour:

- prendre connaissance des besoins et des vœux des prévisionnistes en matière de prévision numérique du temps;
- renseigner les spécialistes de la pollution de l'air afin qu'ils puissent juger des possibilités d'utilisation d'un tel modèle pour leurs travaux;
- discuter des possibilités de réalisation des suggestions et désirs exprimés.

Ce groupe de travail ne pourra remplir son but que si les prévisionnistes et les spécialistes de la pollution qui y siègent ne participent pas à titre personnel aux séances mais en tant que représentant de leur domaine de travail. C'est une nécessité.

## 5. Concept pour l'exploitation future du modèle

### 5.1 Ce que devrait apporter le modèle

Bien que le Programme MESOMOD soit un projet non dépourvu de risques vu l'absence - comme indiqué au Point 1.3 - d'expérience pratique des services météorologiques nationaux dans l'exploitation de modèles à méso-échelle, nous aimerions néanmoins indiquer ce que l'existence d'un tel modèle pourrait apporter à l'Institut suisse de météorologie.

#### Pour la prévision

Comme indiqué au Point 1.2, le but premier du Programme MESOMOD est d'apporter une aide aux prévisionnistes confrontés avec le difficile problème de la prévision du temps. Le modèle devrait pouvoir les aider sous plusieurs aspects, principalement pour mieux appréhender les différences régionales, principalement entre le nord et le sud des Alpes, mais aussi entre les différentes régions du Plateau et des Préalpes. Les effets causés par le Jura devraient aussi être bien reconnaissables. Ces différenciations devraient se retrouver dans tous les paramètres météorologiques usuels, mais avec un taux de réussite différencié. Néanmoins, nous pensons que le modèle apportera des indications qualitatives utilisables pour tous les paramètres, y compris les précipitations. Plus concrètement, il pourra être consulté avec profit pour prévoir le comportement du foehn ou l'intensité de l'effet de barrage au passage d'un front froid. De plus, un modèle à méso-échelle pourrait apporter une contribution significative lors de la rédaction des bulletins spéciaux comme celui destiné aux amateurs de vol-à-voile en indiquant les régions du pays avec une structure verticale peu stable.

#### Pour la pollution

Un tel modèle devrait aussi devenir un outil efficace pour les problèmes liés au transport de pollution, vu la façon détaillée dont le champ du vent sera représenté dans les basses couches. Un tel modèle pourrait aussi servir de forçage pour un modèle de dispersion d'un ou de plusieurs polluants. Un modèle de pollution comprendrait des équations prognostiques pour une ou plusieurs concentrations de polluants et paramétriserait - en plus de leur advection et dispersion - les dépositions sèche et humide et les réactions chimiques éventuelles.



Toutes les variables météorologiques seraient - pour chaque pas dans le temps ou pour une fréquence plus basse - prises du modèle météorologique à méso-échelle.

#### Pour la climatologie

Comme nous l'avons déjà montré avec le projet de soutien SHWAMEX, un modèle à méso-échelle peut aussi donner un apport à la climatologie. Par la définition de situations météorologiques idéalisées, il montre de façon non seulement qualitative mais aussi quantitative les déformations des courants par l'orographie. Il sera très intéressant de poursuivre avec le modèle barocline multi-niveau le travail du Projet SHWAMEX.

#### 5.2 Schéma du mode d'exploitation envisagé

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, la prévisibilité d'un modèle à méso-échelle est faible. Il est donc absolument impératif qu'il puisse être calculé rapidement si l'on veut que ses résultats soient utilisables opérationnellement. De plus, les modèles à méso-échelle disposent d'autant de points de grille et ne sont pas moins compliqués que les modèles utilisés pour la simulation de la grande échelle, (cf. Point 1.3). Il en découle qu'ils ne peuvent être intégrés dans un contexte opérationnel que sur un ordinateur à hautes performances, c'est-à-dire permettant le calcul parallèle avec des processeurs vectoriels.

Ce qui est très contraignant est le fait que cette grande puissance de calcul est absolument nécessaire, mais que pour quelques instants par jour (selon le nombre d'intégrations quotidiennes). Le reste du temps, pour les travaux de développement, une puissance d'un ordre de grandeur plus faible est suffisante, car la contrainte de temps peut être fortement relaxée. Pour obtenir les résultats d'un test, on peut attendre quelques heures. Dans l'exploitation, un tel délai est impossible.

Nous envisageons d'exploiter le modèle à méso-échelle de la façon suivante:

Comme nous l'avons expliqué au Point 4.5, les travaux de développement se font sur le système d'ordinateurs du CEPMMT. Le modèle ne sera rapatrié que lorsque nous aurons réussi, avec nos partenaires du DWD, à définir au Centre européen une version à méso-échelle livrant des résultats acceptables. Ce rapatriement n'aura toutefois pas lieu avant que l'ordinateur national à hautes performances ne soit mis à la disposition des utilisateurs. Cet ordinateur sera installé à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich en 1990-91.

Lorsque le modèle sera rapatrié, il sera installé sur l'ordinateur national pour une phase pilote d'exploitation d'au moins deux ans.

Cette phase pilote se déroulera ainsi:

Au début le modèle sera exploité en mode adaptif (voir définition à la page 1) avec une intégration par jour. Les conditions initiales et aux limites devront parvenir chaque jour au Centre de calcul de l'EPF-Z où le modèle sera intégré sur l'ordinateur national. Un choix fixe de résultats (cartes de champs météorologiques en prévision) sera envoyé, après chaque intégration journalière, à la Centrale de l'ISM de Zurich par le système de transmission VPP (Verteiltes Printen und Plotten) du CC de l'EPF-Z. Concurrément, les résultats seront archivés au Poly et exploités statistiquement afin de déceler les erreurs systématiques du modèle.

Le but principal de la phase pilote sera d'accumuler l'expérience nécessaire à la réalisation de l'exploitation de routine, appelée aussi exploitation permanente. Il est donc normal que plusieurs points ne soient à ce stade pas encore clairement fixés concernant l'exploitation permanente.

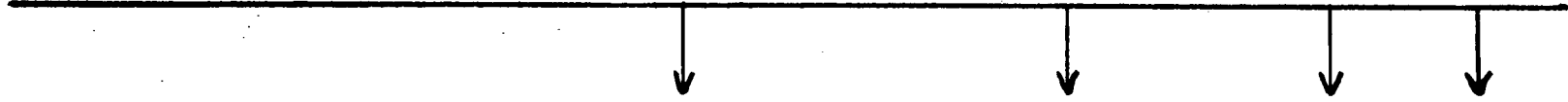
La phase pilote a été justement prévue pour nous apporter les éclaircissements nécessaires. Néanmoins nous pouvons affirmer que, pour l'exploitation permanente, le modèle continuera d'être intégré sur l'ordinateur national. Il n'est pas prévu que l'ISM s'équipe d'un ordinateur multiprocessors vectoriels. Par contre, la représentation graphique des résultats (établissement des méta-files) sera générée à l'ISM et les résultats seront visualisables sur les sta-

tions graphiques dont les prévisionnistes seront équipés. Cela suppose la mise en service d'une liaison à haute vitesse entre les centres de calcul de l'ISM et du Poly de Zurich.

Une question importante est celle de l'origine des conditions initiales pour l'analyse (first guess) et des valeurs sur le bord du domaine. Il est aujourd'hui reconnu que l'on ne doit pas avoir un saut d'échelle trop grand. Il serait par exemple peu judicieux de guider un modèle de 15 km de maille avec un modèle de 150 km de résolution. Un saut de maille de 5 devrait si possible ne pas être dépassé. Cela implique que le fournisseur de conditions initiales et de conditions aux limites ne sera pas forcément le CEPMMT, mais plutôt un Service météorologique exploitant un modèle à domaine limité avec une maille de, par exemple, 50 km.

Projets

Projets de soutien



Phase pilote



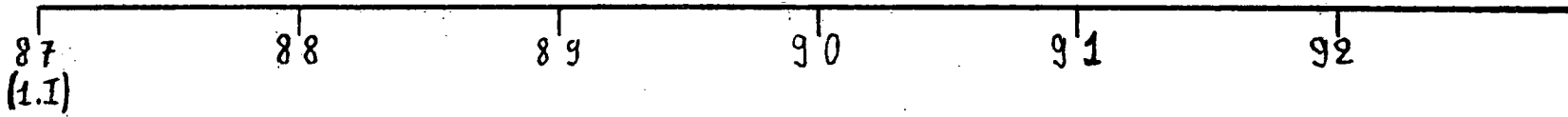
REDUCE



FORLAM



Ordinateurs



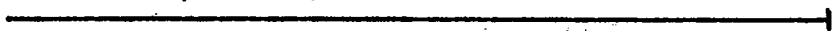
CRAY XMP 48 (ECMWF)



?(ECMWF)



NOS/BE (ECMWF)



COS, VMS (ECMWF)



Ordinateur national



## 6. Description des projets de soutien

Nous avons actuellement 4 projets de soutien en chantier. Un cinquième, le Projet SHWAMEX, est formellement terminé et ses résultats ont été publiés.

Des quatre projets de soutien en cours, trois sont des projets scientifiques et le quatrième (MOPOPAC) est un projet utilitaire relatif à la représentation graphique des résultats. Les trois projets de soutien scientifiques - DIABIN, MATHIN et ANOPIN - étudient chacun une voie propre sur la façon d'assimiler les observations météorologiques pour la détermination des conditions initiales. Deux de ces projets (DIABIN et ANOPIN) se font en collaboration avec le Professeur Davies de l'EPFZ.

### 6.1 SHWAMEX

Das Projekt SHWAMEX (= Shallow Water Model Experiment) im Rahmen des Programms MESOMOD untersucht die Strömung im Alpenraum im meso-beta-skaligen Massstab.

Das Projekt hat Ende 1984 begonnen und wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Laboratorium für Atmosphärenphysik der ETH-Zürich durchgeführt (Gruppe von Prof. Davies).

Als Grundlage dient ein 1-Schicht Modell, welches auf den Seichtwassergleichungen ("shallow water equations") basiert. Die Bodenreibung und der Antrieb durch den synoptischen Druckgradienten sind im Modell eingebaut. Das Modell liefert Grundzüge der Strömung in einer gut durchmischten atmosphärischen Grenzschicht sowie die Höhe dieser Grenzschicht.

Um das Modell zu testen, wurden Experimente mit einer einfachen Orographie ( $\cos^2$ -Berg) durchgeführt. Die Resultate der Gleichgewichtszustände sind mit Laborexperimenten verglichen worden, die in der Literatur beschrieben sind. Die Resultate erwiesen sich als befriedigend. Die gewählten Initialisierungsverfahren und die Behandlung der seitlichen Rändern waren robust und zufriedenstellend (vgl. Schubiger et al., 1986).

So konnten im Sommer 1986 die ersten Tests mit einer realistischen Alpenorographie in einem 10 km-Gitternetz begonnen werden. Die Simulation der typischen Strömungsverhältnisse im Mittelland bei synoptisch stabilen Lagen ist berechnet worden (dies ist Teil einer NFP-14 Studie des LAPETH) (vgl. de Morsier und Schubiger, 1986 und Schubiger et al., 1987).

Mit dem erreichten Stand des Modells können folgende Studien durchgeführt werden:

- Regional-Klimatologie: Kartierungen der Strömungsverhältnisse bei synoptisch stabilen Lagen
- Testen von neuen Verfahren für das Europa/MESOMOD-Modell, insbesondere im Bereich der Analyse für Datenassimilationsexperimente (Repräsentativität der ANETZ-Daten in einem einfachen mesoskaligen Modell im Alpenraum).

#### Literatur

- de Morsier, G. und Schubiger, F., 1986: Experiments with a simple mesoscale flow model over the Northern foreland of the Alps. Proceedings der "19. Internationalen Tagung für alpine Meteorologie (ITAM) vom 31.8.-5.9.1986 in Rauris". Wien (A). pp. 174-178.
- Schubiger, F., de Morsier, G. und Davies, H.C., 1986: A simple flow model incorporating alpine orography. LAM Newsletter 12, 13-17.
- Schubiger, F., de Morsier, G. und Davies, H.C., 1987: Numerical studies of mesoscale motion in a mixed layer over the Northern Alpine foreland. Boundary-Layer Meteor., 41, 109-121.

#### 6.2 DIABIN

Das Projekt DIABIN (= DIABatische INitialisierung) befasst sich mit der Ermittlung von atmosphärischen Wärmequellen, die bei der Bildung von Niederschlag durch Freisetzung von latenter Wärme infolge Kondensation von Wasserdampf in der Atmosphäre auftreten, im Hinblick auf deren Darstellung in einem mesoskaligen numerischen Modell. In der Folge wird der Begriff "diabatische Prozesse" auf die physikalischen Vorgänge in diesem Zusammenhang beschränkt.

Es ist ein bekanntes Problem der Modellierung der Atmosphäre, diabatische Prozesse in den ersten Stunden der Modellintegration naturgetreu wiederzugeben. Einer der Gründe dafür liegt in der

Schwierigkeit, Information über diabatische Prozesse in der Atmosphäre in die Bestimmung der Anfangsbedingungen miteinzubeziehen. Teilweise stehen die benötigten Beobachtungsdaten auch gar nicht zur Verfügung.

In einem mesoskaligen Modell ist es aber von Bedeutung, von den Anfangsbedingungen her möglichst nahe bei der Realität zu sein, einerseits für gute Resultate im Nowcasting Zeitbereich, andererseits um zu verhindern, dass der Modellzustand sich allzuweit vom wirklichen atmosphärischen Zustand entfernt, was natürlich die Vorhersagequalität beeinträchtigt. Gerade auch im Zusammenhang mit Orographie ist die gute Darstellung von diabatischen Wärmequellen wichtig.

In der Schweiz sind wir in der vorteilhaften Lage, über eine Menge kontinuierlich gemessener, mesoskaliger Daten zu verfügen, die es erlauben, Aussagen über Ort und Intensität von atmosphärischen Wärmequellen zu machen (insbesondere ANETZ, RADAR). DIABIN hat zum Ziel, diese Daten für die Bestimmung der Anfangsbedingungen des mesoskaligen Modells nutzbar zu machen. Anfangsbedingungen, welche die diabatischen Prozesse in der Atmosphäre berücksichtigen, ermöglichen die adäquate Darstellung von Niederschlagsgebieten im numerischen Modell. Damit wird auch die Vorhersage ihrer Entwicklung verbessert.

Die Lösung dieser Aufgabe ist auch ein Beitrag in Richtung einer mesoskaligen, objektiven Analyse.

#### Referenzen:

- Doctoral Project Definition / P. Binder, 19. Nov. 1986.
- Bericht über den Fortgang der Dissertation "Aspekte mesoskaliger diabatischer Initialisierung" im 1. Jahr / P. Binder, 16. Mai 1988.

### 6.3 ANOPIN

(ANalyse mit OPtimaler INterpolation)

Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Datenassimilationsverfahren:

- 1) kontinuierliche Datenassimilation: direkter Einbezug der meteorologischen Daten ins Vorhersagemodell
- 2) intermittierende Datenassimilation: Einbezug der Daten zu jedem Analysenzyklus, z.B. alle 3 Stunden.

Das zweite Verfahren kann in 4 Schritte unterteilt werden:

- 1) Der Vor-Analysenprozess, d.h. Decodierung der beobachteten Daten und Qualitätskontrolle, ist für beide Datenassimilationsverfahren unerlässlich
- 2) objektive Analyse: ein Verfahren dieser Art ist Inhalt des Projekts
- 3) Initialisierung (möglicherweise implizit in Schritt 2 enthalten)
- 4) kurze Integration des Vorhersagemodells: erste Näherung ('first guess') für den nächsten Analysenzyklus.

Die operationellen objektiven Analysenverfahren für mesoskalige Modelle basieren heutzutage (noch) vor allem auf der Methode der optimalen Interpolation (OI).

Die 'Vergangenheit' (= first guess: Resultat der Integration des Vorhersagemodells für die Zeitdauer eines Analysenzyklus) wird bei diesem Verfahren als Hauptquelle benutzt für die Bestimmung von Interpolationsgewichten der Abweichungen der Beobachtungen von der ersten Näherung des Modells ('first guess') an den Beobachtungspunkten.

Bevor mit der Analyse begonnen werden kann, ist es erforderlich, die statistische Struktur der folgenden Parameter festzulegen:

- geschätzte Beobachtungsfehler
- geschätzte Vorhersagefehler
- Korrelationen der Beobachtungsfehler
- Korrelationen der Vorhersagefehler

Das Projekt (Beginn Herbst 1988) beinhaltet, nach dem Studium des Verfahrens, das Anwendungspotential im Rahmen des Programms MESOMOD. Es soll untersucht werden, ob und wie ANETZ-Daten anhand dieser Methode in das Europa/MESOMOD-Modell, eingeführt werden können, zuerst univariat und später, wenn gültige Beziehungen gefunden werden können, multivariat.



Querverbindungen zu anderen Verfahren der objektiven Analyse, so vor allem zum Verfahren der kontinuierlichen Datenassimilation, werden studiert.

### Literatur

- Gustafsson, N., 1987: Opportunities and problems in meso-scale objective analysis.  
Proc. Symp. Mesoscale Analysis and Forecasting, Vancouver, Canada, 17-19 August 1987, ESA SP-282. p. 545-554.
- Hollingsworth, A. 1987: Objective analysis for numerical weather prediction. In Short- and Medium-Range Numerical Weather Prediction. Collection of papers presented at the WMO/IUGG NWP Symposium Tokyo, 4-8 August 1986.  
J. Meteor. Soc. Japan, Special Volume, 11-59.
- Lorenz, A.C. 1986: Analysis methods for numerical weather prediction.  
Quart. J. R. Met. Soc., 112, 1177-1194.

## 6.4 MATHIN

(MAThematical INItialization)

### Analyse par méthode adjointe

Les méthodes classiques d'analyse ne tiennent compte que de la distribution spatiale des stations d'observation, sans qu'intervienne l'évolution temporelle des grandeurs météorologiques observées.

La méthode adjointe réalise une analyse spatio-temporelle, par la distribution géographique des stations d'observation d'une part, grâce d'autre part à la prise en compte de l'évolution des grandeurs observées au cours d'un intervalle temporel imparti à l'analyse. La condition initiale finalement livrée au modèle numérique est le champ météorologique du début de l'intervalle d'analyse.

Par les techniques mathématiques utilisées, la méthode adjointe se rattache à la théorie du contrôle optimal et au calcul variationnel. Une fonction optimale, mesurant l'écart entre la prévision du modèle numérique et l'évolution réelle de la situation météorologique est introduite. Au modèle numérique est associé un modèle linéaire tangent adjoint permettant de calculer le gradient de la fonction optimale relativement à une condition initiale.

Exprimé en termes de contrôle optimal, le problème adjoint revient à déterminer la condition initiale pour laquelle l'intégration correspondante du modèle numérique sur l'intervalle imparti à l'analyse minimise la fonction optimale.

L'algorithme utilisé est itératif. Partant d'une condition initiale, le modèle numérique est tout d'abord intégré dans le sens direct de l'écoulement du temps sur l'intervalle d'analyse et livre une valeur de la fonction optimale. Le modèle linéaire tangent adjoint est alors intégré dans le sens rétrograde et donne, au début de l'intervalle d'analyse, le gradient de la fonction optimale par rapport à la condition initiale choisie. Un terme inhomogène de forçage ajouté à l'équation adjointe introduit l'action des données d'observation sur le gradient. Un algorithme d'optimisation sans contraintes est alors engagé. Il détermine, dans la direction définie par le gradient et par intégrations successives du modèle numérique, le minimum de la fonction optimale. La condition initiale correspondant à ce minimum est choisie comme nouvelle condition initiale pour l'itération. Tout le processus est répété jusqu'à ce que la norme du gradient tombe sous un seuil préalablement fixé.

Remarquons que le modèle numérique ne subit aucun "forçage vers les observations" lors de l'intégration directe. Le modèle adjoint lui-même est indépendant, dans sa forme, du terme inhomogène de forçage ajouté. Cette indépendance autorise le développement autonome du modèle et de son adjoint. Seul le terme inhomogène ajouté dépend du forçage choisi et donc du dispositif d'observation utilisé.

La technique adjointe est basée sur des fondements mathématiques irréprochables. Elle est cependant difficile et requiert, de la part des personnes engagées dans le développement d'un système adjoint d'analyse, des compétences élevées et un volume de travail important.

Le coût informatique associé à une application opérationnelle de la méthode adjointe est actuellement prohibitif, le volume de calcul requis étant supérieur aux capacités des plus gros ordinateurs disponibles en 1988 sur le marché.

Encore en phase de développement en 1988 la technique adjointe apparaît parfaitement adaptée au modèle barotrope spectral. Une version globale de ce modèle fonctionne avec succès au Laboratoire de Météorologie Dynamique à Paris. Une autre version, rapportée au plan beta, a été développée au Centre Météorologique de Genève dans une version à faible résolution spectrale. Des travaux sont en cours au Centre Européen en vue de l'application de la méthode au modèle du Centre. D'autres enfin concernent l'application de la méthode à des modèles aux différences finies.

### Littérature

Lorenc, A.C.; 1986

Analysis methods for numerical weather prediction  
Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 112, pp. 1177-1194

Le Dimet, F.-X. and Talagrand, O.; 1986

Variational algorithms for analysis and assimilation of  
meteorological observations: theoretical aspects  
Tellus, Vol. 38A, pp 97-110

Talagrand, O. and Courtier, P.; 1987

Variational assimilation of meteorological observations  
with the adjoint vorticity equation  
Quart. J. R. Met. Soc., vol. 113, pp 1311-1347.

## 6.5 MOPOPAC

(Model Output Postprocessing PACKage)

MOPOPAC ist im Endausbau ein benutzerfreundliches Softwarepaket, welches es erlauben soll, auf einfache Weise zu definieren, welche Felder im Verlaufe der Modellintegration zur späteren Verwertung ausgelagert werden sollen. Ebenso beinhaltet es Funktionen zur weiteren Verarbeitung der ausgelagerten Felder und ihrer Darstellung als Tabellen und Grafik.

MOPOPAC behandelt die Gesamtheit der im Laufe einer Modellintegration produzierten Werte für jeden im Modell mitgeführten Parameter (prognostische, diagnostische, nicht-meteorologische) grundsätzlich als 4-dimensionale Felder (3 Raum-, 1 Zeitdimension). Damit ist es möglich auf 6 verschiedene Arten 2-dimensionale Teilfelder zu definieren, die sich zum Beispiel als Zeit-Höhenquerschnitt, vertikaler Nord-Süd Querschnitt, "horizontale" Karte etc. interpretieren lassen. Ebenso erlaubt MOPOPAC 1-dimensionale Reihen von Werten der verschiedenen Parameter aus dem Modell herauszuziehen (z.B. Zeitreihen an einem bestimmten Raumpunkt, vertikale Profile, Randwerte etc.).

Die Nachverarbeitung soll Funktionen für den Auszug von Teilbereichen (Fenstern) aus den ausgelagerten Feldern enthalten, Möglichkeiten zu ihrer Kombination, Differenzbildung und anderes mehr.

Als letzte Stufe schliesslich werden die nachverarbeiteten Daten als alphanumerische und grafische Produkte dargestellt.

Adresse des auteurs:

Jean Quiby  
Francis Schubiger  
Peter Binder

Institut Suisse de Météorologie  
Case postale  
CH-8044 Zürich

7. Liste des modèles à domaine limité opérationnels en Europe occidentale

Allemagne (RFA)

Modèle propre

Autriche

Pas de modèle

Belgique

Pas de modèle à domaine limité opérationnel

Danemark

Le LAM du CEPMMT

Changements: Reprogrammation avec la plus "grande" coordonnée horizontale comme boucle la plus intérieure.  
Rotation des pôles.

Espagne

Le LAM du CEPMMT

Finlande

Modèle australien

France

Modèle PERIDOT (propre développement)

Grande-Bretagne

Modèle propre

Grèce

Pas de modèle

Hollande

Deux modèles:

- le LAM du CEPMMT

Changement: Rotation des pôles

- le modèle VIMOLA: propre développement

(VIMOLA = Vertically Integrated Model Over a Limited Area)

Irlande

Modèle HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University)

Changements: Grille C, explicite séparé, rotation des pôles

Islande

Pas de modèle

Italie

Pas de modèle vraiment opérationnel

Norvège

Modèle propre

Portugal

Pas de modèle

Suède

Le LAM du CEPMMT

Changement: Rotation des pôles

Yougoslavie

Le modèle HIBU

## 8. Références

1. Binder, P; Quiby, J; Schubiger, F.  
Programme MESOMOD. Recommandation à la Direction pour  
l'importation d'un modèle de prévision numérique ...  
Septembre 1987, Point 3.2, page 9.
2. European Working Group on Limited Area Modelling  
LAM NEWSLETTER Number 13 (December 1986)  
Pages 27-30.
3. Müller, E., Frühwald, D., Jacobsen, I., Link, A., Majewski, D.,  
Schwirner, J.-U. und Wacker, U. 1987: Results and prospects of  
mesoscale modelling at the Deutscher Wetterdienst.  
In Short- and medium-range numerical weather prediction.  
Collection of papers presented at the WMO/IUGG NWP Symposium  
Tokyo, 4-8 August 1986.  
J. Meteor. Soc. Japan, special Volume, 533-546.
4. Jacobsen, I., und Heise, E., 1982: A new economic method for the  
computation of the surface temperature in numerical models.  
Beitr. Phys. Atmosph., 55, 128-141.
5. Majewski, D., 1985: Balanced initial and boundary values for a  
limited area model.  
Beitr. Phys. Atm., 58, 147-159.
6. Majewski, D. 1986: Ergebnisse einer 5-Tage Vorhersage mit dem  
Europa-Modell.  
DWD intern. Arbeiten der Forschungsabteilung, Nr 6.
7. Gruppe NUM  
Arbeitsstrategie im Bezug auf die Informatikmittel für den Umgang  
mit dem am EZMW installierten "Europa"-Modell im Rahmen des  
Programms MESOMOD  
28. Januar 1988 /Bi/Sc.

