

Diss. ETH No. 16871

Dynamical analysis of atmospheric predictability in cloud-resolving models

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Cathy Hohenegger

Dipl. Natw. ETH
born on 11 March 1979
citizen of Mollens (VS)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christoph Schär, examiner
Prof. Dr. Huw C. Davies, co-examiner
Dr. Tim N. Palmer, co-examiner

Zurich 2006

Abstract

Accurate numerical weather predictions (NWP) are considered important over mountainous regions, where the hydrological and meteorological risks associated with heavy precipitation are especially acute. Quantitative precipitation forecasting is unfortunately a very challenging task and traditional limited-area or global NWP models tend to exhibit low predictive skills. In recent years, promising prospects have emerged with the development of next-generation NWP models characterized by grid spacings of $\mathcal{O}(1 \text{ km})$. These allow the quasi-explicit treatment of moist convective processes and a better representation of orography and surface fields. Also, due to the chaotic nature of the atmospheric dynamics and motivated by the success of ensemble prediction systems (EPS) at the synoptic scale, interest is growing in the design of cloud-resolving EPS. This development raises a series of fundamental questions concerning the predictability of the simulated weather phenomena. One of the core issues is the validity of the tangent-linear approximation, which is widely used for synoptic-scale NWP applications.

This thesis aims at investigating aspects of mesoscale predictability relevant for high-resolution (cloud-resolving) quantitative precipitation forecasting over complex topography. Emphasis is set on predictability limitations arising at the meso- β scale (20-200 km) due to the growth and amplification of meso- γ -scale (2-20 km) initial uncertainties. Real-case ensemble simulations are performed with a NWP model integrated on a convection-resolving grid of 2.2 km. The approach uses perturbed initial conditions but assumes perfect predictability on the synoptic scale (identical lateral boundaries).

It is found in chapter 2 that mesoscale predictability limitations are relevant for quantitative precipitation forecasting, confirming previous studies. The predictability of the considered three cases of heavy rainfalls differs tremendously with a normalized precipitation spread ranging between 0.05 (highly predictable) and 1 (virtually unpredictable) on scales of $\mathcal{O}(50 \text{ km})$. Losses of predictability are primarily associated with moist processes and convective instability. The presence of moist convection is a necessary but not sufficient condition to promote error growth. This ambiguity, referred to as “predictability mysteries”, can be explained through dynamical instability considerations. It is demonstrated that both moist convective instability and a flow regime sustaining upstream propagation of perturbations are required to significantly disrupt predictability. Using a linear analysis of gravity-wave propagation, this hypothesis is shown to provide successful estimates of the predictability level.

Since moist convection acts as triggering mechanism, amplification of cloud-scale initial uncertainties is extremely fast. Combined with an effective propagation through sound and gravity waves, it is shown in chapter 3 that hot spots of error growth can quickly (1-2 h) develop far remote from initial perturbations. This both leads to a tremendous sensitivity of cloud-resolving integrations to their initial conditions and to a rapid convergence of error patterns obtained with different perturbation methodologies. For the investigated case involving convection of intermediate intensity, it is found that several largely different perturbation methodologies converge within 11 h. This rapid convergence also reveals the high degree of nonlinearity prevailing in our modeling system.

It is consequently shown in chapter 4 that the mesoscale predictability associated with cloud-resolving short-range (1 d) NWP integrations is fundamentally different from the predictability of synoptic-scale medium-range (10 d) weather forecasts in the following sense. Error-doubling times, as primarily associated with convective and with baroclinic instability, respectively, are in the order of 4 h and 40 h. The tangent-linear assumption breaks down at about 1.5 h for cloud-resolving against 54 h for synoptic-scale integrations. In terms of non-linear effects, a 10-d synoptic-scale forecast is thus only comparable to a 7-h cloud-resolving integration, which is much shorter than the anticipated lead time of 1 d. These different characteristics, in particular the quicker loss of a one-to-one mapping between initial uncertainty and future state, question the applicability of techniques such as optimal perturbations, targeted observations, 4D-Var to short-range cloud-resolving NWP simulations. The differences between the two systems considered are also analyzed in terms of the simplified Lorenz model.

The last study (chapter 5) is directed towards more practical considerations and assesses the potential benefits of using a cloud-resolving EPS driven by a synoptic-scale limited-area EPS for an Alpine flood event. The assumption of perfect predictability on the synoptic scale is thus relaxed. The cloud-resolving EPS slightly outperforms its driving EPS during the phase of heavy precipitation, where the latter produces unrealistically large amounts of rainfall due to its convective parameterization. The resolution-induced differences nevertheless tend to be smaller than typical member-to-member variability after one day. It is also shown that neglecting the cloud-scale uncertainty component at initial time leads to an underestimation of the precipitation spread during the first few integration hours.

Zusammenfassung

Hydrologische und meteorologische Risiken sind besonders akut über Gebirgsregionen, die häufig von Starkniederschlägen betroffen sind. Um ihre verheerenden Folgen zu mildern, werden genaue Wetterprognosen dringend benötigt. Quantitative Niederschlagsvorhersage ist jedoch eine schwierige Aufgabe und traditionelle globale numerische Wettervorhersagemodelle zeigen meistens eine ungenügende Vorhersagequalität. Die Entwicklung neuer Vorhersagemodelle hat in den letzten Jahren vielversprechende Perspektiven aufgezeigt. Diese Modelle sind durch eine horizontale Auflösung von $\mathcal{O}(1 \text{ km})$ gekennzeichnet, die eine quasi explizite Simulation von Konvektion sowie eine realistischere Darstellung der Topographie ermöglicht. Wegen der chaotischen Natur der Atmosphäre ist auch das Interesse an hochaufgelösten Ensemble Vorhersage Systemen (EVS) laut geworden, die erfolgreich für synoptische Wettervorhersagen eingesetzt werden. Diese Entwicklung in Richtung hochaufgelöster Modelle ist nicht unproblematisch, da die Vorhersagbarkeit der so simulierten Wetterphänomene nicht abgeklärt ist. Eine Kernfrage betrifft die Gültigkeit der tangentialen linearen Approximation, die weithin für synoptische numerische Wettervorhersagen benutzt wird.

Es ist das Ziel der vorliegenden Doktorarbeit, Aspekte mesoskaliger Vorhersagbarkeit zu untersuchen, die für hochaufgelöste quantitative Niederschlagsvorhersage über komplexer Topographie von Relevanz sind. Der Schwerpunkt liegt auf meso- β (20-200 km) Vorhersagbarkeitsbeschränkungen, die sich aus dem Wachstum von Anfangsunsicherheiten auf der meso- γ Skala (2-20 km) ergeben. Reale Fälle starker Niederschläge werden mit einem hochaufgelösten (2.2-km Gitterweite) numerischen Wettervorhersagemodell simuliert. Der Anfangszustand der Simulationen wird gestört, wobei gleiche laterale Randbedingungen benutzt werden (perfekte synoptische Vorhersagbarkeit).

Im Kapitel 2 wird in Übereinstimmung mit früheren Studien gezeigt, dass mesoskalige Vorhersagbarkeitsbeschränkungen von Bedeutung für quantitative Niederschlagsvorhersagen sind. Die Vorhersagbarkeit der drei untersuchten Fälle unterscheidet sich deutlich. Normierte Niederschlagsstrebereiten liegen zwischen 0.05 (vorhersagbar) und 1 (unvorhersagbar) auf Skalen $\mathcal{O}(50 \text{ km})$. Die Vorhersagbarkeit geht vor allem über konvektiven Regionen verloren. Konvektion ist eine notwendige, nicht aber hinreichende Bedingung, um signifikantes Fehlerwachstum zu verursachen. Diese Zweideutigkeit, bezeichnet als "Rätsel der Vorhersagbarkeit", kann durch dynamische Instabilitätsüberlegungen erklärt werden. Sowohl kon-

vektive Instabilität als auch ein Strömungsregime, das eine Ausbreitung von Störungen gegen die Strömungsrichtung erlaubt, werden hier benötigt. Mit Hilfe einer linearen Analyse der Schwerwellenausbreitung wird gezeigt, dass diese Hypothese in der Lage ist, die jeweilige Vorhersagbarkeit der drei Fälle zu erklären.

Da Konvektion zum Fehlerwachstum führt, werden kleinskalige Anfangsunsicherheiten sehr schnell verstärkt. Kombiniert mit einer wirkungsvollen Ausbreitung mittels Schall- und Schwerwellen zeigt Kapitel 3, dass sich Fehler in 1-2 h weit weg von ihren initialen Störungen entwickeln können. Dies bedeutet, dass hochaufgelöste Simulationen sehr empfindlich auf ihre Anfangsbedingungen reagieren. Dies bedeutet aber auch, dass die mit verschiedenen Anfangsstörungen erhaltenen Fehlermuster schnell konvergieren. Im betrachteten Fall, der durch Konvektion mittlerer Intensität gekennzeichnet ist, konvergieren verschiedene initiale Störungen innerhalb von 11 h. Diese schnelle Konvergenz spiegelt auch die hohe Nichtlinearität des Systems wieder.

Im Kapitel 4 wird dementsprechend gezeigt, dass sich die Vorhersagbarkeit von kurzfristigen (1 d) hochaufgelösten Simulationen von der Vorhersagbarkeit von mittelfristigen (10 d) synoptischen Wettervorhersagen in folgendem Sinne unterscheidet. Die zugehörigen Fehlerverdopplungszeiten, mit Werten von 4 h und 40 h, unterscheiden sich deutlich, da sie mit konvektiver bzw. barokliner Instabilität verknüpft sind. Die tangente lineare Annahme verliert ihre Gültigkeit nach 1.5 Stunden bzw. 54 Stunden. Aus nichtlinearer Sicht entspricht also eine 10-d synoptische Prognose nur einer ca. 7-h hochaufgelöste Simulation, was viel kürzer ist als der vorgesehene 1 d. In Folge dieser unterschiedlichen Charakteristiken, insbesondere des schnelleren Verlustes einer eindeutigen Beziehung zwischen initialer Unsicherheit und zukünftigem Zustand, ist die Gültigkeit von Techniken wie optimalen Störungen, 4D-Var oder gezielten Beobachtungen für kurzfristige hochaufgelöste Simulationen fragwürdig. Die Unterschiede zwischen den zwei betrachteten Systemen werden auch mit Hilfe des Lorenz Modells erklärt.

Das letzte Kapitel ist von mehr praktischen Überlegungen geprägt und untersucht die potentiellen Vorteile, die ein hochaufgelöstes EVS für ein Starkniederschlagsereignis im Vergleich zu seinem treibenden synoptischen EVS bringen könnte. Die Annahme von perfekter synoptischer Vorhersagbarkeit gilt nicht mehr. Das hochaufgelöste EVS liefert während der Starkniederschlagsphase leicht bessere Vorhersagen als sein treibendes gröberes EVS, das zu viel Niederschlag wegen seiner konvektiven Parametrisierung produziert. Die durch die Auflösung bedingten Unterschiede sind jedoch meistens kleiner als die Variabilität innerhalb eines Ensembles. Schliesslich wird gezeigt, dass die Vernachlässigung von kleinskaligen Anfangsunsicherheiten zu einer Unterschätzung der Niederschlagsstreuung während der ersten Simulationstunden führt.

Résumé

Les risques hydrologiques et météorologiques sont particulièrement aigus sur les régions montagneuses, qui sont fréquemment le théâtre de fortes précipitations et inondations. Pour atténuer leurs conséquences désastreuses, des prévisions météorologiques de haute précision sont requises. Malheureusement, la prévision quantitative des précipitations est une tâche difficile et les traditionnels modèles numériques de prévision météorologique n'affichent qu'une qualité insuffisante à ce sujet. Ces dernières années, de prometteuses perspectives se sont ouvertes grâce au développement de nouveaux modèles numériques. Ces modèles sont caractérisés par une résolution horizontale de $\mathcal{O}(1 \text{ km})$. Celle-ci permet un traitement explicite des systèmes convectifs et une meilleure représentation de la topographie. Etant donné que l'atmosphère est chaotique, un intérêt croissant pour le design de systèmes de prévision d'ensemble (SPE) à haute résolution s'est aussi fait sentir, ces systèmes étant appliqués avec succès à l'échelle synoptique. Ce développement pose un certain nombre de questions concernant la prévisibilité des phénomènes météorologiques ainsi simulés. Une des issues principales concerne la validité de l'approximation linéaire-tangente qui est largement employée pour les prévisions d'ordre synoptique.

Le but de cette thèse est d'investiguer certains aspects de la prévisibilité qui sont importants pour la prévision quantitative des précipitations à haute échelle. En particulier, l'accent est mis sur les limitations de prévisibilité qui apparaissent à l'échelle meso- β (20-200 km) à la suite de la croissance d'incertitudes initialement présentes à l'échelle meso- γ (2-20 km). Un ensemble de simulations est intégré pour des cas réels de fortes précipitations avec une résolution horizontale de 2.2 km. Les différentes simulations sont obtenues en perturbant leurs conditions initiales tout en utilisant les mêmes conditions latérales (prévisibilité parfaite à l'échelle synoptique).

Le chapitre 2 démontre que les limitations de prévisibilité se manifestant à meso-échelle sont importantes pour la prévision quantitative des précipitations, ce qui confirme des études antérieures. La prévisibilité des trois cas considérés varie considérablement. Les valeurs normées de la dispersion des précipitations se situent entre 0.05 (hautement prévisible) et 1 (virtuellement imprévisible) pour une échelle $\mathcal{O}(50 \text{ km})$. Les pertes de prévisibilité sont en premier lieu liées à des effets convectifs. L'existence de systèmes convectifs est une condition nécessaire mais insuffisante pour induire une amplification d'erreurs. Cette ambiguïté,

appelée "mystère de prévisibilité", peut être expliquée en utilisant la théorie dynamique de l'instabilité. Non seulement des effets convectifs mais aussi une propagation à contre-courant des perturbations sont nécessaires pour limiter la prévisibilité de manière significative. En utilisant une analyse linéaire de la propagation d'ondes de gravité, il est démontré que cette hypothèse permet de distinguer la prévisibilité associée avec les trois cas considérés.

Puisque l'instabilité convective induit une croissance d'erreurs, l'amplification des incertitudes initiales est extrêmement rapide. Combiné avec une propagation efficace au moyen d'ondes acoustiques et d'ondes de gravité, il est démontré au chapitre 3 que des foyers d'erreurs peuvent rapidement (1-2 h) se développer loin des perturbations initiales. Cela signifie que les simulations numériques intégrées à haute résolution réagissent très sensiblement à leurs conditions initiales. Cela implique aussi que la distribution spatiale des erreurs obtenues avec différentes techniques de perturbation converge rapidement. Pour le cas considéré, qui se caractérise par de la convection d'intensité moyenne, différentes méthodes de perturbation convergent en 11 h. Cette rapide convergence révèle aussi le haut degré de non-linéarité qui prévaut dans notre système de modélisation.

En conséquence, le chapitre 4 montre que la prévisibilité associée avec des prévisions numériques à haute résolution et à court terme est différente de la prévisibilité caractérisant les simulations intégrées à l'échelle synoptique et à moyen terme dans le sens suivant. Les temps de duplication des erreurs sont de l'ordre de 4 h et de 40 h, respectivement, puisqu'ils sont premièrement associés à des instabilités convectives et baroclines. L'approximation linéaire-tangente perd sa validité après 1.5 h et 54 h respectivement. En termes de non-linéarité, une prévision synoptique de 10 jours ne correspond ainsi qu'à une prévision à haute résolution d'environ 7 h, ce qui est bien plus court que le temps prévu d'un jour. Ces différentes caractéristiques, en particulier la perte rapide d'une relation bijective entre incertitudes initiales et finales, questionnent l'application de techniques telles que perturbations optimales, 4D-Var et observations adaptatives pour des prévisions numériques à court terme et à haute résolution. Les différences obtenues entre les deux systèmes considérés sont aussi analysées au moyen du modèle de Lorenz.

Le dernier chapitre (chapitre 5) considère des applications plus pratiques et tente de déterminer l'utilité d'un SPE à haute résolution dont les conditions latérales proviennent d'un SPE d'échelle synoptique pour un cas de fortes précipitations et inondations. L'hypothèse d'une prévisibilité parfaite à l'échelle synoptique est donc relaxée. Le SPE intégré à haute résolution produit des prévisions d'une qualité légèrement supérieure pendant la phase de fortes précipitations. En effet, le SPE synoptique produit des précipitations excessives à cause de sa paramétrisation convective. Les différences résultant de l'emploi de diverses résolutions sont en général plus petites que la variabilité à l'intérieur d'un ensemble après un jour d'intégration. Il est aussi démontré que le fait de négliger initialement l'incertitude à l'échelle meso- γ induit une sous-estimation de la dispersion des précipitations pendant les premières heures d'intégration.