
Foreword

The idea to publish this book arose from the success of the André J. Robert Memorial Symposium on Numerical Methods in Atmospheric and Oceanic Modelling, held, 5–7 October 1994 at the Université du Québec à Montréal, Canada, where the late Dr. Robert held a faculty position. The Symposium was organised by the Atmospheric Environment Service, Environment Canada. The book contains peer reviewed versions of papers presented at the Symposium, a transcript of a 1987 interview with Dr. Robert and, as a supplement, four previously unpublished papers by Dr. Robert. The book is published as a companion volume to Atmosphere-Ocean. As Dr. Robert published some of his most influential work in Atmosphere-Ocean, this memorial volume is a most fitting tribute.

Throughout his career, Dr. Robert worked on numerical methods to improve the efficiency and accuracy of numerical weather prediction and climate models. Among his major contributions are the first integration of a global spectral primitive equations model, the development of an efficient time filter, and pioneering studies in the use of the semi-implicit and semi-Lagrangian methods. The numerical schemes that he developed have now been implemented in major numerical weather prediction and climate research centres around the world. Dr. Robert also contributed to the development of the Mesoscale Compressible Community (MC2) model, the first efficient model based on the fully elastic non-hydrostatic equations that could in principle be used at all scales. This model is now used in many research centres in Canada and abroad. Through his published works, teaching activities, research seminars and participation in international forums, Dr. Robert has exercised a lasting influence on many scientists and on the science of numerical modelling.

The contributing authors are from laboratories from around the world. Their readiness to participate in the Symposium and to submit papers to the present volume is a tribute to the significance of Dr. Robert's contributions. The papers report on or review original state-of-the-art research findings in numerical modelling. This monograph should therefore be of interest to students and researchers in numerical weather prediction, climate simulation, dynamic meteorology and ocean modelling.

We would like to thank all authors for their excellent collaboration which made possible this monograph. We appreciate the encouragement and advice of Dr. Richard Asselin, Director of Publications for the Canadian Meteorological and Oceanographic Society; Gerald Neville, Head of the Monograph Publishing Program of the NRC Research Press; and Dr. Michel Béland, Director of Centre de recherche en calcul appliqué (CERCA). Financial support from the Natural Sciences and Engineering Research Council, the Atmospheric Environment Service, the Canadian Meteorological and Oceanographic Society and NRC Research Press is gratefully acknowledged.

x / Foreword

Ms. Claire Poulin of CERCA provided word processing assistance with the previously unpublished papers of Dr. Robert. Last but not least, a special acknowledgement is due Ms. Sheila Bourque, who meticulously worked through each paper as the technical editor.

Charles A. Lin, McGill University
René Laprise, Université du Québec à Montréal
Harold Ritchie, Atmospheric Environment Service
Editors

Avant-propos

L'idée de publier ce livre est venue du succès du Colloque à la mémoire d'André J. Robert, sur les méthodes numériques en modélisation atmosphérique et océanique, qui a eu lieu les 5-7 octobre 1994 à l'Université du Québec à Montréal, là où le regretté Dr Robert était professeur. Le Colloque a été organisé par le Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. Le livre contient des versions soumises à un comité de lecture des articles présentés au Colloque, une transcription d'un entretien en 1987 avec le Dr Robert, et en supplément, quatre articles précédemment non-publiés du Dr Robert. Le livre est publié comme compagnon de la revue *Atmosphère-Océan*. Puisque le Dr Robert a publié certains de ses articles les plus importants dans *Atmosphère-Océan*, ce volume à sa mémoire est un hommage très approprié.

Le Dr Robert a consacré sa carrière aux méthodes numériques, afin d'améliorer l'efficacité et la précision des prévisions numériques météorologiques ainsi que des simulations climatiques. Parmi ses grandes contributions notons la première intégration d'un modèle global spectral aux équations primitives, la réalisation d'un filtre temporel efficace, et des études d'avant garde sur l'application des méthodes semi-implicite et semi-Lagrangienne. Les méthodes numériques qu'il a développées sont utilisées dans les grands centres de prévision numérique météorologique et de recherche climatique dans le monde entier. Le Dr Robert a aussi contribué au développement du modèle "Mesoscale Compressible Community (MC2)", le premier modèle efficace aux équations entièrement élastiques non-hydrostatiques qui peut en principe être utilisé à toutes les échelles. Ce modèle est maintenant utilisé dans plusieurs centres de recherche au Canada et à l'étranger. Par ses publications, son enseignement, ses séminaires et sa participation aux conférences internationales, le Dr Robert a eu une influence profonde sur de nombreux scientifiques et sur la science de modélisation numérique.

Les auteurs proviennent de laboratoires du monde entier. Leur enthousiasme à participer au Colloque et à soumettre des articles pour ce volume est un hommage à l'importance des contributions du Dr Robert. Les articles présentent d'importantes découvertes originales dans la recherche en modélisation numérique. Cette monographie devrait donc être d'intérêt pour les étudiants et les chercheurs en prévision numérique météorologique, en simulation du climat, en météorologie dynamique et en modélisation de l'océan.

Nous voulons remercier tous les auteurs pour leur excellente collaboration, qui a rendu possible cette monographie. Nous avons apprécié l'encouragement et les conseils du Dr Richard Asselin, Directeur des publications de la Société canadienne de météorologie et d'océanographie; de Gerald Neville, Directeur du Programme des publications de monographies du CNRC et du Dr Michel Béland, Directeur du Cen-

xii / Avant-propos

tre de recherche en calcul appliqué (CERCA). Nos remerciements vont au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie, au Service de l'environnement atmosphérique, à la Société canadienne de météorologie et d'océanographie et aux Presses scientifiques du CNRC pour leur appui financier.

Mme Claire Poulin du CERCA a fourni de l'aide avec le traitement de texte des articles précédemment non-publiés du Dr Robert. Les derniers, mais non les moindres remerciements sont adressés à Mme Sheila Bourque qui a vérifié si méticuleusement chaque article, en tant qu'éditrice technique.

Charles A. Lin, Université McGill
René Laprise, Université du Québec à Montréal
Harold Ritchie, Service de l'environnement atmosphérique
Éditeurs

Curriculum Vitae of André J. Robert

Born 28 April 1929, New York, U.S.A.

Immigrated to Canada, May 1937

Deceased 18 November 1993, Montréal, Québec, Canada

Education

1952 B.Sc., Mathematics, Université Laval

1953 M.Sc., Meteorology, University of Toronto

1965 Ph.D., Meteorology, McGill University

Professional positions

1952–1959 Atmospheric Environment Service
Forecaster

1959–1970 Atmospheric Environment Service
Scientist, Division de recherche en prévision numérique (RPN)

1970–1971 McGill University
Professor, Department of Meteorology

1971–1987 Atmospheric Environment Service
Chief, RPN, 1971–1973
Director, Canadian Meteorological Centre, 1973–1980
Senior Scientist, RPN, 1980–1987

1987–1993 Université du Québec à Montréal
Professor, Department of Physics

Professional appointments

1968–1969 Lecturer in training courses, U.S. National Meteorological Center,
Washington, D.C.

1968–1972 Member, Subcommittee in Meteorology and Atmospheric Sciences,
National Research Council

1970–1976 Member, Working Group on Numerical Experimentation, World Meteorological Organisation (WMO)

1971–1973 Chair, Working Group on Numerical Experimentation, WMO

1972–1973 President, Canadian Meteorological and Oceanographic Society

1972–1976 Editor, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling,
WMO

1972 Chair, WMO Study Group Conference on the Parametrization of Sub-grid Scale Physical Processes, Leningrad, USSR

1973 Chair, WMO Study Group Conference on Modelling Aspects of GATE, Tallahassee, Florida

xiv / Curriculum Vitae

- 1974 Chair, International Symposium on Spectral Methods in Numerical Weather Prediction, Copenhagen, Denmark
- 1975 Member of Canadian delegation, 7th Congress of the WMO
- 1980–1983 Member, Grant Selection Committee for Meteorology, Aeronomy and Astronomy, Natural Sciences and Engineering Research Council

Honours

- 1967, 1971 President's Prize, Canadian Meteorological and Oceanographic Society
- 1968 Fellow, American Meteorological Society
- 1981 Second Half Century Award, American Meteorological Society
- 1982 Fellow, Royal Society of Canada
- 1986 Patterson Medal, Atmospheric Environment Service
- 1987–1993 Emeritus Scientist, Atmospheric Environment Service

Curriculum vitae de André J. Robert

Né le 28 avril 1929, New York, États-Unis
Immigré au Canada en mai 1937
Décédé le 18 novembre 1993, Montréal, Québec, Canada

Formation académique

1952 B.Sc., Mathématiques, Université Laval
1953 M.Sc., Météorologie, Université de Toronto
1965 Ph.D., Météorologie, Université McGill

Expérience professionnelle

1952–1959 Service de l'environnement atmosphérique
Prévisionniste
1959–1970 Service de l'environnement atmosphérique
Chercheur, Division de recherche en prévision numérique (RPN)
1970–1971 Université McGill
Professeur, Département de météorologie
1971–1987 Service de l'environnement atmosphérique
Chef, RPN, 1971–1973
Directeur, Centre météorologique canadien, 1973–1980
Chercheur principal, RPN, 1980–1987
1987–1993 Université du Québec à Montréal
Professeur, Département de physique

Distinctions professionnelles

1968–1969 Chargé de cours de formation, U.S. National Meteorological Center,
Washington, D.C.
1968–1972 Membre, Sous-comité en météorologie et sciences atmosphériques,
Conseil national de recherches
1970–1976 Membre, Working Group on Numerical Experimentation, Organisation
météorologique mondiale (OMM)
1971–1973 Président, Working Group on Numerical Experimentation, OMM
1972–1973 Président, Société canadienne de météorologie et d'océanographie
1972–1976 Éditeur, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling,
OMM
1972 Président, Study Group Conference on the Parametrization of Sub-grid
Scale Physical Processes (OMM), Leningrad, URSS
1973 Président, Study Group Conference on Modelling Aspects of GATE
(OMM), Tallahassee, Floride

xvi / Curriculum Vitae

- 1974 **Président, International Symposium on Spectral Methods in Numerical Weather Prediction, Copenhague, Danemark**
- 1975 **Membre de la délégation canadienne, 7ème Congrès de l'OMM**
- 1980–1983 **Membre, Comité de sélection de subventions en météorologie, en aéronomie et en astronomie, Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie**

Distinctions

- 1967, 1971 **Prix-du président, Société canadienne de météorologie et d'océanographie**
- 1968 **Fellow, American Meteorological Society**
- 1981 **Second Half Century Award, American Meteorological Society**
- 1982 **Membre, Société royale du Canada**
- 1986 **Médaille Patterson, Service de l'environnement atmosphérique**
- 1987–1993 **Chercheur émérite, Service de l'environnement atmosphérique**

Primary publications of André J. Robert / Publications principales de André J. Robert

- Robert, A. 1997. Incompressible homogeneous fluids. (this volume).
- . 1997. Erreurs induites par le schème Lagrangien dans les ondes stationnaires. (ce volume).
- . 1997. Comportement du schème Lagrangien dans une équation différentielle relativement simple. (ce volume).
- and M. Lepine. 1997. An anomaly in the behaviour of the time filter used with the leapfrog scheme in atmospheric models. (this volume).
- Ritchie, H. and A. Robert. 1997. A historical perspective on numerical weather prediction: A 1987 interview with André Robert. (this volume).
- Xu, Weimin; C. Lin and A. Robert. 1997. A C-grid ocean general circulation model: Model formulation and frictional parametrizations. (this volume).
- Rivest, C.; A. Staniforth and A. Robert. 1994. Spurious resonant response of semi-Lagrangian discretizations to orographic forcing: diagnosis and solution. *Mon. Weather Rev.* **122**: 366–376.
- Robert, A. 1993. Bubble convection experiments with a semi-implicit formulation of the Euler equations. *J. Atmos. Sci.* **50(13)**: 1865–1873.
- Tanguay, M.; E. Yakimiv, H. Ritchie and A. Robert. 1992. Advantages of spatial averaging in semi-implicit semi-Lagrangian schemes. *Mon. Weather Rev.* **120(1)**: 115–123.
- Jakimow, G.; E. Yakimiv and A. Robert. 1992. An implicit formulation for horizontal diffusion in gridpoint models. *Mon. Weather Rev.* **120(1)**: 124–130.
- Tanguay, M.; A. Robert and R. Laprise. 1990. A semi-implicit semi-Lagrangian fully compressible regional forecast model. *Mon. Weather Rev.* **118(10)**: 1970–1980.
- Yakimiv, E. and A. Robert. 1990. Validation experiments for a nested grid-point regional forecast model. *ATMOSPHERE-OCEAN*, **28(4)**: 466–472.
- Tanguay, M. and A. Robert. 1990. An efficient optimum interpolation analysis. *ATMOSPHERE-OCEAN*, **28(3)**: 365–377.
- Desharnais, F. and A. Robert. 1990. Errors near the poles generated by a semi-Lagrangian integration scheme in a global spectral model. *ATMOSPHERE-OCEAN*, **28(2)**: 162–176.
- Robert, A. and E. Yakimiv. 1986. Identification and elimination of an inflow boundary computational solution in limited area model integrations. *ATMOSPHERE-OCEAN*, **24(4)**: 369–385.
- Tanguay, M. and A. Robert. 1986. Elimination of the Helmholtz equation associated with the semi-implicit scheme in a grid point model of the shallow water equations. *Mon. Weather Rev.* **114(11)**: 2154–2162.

- Yakimiw, E. and A. Robert. 1986. Accuracy and stability analysis of a fully implicit scheme for the shallow-water equations. *Mon. Weather Rev.* **114**(1): 240–244.
- Robert, A.; T.L. Yee and H. Ritchie. 1985. A semi-Lagrangian and semi-implicit numerical integration scheme for multilevel atmospheric models. *Mon. Weather Rev.* **113**: 388–394.
- . 1983. The design of efficient time integration schemes for the primitive equations. *In: Proceedings of the Seminar on Numerical Methods for Weather Prediction.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Vol. 2, pp. 193–200.
- ; T.L. Yee and H. Ritchie. 1983. Application of the semi-implicit and semi-Lagrangian integration scheme to a limited area model. *In: Proceedings of the Seminar on Numerical Methods for Weather Prediction.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Vol. 2, pp. 201–212.
- . 1982. A semi-implicit and semi-Lagrangian numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **60**: 319–325.
- . 1981. A stable numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. *ATMOSPHERE-OCEAN*, **19**: 319–325.
- . 1979. The Semi-implicit method. Numerical Methods used in Atmospheric Models. World Meteorological Organisation, GARP Publication, Series No. 17, Chapter 8, pp. 419–437.
- . 1975. Sensitivity experiments for the development of NWP models. *In: Proceedings of the Eleventh Stanstead Seminar.* Department of Meteorology, McGill University, pp. 68–81.
- . 1974. GARP activities related to computational considerations. World Meteorological Organisation Working Group on Numerical Experimentation, Report No. 4, pp. 2–23.
- . 1973. Computational resolution requirements for accurate medium-range numerical predictions. Symposium on finite difference and spectral methods for atmosphere and ocean dynamics problems. Siberian Branch of the Academy of Sciences, Novosibirsk, U.S.S.R., pp. 82–102.
- ; J. Henderson and C. Turnbull. 1972. An implicit time integration scheme for baroclinic models of the atmosphere. *Mon. Weather Rev.* **100**(5): 329–335.
- . 1971. Truncation errors in a filtered barotropic model. *In: Proceedings of the Ninth Stanstead Seminar.* Department of Meteorology, McGill University, pp. 13–28.
- Kwizak, M. and A. Robert. 1971. A semi-implicit scheme for grid point atmospheric models of the primitive equations. *Mon. Weather Rev.* **99**(1): 32–36.
- Robert, A.; F.G. Shuman and J.P. Gerrity. 1970. On partial difference equations in mathematical physics. *Mon. Weather Rev.* **98**(1): 1–6.
- . 1969. An unstable solution to the problem of advection by the finite-difference Eulerian method. Office Note No. 30, National Meteorological Center, Washington, D.C.
- . 1969. Forecast experiments with a spectral model. *In: Proceedings of Sem-*

Primary Publication / Publications principales / xix

- inars on the Middle-Atmosphere. Stanstead, Québec. Department of Meteorology, McGill University, pp. 69–82.
- . 1968. Résultats de quelques applications récentes de la méthode spectrale. *La Météorologie*. Paris, France. pp. 453–469.
- . 1968. The treatment of moisture and precipitation in atmospheric models integrated by the spectral method. *J. Appl. Met.* 7: 730–735.
- . 1968. The integration of a spectral model of the atmosphere by the implicit method. Proceedings of the International Symposium on Numerical Weather Prediction. Tokyo. pp. 19–25.
- . 1968. Integration of a spectral barotropic model from global 500-mb charts. *Mon. Weather Rev.* 96: 83–85.
- . 1967. The incorporation of precipitation into a spectral model of the atmosphere. Proceedings of the Seminar on the Middle-Atmosphere. Stanstead, Québec. Department of Meteorology, McGill University, pp. 91–114.
- . 1966. The integration of a low order spectral form of the primitive meteorological equations. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 44: 237–245.
- . 1965. The integration of the spectral form of the primitive equations. Proceedings of the Symposium on the Dynamics of Large-Scale Atmospheric Processes. Academy of Sciences of the U.S.S.R., Moscow, pp. 66–69.
- . 1965. The behaviour of planetary waves in an atmospheric model based on spherical harmonics. McGill University. Publication in Meteorology No. 77.
- . 1963. A baroclinic model for the Canadian numerical weather prediction program. Seminars on the Stratosphere and Mesosphere and Polar Meteorology. Stanstead, Québec. Department of Meteorology, McGill University, pp. 83–88.
- . 1963. Baroclinic experiments with a four-level statistical dynamical model. Meteorological Memoirs No. 15.
- and M. Kwizak. 1963. An evaluation of simple non-geostrophic forecasts. Meteorological Memoirs No. 13.