

cuestiones relacionadas con la protección del medio ambiente?

A.E. — Me han interesado esos temas pero temo que no he aportado mucho. He abordado sobre todo problemas a los que creía poder contribuir sin tener en cuenta su posible importancia para el ambiente. Se trataba de problemas de dinámica de fluidos, los cuales, sin embargo, no son tan completamente ajenos a las cuestiones medioambientales. Después de todo son las corrientes aéreas y marinas las que transportan los contaminantes.

H.T. — Ha recibido numerosos galardones y reconocimientos a su labor. ¿Hay alguno que le gustaría mencionar en particular?

A.E. — Recibir el Premio Balzan fue una experiencia fantástica y una gran sorpresa para mí. La Real Orden

de San Olav es un galardón otorgado por el Rey de Noruega por méritos para con el país. La recibí por la investigación y la docencia en el campo de la meteorología.

H.T. — Díganos algo sobre su familia

A.E. — Ellen y yo nos casamos en 1944. Tenemos dos hijos, Anton y Jørgen. Cuando alcanzaron la edad escolar, Ellen reanudó sus estudios y se graduó en geografía, historia e inglés en 1957.

Trabajó como profesora de bachillerato hasta su jubilación en 1991. Ha sido la buena compañera de muchos de mis viajes.

H.T. — Ha sido un placer encontrarles de nuevo y compartir recuerdos en un marco tan bello.

EL PROYECTO ALADIN: LA MODELIZACIÓN DE LA MESOESCALA COMO ELEMENTO BÁSICO PARA LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO Y LA INVESTIGACIÓN ATMOSFÉRICA

Por miembros del equipo internacional de ALADIN

Introducción

El acrónimo ALADIN (*aire limiteé adaptation dynamique développement international*) describe las distintas facetas de un proyecto internacional (para la modelización de área limitada a mesoescala) que implica a más de 110 personas de 14 Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) de Austria, Bélgica, Bulgaria, Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, Francia, Hungría, Marruecos, Polonia, Portugal, República Checa, República de Moldavia y Rumania. Explicaremos primero las cuatro características “vitales” de este proyecto, antes de entrar en un análisis más profundo sobre su organización histórica y sobre sus aspectos científicos y técnicos.

La filosofía

Aunque está totalmente aceptado que hoy la predicción numérica del tiempo (PNT) requiere la colaboración internacional y que un modelo de cooperación entre SMN de diferentes niveles tecnológicos debe

ser mutuamente beneficioso, a pesar del lógico desequilibrio, aparentemente nunca se había propuesto con anterioridad la combinación de ambas ideas. Por ello, esta es la columna vertebral de la filosofía ALADIN: los SMN con menos experiencia en la PNT operativa ofrecerán sus conocimientos científicos y una visión nueva sobre los problemas de la PNT, mientras que *Météo-France* asegurará la organización del proyecto y sus vínculos con las tecnologías avanzadas; según progrese el proyecto estas diferencias serán cada vez menos pronunciadas. Por definición, todos los asociados que acepten las reglas del proyecto tienen la misma libertad para beneficiarse de los frutos del trabajo en común, tanto en la investigación como en las aplicaciones prácticas.

El sistema

ALADIN se construyó por completo sobre la noción de compatibilidad con un sistema “matriz”, el IFS/ARPEGE. Este último, un desarrollo conjunto

entre el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM) y *Météo-France*, se pensó sólo para tener en cuenta las aplicaciones mundiales de la PNT; de aquí la idea de ALADIN, para complementar el proyecto IFS/ARPEGE con la versión de un modelo de área limitada (MAL), aunque procurando mantener las diferencias mínimas entre los dos programas. En consecuencia, fue absolutamente necesario copiar la organización de los códigos de un sistema al otro. Las palabras clave de esta organización son: *integración* (todas las aplicaciones se desarrollan y mantienen dentro de una parte única del programa); *flexibilidad* (disponer de tantas opciones como sea posible con la simple manipulación de ficheros de entrada sin formato); *modularidad* (una función = una parte única del código); y *generalidad* (tener tan pocas hipótesis restrictivas como sea posible, tanto desde el punto de vista científico como de la transcripción de algoritmos). Además, la dualidad entre el ARPEGE (mundial con posibilidad de resolución variable) y ALADIN (MAL), que comparten los mismos puntos de rejilla dinámicos y físicos, es una ventaja magnífica para abordar los desafíos de los próximos años respecto a la PNT de alta resolución. Por ejemplo, dentro de ambos proyectos ya se han abordado los aspectos de la asimilación avanzada de datos (variacional) sobre todo en el marco mundial, mientras que se han explorado en el marco del MAL los aspectos referentes a la alta resolución (no hidrostática), manteniendo siempre abierta la posibilidad de transferirlos de un sitio a otro. La estricta aplicación de la regla de integración-flexibilidad-modularidad-generalidad (IFMG) dentro del trabajo de ALADIN es ahora una práctica bastante bien establecida. Por supuesto que la compatibilidad con el IFS/ARPEGE complica los temas. Por ejemplo, hay cuatro tipos de rutinas de ALADIN: las comunes con el IFS/ARPEGE (es decir, la física o los puntos de rejilla dinámicos); las que duplican las funciones científicas de una rutina del IFS/ARPEGE dentro del marco del MAL (p. ej. los cálculos espectrales); las que duplican las funciones de control de una rutina del IFS/ARPEGE con un nombre idéntico (p. ej. la organización del tiempo de pasada); y las específicas del ALADIN (p. ej. el acoplamiento con la información a una escala mayor). Esta complejidad es especialmente perjudicial para los procesos de mantenimiento cruciales, que están copiados del IFS/ARPEGE, que, por ejemplo, está organizado según "ciclos" (emisiones totalmente validadas cada seis a nueve meses). En la actualidad existe el ciclo 17 del IFS/ARPEGE, así como el ciclo 7 de ALADIN, estando este último en fase con el ciclo 16 del ARPEGE. Esta

diferencia de 9 entre ambos números indica únicamente el hecho de que el proyecto ALADIN fue puesto en marcha aproximadamente cuatro años después del IFS/ARPEGE. Debemos reconocer aquí la ayuda del personal del CEPMPM en la resolución de estos complejos problemas.

El uso de configuraciones

En la actualidad hay cinco totalmente validadas, aunque es probable que el número se incremente en un futuro próximo, dado el impulso del proyecto, estas son: (a) la creación de condiciones "geográficas" para cualquier geometría dada del MAL, e incluso de cualquier parte del mundo; (b) la creación de las condiciones de contorno iniciales y/o laterales partiendo de un archivo del ARPEGE o del ALADIN; (c) el módulo de análisis de interpolación óptima denominado CANARI; (d) la propia integración del modelo, que tiene la opción de su inicialización con filtro digital (FDI); y (e) el posproceso Full-Pos totalmente compatible, que no es en sí una configuración independiente sino una variante de una de las pasadas temporales de (d).

La ventaja de esta estructura es que todas estas aplicaciones pueden estar regidas por una versión de "objeto" único del código, para cualquier localización, geometría, número y separación de los niveles verticales, etc., con la certidumbre implícita de que todas estas características serán compatibles con la totalidad de las configuraciones sucesivamente empleadas, así como con la definición de las constantes fundamentales (gravedad, radio de la Tierra, constante de los gases, etc.) y de las funciones termodinámicas (presión de vapor saturante y expresiones derivadas). Frente a los problemas de mantenimiento anteriormente mencionados, que requerirán una gran inversión individual en unas pocas personas clave, este uso favorablemente simplificado del código (simples unix) será un punto a favor de un proyecto que necesita contar con mucho tiempo parcial de los científicos de ALADIN (con una presencia media en Toulouse = 25 por ciento de los miembros del equipo "normal").

Las aplicaciones múltiples

En el momento de escribir esto, ALADIN se encuentra en una fase preoperativa u operativa respecto a cinco aplicaciones (véase el mapa de países participantes y los dominios de integración de la figura 1):

- en *Maroc-Météo*, aplicación completa del MAL incluyendo la asimilación de datos, malla de 16,6 km, 169 x 169 puntos, 27 niveles;

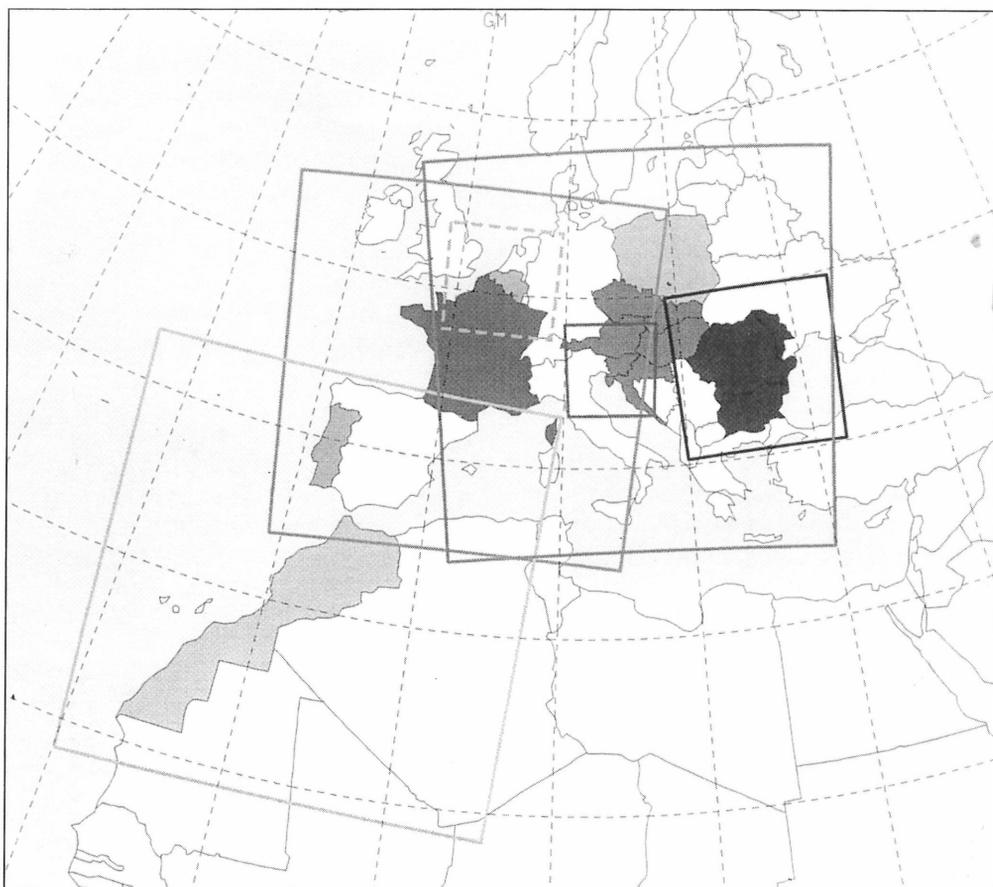


Figura 1 — Mapa con los asociados al ALADIN (con el RC-LACE y el SELAM agrupados cada uno bajo un sombreado gris) y los dominios operativos y preoperativos (línea discontinua)

- en *Météo-France*, predicción adaptada a malla fina dinámica, malla de 12,7 km, 189 x 189 puntos, 27 niveles;
- para los RC-LACE, lo mismo (SMN de Austria, Croacia, Eslovaquia, Eslovenia, Hungría y la República Checa, la aplicación se hará funcionar en Toulouse con compra de recursos informáticos y será controlada por los científicos de RC-LACE) con malla de 14,7 km, 205 x 181 puntos, 27 niveles;
- lo mismo, en Eslovenia, con malla de 11,7 km, 61 x 61 puntos, 27 niveles, acoplados con la aplicación de los RC-LACE;
- en Rumania, predicción adaptada a malla fina dinámica en modo retardado, malla de 12,3 km, 89 x 89 puntos, 27 niveles.

Se está preparando en Bélgica una sexta aplicación: malla de 7,0 km, 97 x 97 puntos, 27 niveles, acoplada a ALADIN-Francia.

Historia del proyecto

Se mencionarán aquí los principales acontecimientos relacionados con los aspectos políticos, financieros y técnicos.

Noviembre de 1990: *Météo-France* ofrece a los SMN de Bulgaria, Eslovenia, Hungría, Polonia, la República Checa y Rumania desarrollar y mantener conjuntamente una versión MAL del sistema ARPEGE con la intención de mantener una colaboración mutuamente beneficiosa en PNT y modelización a mesoescala.

Enero de 1991: se obtienen las ayudas denominadas MICECO (procedentes del Ministerio de Asuntos Exteriores francés, para la visita a Toulouse de especialistas de los SMN asociados) que serán la fuente de financiación continua y principal del proyecto.

Marzo de 1991: tres científicos de los SMN de Hungría, la República Checa y Rumania evalúan en París la viabilidad del proyecto común propuesto.

Septiembre de 1991: comienza la fase activa del proyecto en Toulouse: Eslovaquia declina la oferta de participación, pero a su vez, se integra Austria a través de lo que será la empresa RC-LACE. Así, 17 personas de siete países comienzan a trabajar en el proyecto MAL-ARPEGE (que un mes más tarde será rebautizado como ALADIN).

Agosto de 1992: el Ministerio Francés de Investigación acepta financiar la realización de cuatro Doctorados en Física en el marco del proyecto ALADIN. Éstos permitieron la ampliación del proyecto para estudiar cuestiones básicas relativas a su utilidad y su evolución posterior.

Octubre de 1992: está dispuesto el ciclo 0 de la biblioteca ALADIN.

Enero de 1993: la Comisión de las Comunidades Europeas selecciona el trabajo preoperativo del ALADIN como uno de los temas a financiar bajo la denominada acción PECO, en un contexto competitivo (1 a 35).

Noviembre de 1993: se unen al proyecto los SMN de Eslovaquia, Eslovenia y Marruecos. Los nueve socios realizan esfuerzos para una primera ejecución casi operativa en Toulouse en provecho de los SMN de Europa central y oriental.

Mayo de 1994: el trabajo de los siete miembros del equipo preoperativo financiado por PECO (con las aportaciones adicionales de los estudiantes del Doctorado en Físicas y de un grupo de científicos de *Météo-France* preestablecido) llega con éxito a su conclusión. El día 31 de mayo, el ALADIN está prácticamente operativo en el ordenador C98 de *Météo-France*. Aunque la aplicación se ejecuta solamente una vez al día (en forma secuencial respecto al ARPEGE), con una validez de sólo 36 horas y sin un ciclo de asimilación de datos específicos, es sin duda palpable la comprobación del buen juicio del proyecto.

Abril de 1995: los SMN de Croacia y España se unen al proyecto, aunque éste último lo abandonó más tarde.

Diciembre de 1995: el grupo SELAM (los SMN de Bulgaria y Rumania, a los que se unió posteriormente la República de Moldavia) crea una versión para estación de trabajo, todavía sin acceso respecto al desarrollo de los ciclos. Este trabajo preparó también el camino para una versión del ALADIN de memoria distribuida, prevista para los ciclos 6 y 7 de la biblioteca.

Enero de 1996: el RC-LACE y *Météo-France* firman un acuerdo para utilizar el ordenador J916/12 de Toulouse, desde el 1 de julio de 1996 al 31 de diciembre de 1997, como servidor de la apli-

cación preoperativa ALADIN-LACE, con el fin de ofrecer un modelo de transición durante la creación de la aplicación conjunta del ALADIN para Europa central a través de los seis SMN contribuyentes.

Febrero de 1996: el éxito de la fase de los Doctorados en Física, con dos de ellos ya superados y otros dos a punto de ser finalizados, lleva al Ministerio de Investigación Francés a renovar su concesión. Están en tramitación cinco nuevos doctorados en físicas.

Marzo-agosto de 1996: las cinco aplicaciones anteriormente mencionadas comienzan su ciclo preoperativo para pasar al estado operativo.

Noviembre de 1996: los Directores de los SMN asociados al ALADIN, firman en París un Memorándum de Entendimiento (MdE) que formaliza y regula el avance futuro del proyecto, en presencia del Secretario General de la OMM, Prof. G.O.P. Obasi.

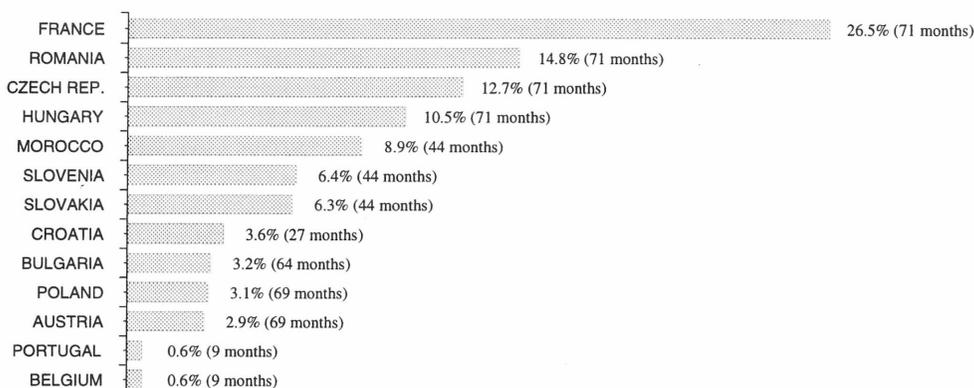
Marzo de 1997: el SMN checo adquiere un ordenador ITT con el fin de transferir desde Toulouse la aplicación para Europa central.

Organización del proyecto

La organización que se describe más adelante es la única utilizada hasta el momento. Seguramente no será la misma en el futuro, ya que distintas cuestiones (la transición al estado operativo múltiple, el paso desde "la plataforma dependiente" al código "abierto normalizado", la multiplicación de las declaraciones de interés de los posible nuevos asociados...) requerirán una solución más formal y menos centralizada.

Desde septiembre de 1991 hasta hace poco, el trabajo del ALADIN se centraba en las visitas de científicos de todos los asociados a Toulouse, su trabajo en su país, en relación con el ALADIN, estaba condicionado por las tareas que ellos habían desarrollado en Toulouse (por supuesto que esta situación cambiará rápidamente según se vayan transfiriendo las versiones operativas fuera de Toulouse). El número de horas compartidas en Toulouse con colegas de todas las nacionalidades permitió que se formara un equipo homogéneo y unido. La dificultad principal para su consecución fue la financiación de los viajes y de las visitas, teniendo una media de 15 personas trabajando en el proyecto (7,9 de visitantes, 3,9 del personal de *Météo-France* en Toulouse y 3,0 de otro personal) (véase en la figura 2 la distribución entre los diferentes asociados). En general, los viajes fueron asumidos por los asociados y las estancias fueron financiadas por *Météo-France*, o por los Ministerios franceses, o conseguidas mediante prue-

Número de personas/mes por países



Número por países de los 110 participantes

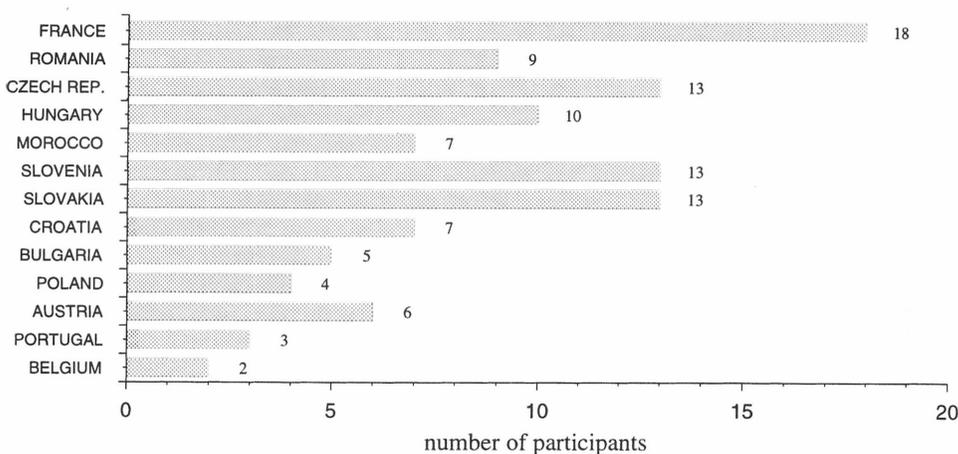


Figura 2 — Participantes en el proyecto ALADIN por cada asociado; la proporción en el trabajo total (junto con la duración de la participación específica) y el número de personas involucradas (a 30 de junio de 1997)

bas competitivas entre los asociados, o por apoyo bilateral entre *Météo-France* y uno de los socios o bien directamente financiadas por los asociados. El hecho de que se encontraran involucradas 17 fuentes distintas de financiación da una idea de la complejidad del esquema financiero.

La formalización necesaria antes de la descentralización del proyecto se concluyó con la firma, por parte de los 14 asociados, de un MdE. Éste se basaba en los principios observados por el ALADIN desde sus comienzos, la elección de los programas, las condiciones de uso para los asociados y para los miembros, una vez admitidos, del "club" ALADIN.

Contenido científico del proyecto

La importancia de todo lo que se ha dicho hasta ahora, respecto a un tema científico, debe parecer

bastante pobre. Sin embargo, uno debe considerar que los aspectos de la modelización meteorológica deben relacionarse cada vez más con el desarrollo de herramientas dentro de un ambiente operativo, que requerirán más y más métodos "industriales" para su producción y mantenimiento. A este respecto toda la información anterior preconiza las condiciones de trabajo de las ciencias atmosféricas, de las que darán testimonio los próximos 10 años. No obstante, todo ese "ambiente" tiene aún que fomentar el progreso científico y técnico y ese será el tema de este artículo de aquí en adelante.

En primer lugar revisaremos los puntos comunes entre el ARPEGE y el ALADIN:

- ambos modelos utilizan la técnica espectral para la representación horizontal de los campos. Esto significa que han de tomarse medi-

das especiales para el uso de una representación MAL bi-Fourier. La solución escogida aquí es la de Machenhauer y Haugen (1987) que requiere la denominada biperiodización de los campos mediante una "zona de ampliación" ficticia. Como ejemplo, la figura 3 da las características de orografía "extendida" de la aplicación ALADIN-LACE; uno se da cuenta de la suavización y del carácter isotrópico del paso de un lado al otro a través de la zona adicional. Se ha dicho en ocasiones que los métodos espectrales son inadecuados para las aplicaciones MAL y/o que no pueden representar las características angulosas por falta de "localidad". La figura 4, que representa las predicciones a 18 horas de los vientos a 10 m, es un buen contraejemplo a tener en cuenta; no parecen existir problemas de

contorno pero se ven (dibujadas) muchas características realistas tanto sobre la tierra como sobre el mar;

- la discretización vertical es híbrida (yendo progresivamente de "p" a σ);
- el tiempo de la pasada utiliza ahora el esquema semilagrangiano semiimplícito con solución a dos niveles cronológicos;
- la física, por ahora, es idéntica a la del ARPEGE (lo que beneficia al trabajo del ALADIN); (véase Geleyn y col., 1994);
- se utiliza la técnica DFI, la versión última y más eficiente que se ha sugerido dentro del marco del ALADIN (Lynch, Giard y Ivanovici, 1997);
- las aplicaciones CANARI y Full-Pos son idénti-

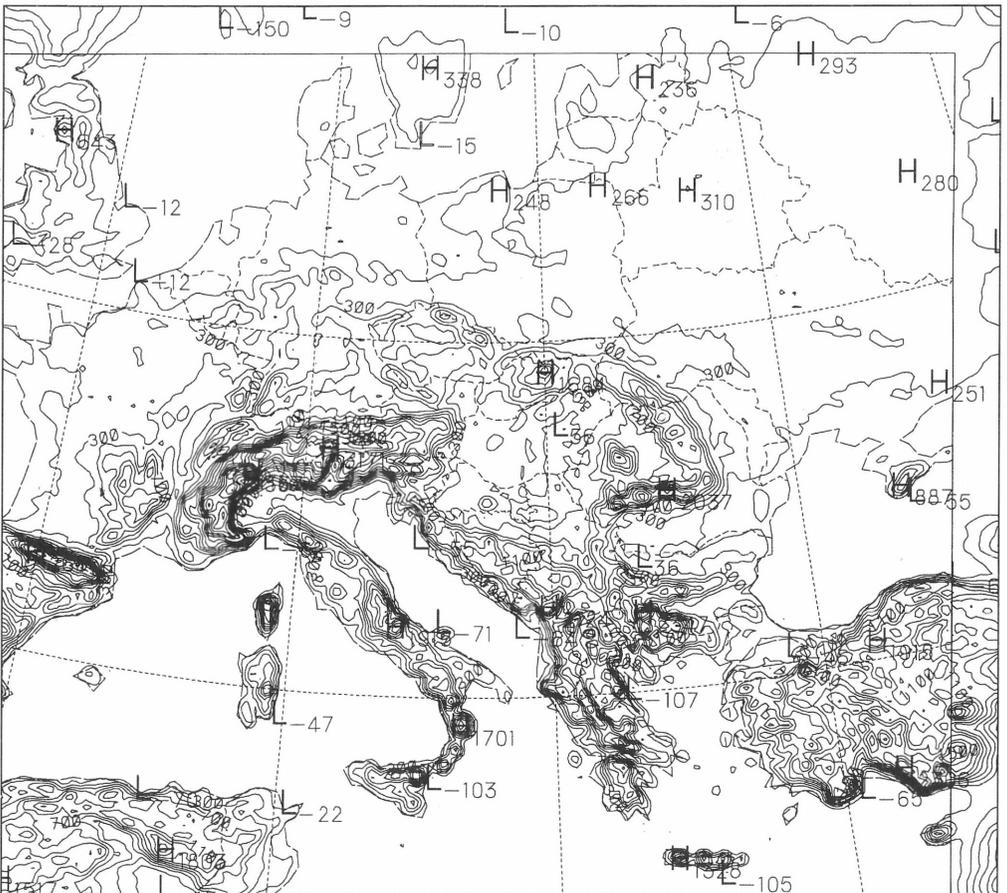


Figura 3 — Orografía "extendida" del dominio del RC-LACE; la amplitud de la zona para la biperiodización del campo se encuentra a la derecha y en la parte superior de la figura.

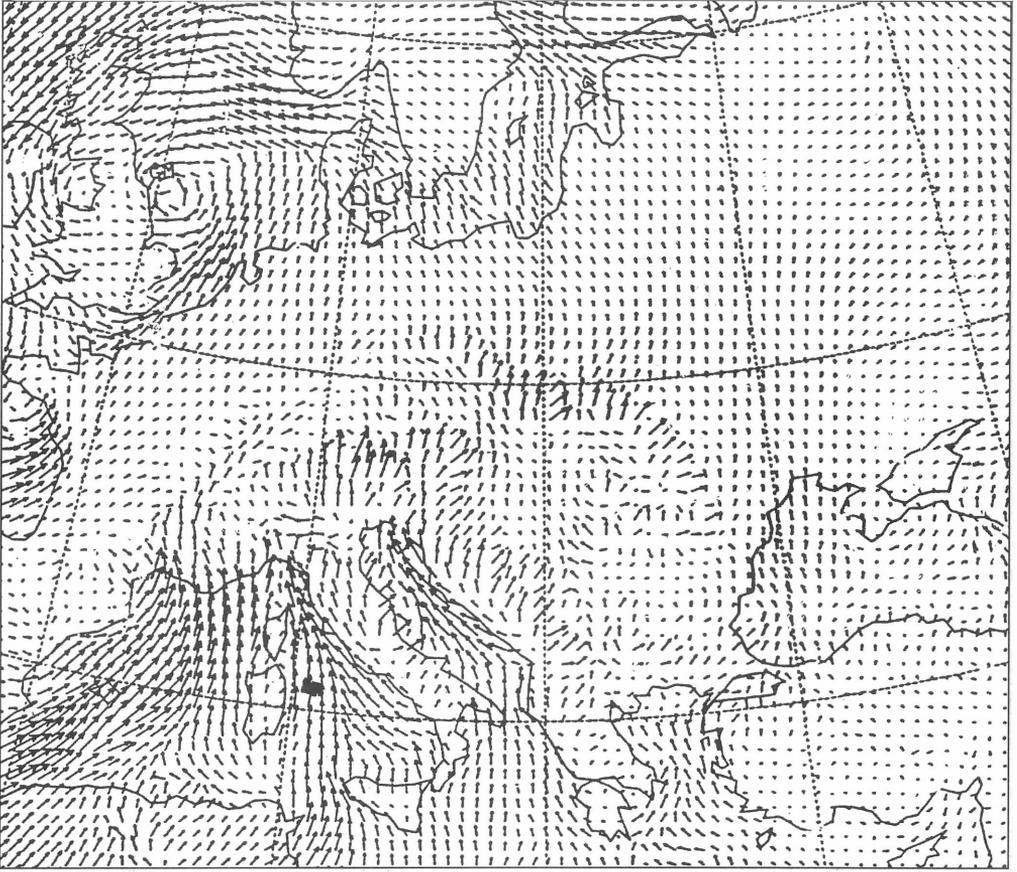


Figura 4 — Predicción para dieciocho horas del viento a 10 m, del 6 de enero de 1996 a las 00Z; obsérvense los tres vórtices a mesoescala alrededor de Bretaña y Gran Bretaña, el efecto de canalización del Adriático y los marcados efectos de distintas barreras montañosas

cas a las del ARPEGE, con pasadas específicas vinculadas a la geometría MAL.

Los puntos específicos para el ALADIN comprenden:

- la biperiodización se lleva a cabo sólo en los archivos interpolados a partir del modelo de acoplamiento (es decir, tan aleatorio como sea posible) y de este modo puede realizarse con una combinación iterativa muy sofisticada de empalmes y filtros;
- la forma de la función de acoplamiento (es decir, el peso relativo adoptado en cada pasada por la solución de mayor escala cerca de los límites del MAL) que se ha optimizado todo lo posible en el contexto espectral;
- la ejecución del esquema semilagrangiano en los casos de trayectorias que nacen en la “zona de ampliación” que requirió un tratamiento ori-

ginal de la relación entre la pasada temporal semiimplícita y el acoplamiento (Radnoti, 1995) — así como una adaptación específica de la idea de Rochas sobre los términos de Coriolis en el algoritmo para dos niveles cronológicos;

- la existencia de una opción no hidrostática, basada en coordenadas verticales de “presión hidrostática” tipo de Laprise, lo que requiere a su vez una redefinición de los operadores “Simmons-Burridge” de discretización vertical (Bubnova y col., 1995).

Finalmente, en torno al propio proyecto:

- se ha llevado a cabo un estudio especial (Caian y Geleyn, 1997) para evaluar los méritos respectivos de la solución expandida del ARPEGE y de la solución acoplada representada por el ALADIN; la conclusión ha sido que una ampliación moderada de la parte global y la adaptación

local a través de la solución MAL es la mejor combinación, dadas las actuales restricciones de cálculo;

- se ha utilizado el ALADIN como herramienta para los estudios adjuntos de sensibilidad en los problemas frontogenéticos (Horanyi y Joly, 1996);
- en la actualidad se está desarrollando un conjunto simplificado de la física y su versión adjunta para la futura asimilación variacional 4D de datos a mesoescala (Janiskova, Thépaut y Geleyn, 1996);
- otros importantes temas científicos, pasados y actuales, son: el comportamiento de la física del modelo en el límite de validez de la hipótesis hidrostática, y más allá; las condiciones para el éxito de un proceso de adaptación dinámica; y las propiedades intrínsecas del esquema de pasada temporal semilagrangiana.

Algunos datos técnicos del proyecto

Esta parte será breve pero importante. Los datos ofrecidos son los relativos a la velocidad de cálculo y a las necesidades de telecomunicaciones para el acoplamiento. Con la versión de dos niveles cronológicos del esquema semilagrangiano semiimplícito, la razón de colocación del punto de rejilla para el tamaño de la malla respecto a la pasada temporal es de 26 m s^{-1} , una cantidad favorable en comparación con otros modelos operativos de PNT. El número de instrucciones individuales por punto de rejilla, nivel y pasada temporal puede estimarse en 7 700 para un funcionamiento normal (incluyendo acoplamiento, DFI y posproceso). En los ficheros de acoplamiento la cantidad a mencionar es de 1,8 octetos por punto de rejilla, nivel y fichero de acoplamiento, bajo similares condiciones normalizadas y suponiendo una razón de dos entre los tamaños de las mallas del modelo de acoplamiento y las del modelo acoplado. Estos tres números permiten una estimación de la potencia de cálculo y de la amplitud de banda de las telecomunicaciones necesarias para cualquier aplicación determinada.

Referencias

- BUBNOVA, R., G. HELLO, P. BÉNARD, and J.-F. GELEYN, 1995: Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the ARPEGE/Aladin NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 515-535.
- CAIAN, M. and J.-F. GELEYN, 1997: Some limits to the variable mesh solution and comparison with the nested LAM one. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **123**, 743-766.
- GELEYN, J.-F., E. BAZILE, P. BOUGEAULT, M. DÉQUÉ, V. IVANOVICI, A. JOLY, L. LABBÉ, J.-P. PIÉDELIEVRE, J.-M. PIRIOU and J.-F. ROYER, 1994: Atmospheric parameterization schemes in Météo-France's ARPEGE NWP model. *Proceedings of the 1994 ECMWF Seminar*, Reading, United Kingdom, 5-9 September 1994, 385-402.
- HORANYI, A. and A. JOLY, 1996: Some aspects of the sensitivity of idealized frontal waves. *Beitr. Phys. Atm.*, **69**, 517-533.
- JANISKOVA, M., J.-N. THÉPAUT and J.-F. GELEYN, 1996: Inclusion of physical processes in 4D variational assimilation. *Proceedings of the AMS Conference on NWP*, Norfolk, Virginia, 19-23 August 1996, 283-284.
- LYNCH, P., D. GIARD and V. IVANOVICI, 1997: Improving the efficiency of digital filtering scheme. To appear in *Mon. Wea. Rev.*
- MACHENHAUER, B. and J.-E. HAUGEN, 1987: Test of a spectral limited area shallow water model with time-dependent lateral boundary conditions and combined normal mode/semi-Lagrangian time integration schemes. *ECMWF Workshop Proceedings*, Reading, 2-4 November 1987, 361-371.
- RADNOTI, G., 1995: Comments on "A spectral limited-area formulation with time-dependent boundary conditions applied to the shallow water equations". *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3122-3123.

