

Arome, avenir de la prévision régionale

François Bouttier

Météo-France - Centre national de recherches météorologiques (CNRM)
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex
francois.bouttier@meteo.fr

Résumé

Le système de prévision Arome regroupe les meilleurs composants des modèles Méso-NH Aladin, et de l'assimilation de données IFS/Arpège. Son premier objectif est la prévision numérique, dès 2008, des phénomènes de convection intense sur la France métropolitaine. Sa haute résolution spatiale, de l'ordre du kilomètre, lui permettra de modéliser de nombreux phénomènes importants jusqu'alors inaccessibles à la prévision numérique, grâce à une description détaillée des lois physiques en jeu, et une utilisation intensive des réseaux d'observation à l'échelle régionale. Sa conception originale l'ouvre à une large communauté de chercheurs.

Abstract

The forthcoming Arome regional forecasting system

The Arome forecasting system is a blend of the best components from the Méso-NH model, the Aladin model, and the IFS/Arpège data assimilation software. Its focus is on the numerical prediction of intense convective systems over mainland France by 2008. Other important weather phenomena will also begin to be reliably forecast, thanks to a high (kilometric) spatial resolution and the use of regional observing systems. The Arome software is designed to be accessible to a wide research community.

La technique de la prévision numérique du temps est à la base de la météorologie moderne. Elle a longtemps reposé sur des logiciels de modèles globaux – donc les grilles de calcul sont à relativement faible résolution numérique – et sur une représentation très simple des phénomènes physiques, à cause du coût informatique du logiciel de prévision. À Météo-France, ce fut le cas du modèle **Arpège**, dont le rejeton **Aladin**, modèle régional, est quasi identique, mis à part sa géométrie horizontale, qui permet de couvrir la France métropolitaine avec une grille de maille horizontale de 10 km, meilleure que les 25 km d'Arpège (dans le système de prévision de début 2007). Aladin utilise les grandes échelles de l'atmosphère prévues par Arpège pour alimenter ses conditions aux limites latérales, l'idée étant que les phénomènes météorologiques locaux sont généralement déterminés par l'atmosphère à grande échelle : dépressions, courants-jets, dorsales, thalwegs.

Pourquoi un nouveau modèle ?

Dans cette vision « hiérarchique » de la prévision numérique du temps, le modèle global gouverne étroitement le modèle régional, aussi bien dans sa conception que dans son couplage, et l'on ne saurait utiliser l'un sans l'autre. Cette doctrine – supposée assurer un avantage décisif aux centres de prévision qui maîtrisent à la fois un modèle global et un modèle régional – a été mise à mal dans les années 1990 par la communauté des chercheurs en physique des nuages. Ils ont écrit d'excellents modèles régionaux, souvent gratuits (MM5, Rams, WRF), qui ont

été largement appliqués opérationnellement par de petits centres météorologiques, voire des universités ou des sociétés privées, sans l'aide d'un modèle global maison, à des résolutions kilométriques et avec de très bons résultats. Un autre événement a été le succès d'expériences d'initialisation locale de nuages convectifs (voir, par exemple, Sun et Crook, 2001 ; Ducrocq et al., 2000) qui ont prouvé que, souvent, c'est l'assimilation de données locales, et non le forçage atmosphérique de grande échelle, qui est déterminante pour faire une bonne prévision.

En France, ces deux aspects – résolution kilométrique et assimilation régionale – sont particulièrement cruciaux pour la prévision des inondations cévenoles et des orages violents. En 2000, il est devenu clair que ces phénomènes, très importants pour la société, ne seraient pas prévus correctement avant de nombreuses années par la stratégie en place d'amélioration continue d'Arpège et Aladin (stratégie lancée vers 1990, qui a notamment permis de grands progrès de la prévision des tempêtes hivernales). Météo-France a donc rompu avec ses pratiques traditionnelles en entreprenant un « saut » rapide vers un nouveau système, Arome, qui serait une synthèse entre le logiciel Arpège-Aladin et les progrès récents de la modélisation à échelle fine.

La construction d'Arome repose sur l'implication d'équipes de recherche (d'où son acronyme, formé de : Applications de la recherche à l'opérationnel à mésoéchelle) pour réaliser un troisième système de prévision opérationnel, en complément d'Arpège et d'Aladin, à partir de 2008. L'objectif de Météo-France est la complémentarité entre trois niveaux de modélisation : – Arpège, qui visera en 2008 les échelles supérieures à 20 km environ, et les

échances de prévision de 1 à 3 jours, en combinaison avec le modèle IFS du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) ;

– Aladin, qui traitera la prévision régionale à échelle d'environ 10 km, sur l'Europe de l'Ouest et d'autres régions du monde ;

– Arome, qui assurera la prévision locale, et celle des phénomènes dangereux, en priorité sur la métropole à des échances de 3 à 36 heures environ.

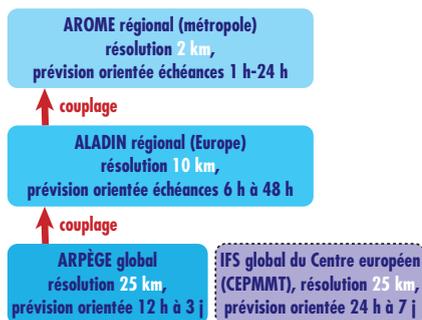


Figure 1 - Principaux systèmes opérationnels de prévision numérique (modèles et assimilations de données) qui seront utilisés à Météo-France à partir de 2008.

Chacun de ces modèles disposera d'une assimilation de données *ad hoc*. Cet éventail de systèmes numériques (figure 1) permettra la simulation de l'ensemble des phénomènes météorologiques significatifs, des tempêtes hivernales aux orages, sauf peut-être les événements de très petite échelle tels que les brouillards locaux et certaines anomalies urbaines ou montagnardes très locales.

L'intention d'Arome est bien de compléter IFS, Arpège et Aladin, et non de les remplacer. L'effort de développement de ces systèmes de prévision se poursuit, avec des progrès sensibles chaque année,

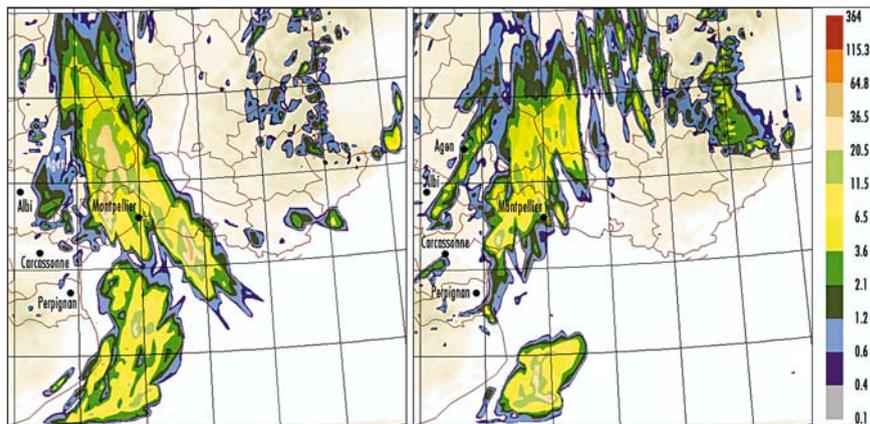


Figure 2 - Exemple d'impact de l'assimilation sur une prévision de pluie, lors d'un épisode de précipitations cévenoles, à courte échance (pluies cumulées entre les échances 3 h et 6 h) : à gauche, prévision Arome effectuée à partir d'une analyse à basse résolution (10 km) Aladin ; à droite, prévision Arome effectuée après 3 h d'assimilation 3D-Var dans Arome (résolution 2,5 km). Les zones vertes et beiges sont des zones de pluies intenses. Les différences sont surtout dues ici aux observations Radome de température et d'humidité en basses couches ; la prévision avec assimilation Arome est la meilleure.

ce qui est important pour les forçages de grande échelle qui alimenteront Arome : un modèle régional peut améliorer une bonne prévision de grande échelle, mais sera rarement capable d'en corriger une mauvaise. Parmi les travaux notables, on se souviendra que :

- Arpège sait depuis peu utiliser la plupart des satellites météorologiques modernes, et se prépare à utiliser *Metop* ;
- ses paramétrisations physiques comportent depuis peu des nuages et précipitations pronostiques ;
- son système d'assimilation 4D-Var est l'un des plus perfectionnés au monde. Aladin a été récemment doté de sa propre assimilation de données 3D-Var (Fischer et al., 2005 ; Fischer et al., 2006), avec la même physique qu'Arpège.

Le modèle Arome se situera à un degré supplémentaire de sophistication, dans sa résolution spatiale de calcul, et dans le niveau de détail des processus physiques représentés.

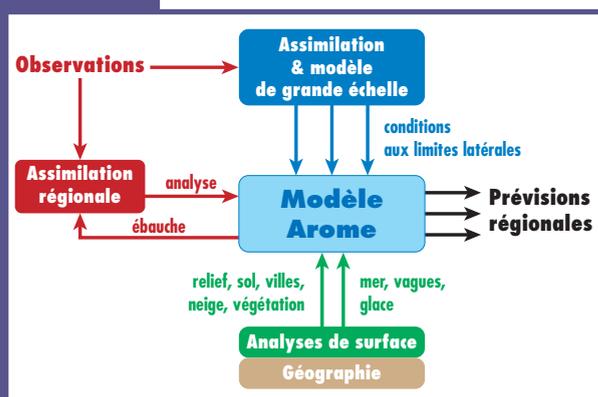
Un système de prévision utilise un modèle numérique de l'évolution de l'atmosphère, mais c'est aussi un système d'assimilation de données qui initialise les prévisions du modèle avec les observations les plus fraîches et précises possibles. Pour prévoir les **cévenols**, orages et brouillards, un bon forçage de grande échelle et un bon modèle ne suffisent pas : l'atmosphère possède une mémoire à l'échelle locale (figure 2) et il est essentiel, pour faire de bonnes prévisions, d'injecter dans le système les précurseurs des phénomènes, à l'aide d'une assimilation à échelle fine des paramètres déterminants (encadré ci-dessous). Dans Arome, il s'agit surtout du champ d'humidité et des structures de basses couches telles que les lignes de convergence. Pour cela, Arome assimilera de manière plus poussée qu'Aladin les données de radars (vents Doppler et réflectivités 3D), de satellites (radiances en air clair et nuages) et des réseaux nationaux (stations sol Radome surtout). Dans ce domaine, Météo-France est à la pointe mondiale, ce qui sera le principal atout d'Arome face aux modèles à maille fine étrangers.

Le couplage entre modèles

Comme l'atmosphère locale, un modèle régional répond à un ensemble de facteurs, qui doivent tous être soigneusement modélisés afin de produire de bonnes prévisions. Le schéma contre résume les principales sources d'informations nécessaires à la prévision d'Arome :

- le forçage latéral par la prévision numérique d'un modèle d'atmosphère à plus grande échelle (Arpège, Aladin ou IFS) ;
- le forçage en dessous par les conditions de surface, sur les continents et les océans, dont les paramètres évolutifs (neige, banquise, végétation, humidité du sol...) doivent être convenablement initialisés ;
- l'état initial de l'atmosphère du modèle Arome, à produire grâce à une assimilation de données, elle-même couplée à une assimilation à grande échelle.

En option, le modèle peut être interactivement couplé à l'évolution de modèles d'océan superficiel, de poussières, chimie et/ou aérosols, en plus de ses paramétrisations physiques internes (rayonnement, turbulence, flux de surface, microphysique nuageuse, convection sous-maille).



Les ingrédients d'Arome

Le projet Arome a été conçu pour des objectifs précis : améliorer la prévision des phénomènes convectifs dangereux (orages, crues soudaines, rafales, précipitations intenses), des événements locaux et de la météorologie de basses couches (vent, température, état du sol, turbulence, visibilité...). Le socle de ce développement est le logiciel Arome, un tout nouveau modèle, avec son assimilation de données (Ducrocq et al., 2005).

La nouveauté du modèle est avant tout la finesse horizontale des calculs (grille de calcul de 2 à 3 km de maille horizontale, dans la version d'Arome de 2008), une modélisation plus réaliste des nuages (hydrométéores pronostiques avec phase glace et neige roulée) et de la turbulence (énergie cinétique turbulente pronostique) ainsi qu'une description détaillée des surfaces (montagnes, villes, côtes, lacs, neige...). L'orographie, cadrée sur les Alpes, des modèles Arpège, Aladin et Arome est représentée sur la figure 3. L'apport de l'assimilation est l'utilisation des satellites, radars et réseaux météorologiques régionaux, avec un système similaire à Aladin (technique 3D-Var) mais une plus forte résolution spatiale, ce qui va améliorer surtout les prévisions à très courte échéance (moins de 12 heures).

Le calendrier d'Arome comporte une phase de test en temps réel à Météo-France depuis juin 2005, l'installation du système sur un puissant supercal-

culateur en 2007, et la production en temps réel d'analyses et de prévisions Arome à partir de 2008.

La généalogie du logiciel Arome est intéressante. Afin de mutualiser la recherche et le développement avec les communautés de prévision numérique et d'étude scientifique de l'atmosphère, tout en préservant nos nombreuses coopérations (nationale avec le CNRS, internationale dans Aladin, Hirlam et le CEPMMT, coopérations entre équipes du CNRM sur Arpège, Aladin, Arome et Méso-NH), Arome est un hybride entre les logiciels Aladin, qui apporte le noyau dynamique et l'assimilation (Bénard et al., 2005 ; Fischer et al., 2005), et Méso-NH, qui apporte les paramétrisations physiques, dont l'amélioration par les équipes de recherche se poursuit (Lafore et al., 1998). Malgré la lourdeur informatique de ce dispositif, Arome est un puissant « tuyau », alimenté par les meilleurs développements d'IFS, Arpège, Aladin, Méso-NH, et qui les met au service du public dans son utilisation opérationnelle. C'est une opportunité pour les chercheurs extérieurs aux équipes de prévision numérique d'utiliser un puissant logiciel de prévision et d'assimilation dans leurs expériences et de pouvoir valoriser leurs travaux directement dans un service opérationnel. Ces avantages n'ont pas échappé à nos partenaires européens et nord-africains des consortiums Aladin et Hirlam, dont beaucoup se préparent à utiliser eux-mêmes le logiciel Arome, moyennant quelques modifications (par exemple, le logiciel de modèle Alaro-0, qui est Arome avec des paramétrisations physiques différentes).

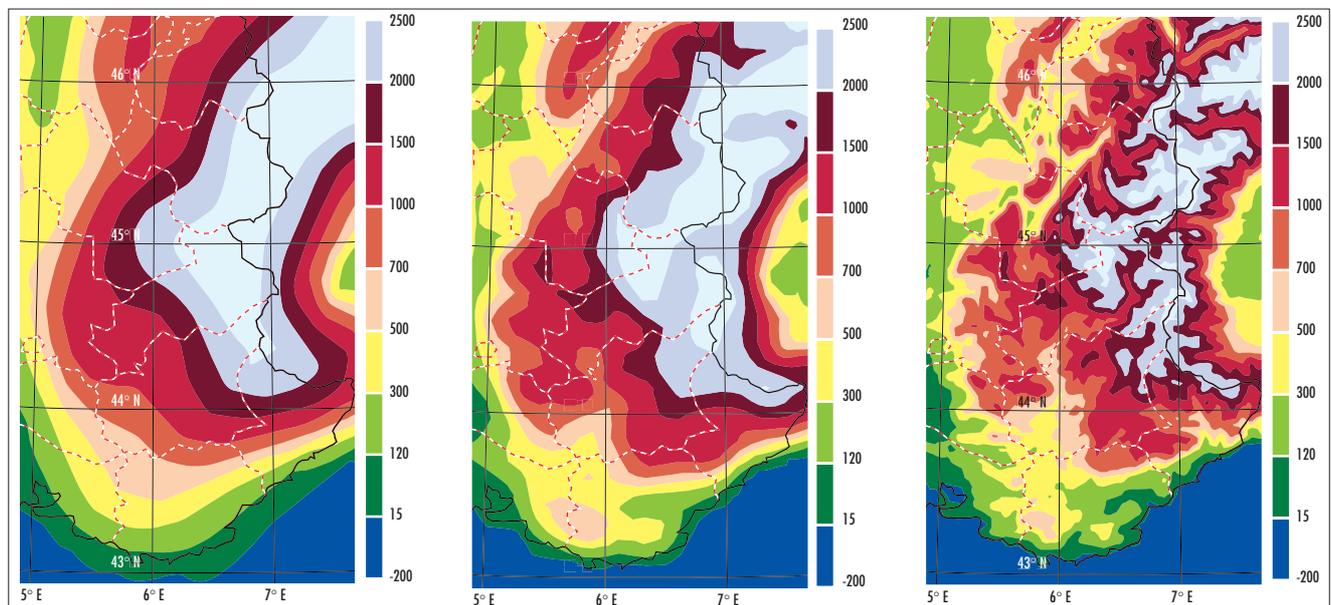
En aval, Arome est destiné à fournir en produits numériques les prévisionnistes de Météo-France pour la production supervisée, ainsi que les modèles applicatifs sensibles à la météorologie fine, tels que le modèle de brouillard Cobel (Bergot et al., 2005) qui bénéficiera de meilleurs forçages en provenance d'Arome comparés à ceux de l'Aladin actuellement utilisé.

Le module de physique de surface d'Arome est particulièrement remarquable : baptisé Surfex, il utilise une base de données géographiques à très haute résolution sur l'Europe (Champeaux et al., 2005) pour représenter une grande richesse cartographique : couvert végétal, sols, mers, lacs, glace et neige, villes. Les effets météorologiques peuvent être localement importants, par exemple sur l'îlot de chaleur urbain, les brises, l'arrachement de poussières désertiques. Surfex joue aussi un rôle dans le couplage d'Arome avec des modèles d'hydrologie et de chimie atmosphérique, ce qui permet, entre autres, de modéliser le cycle du dioxyde de carbone.

L'assimilation

L'assimilation de données est une technique d'utilisation des observations pour optimiser les états initiaux des prévisions. Les données observées sont injectées en temps réel dans le modèle pour le faire coller au mieux à la réalité. De petites erreurs initiales peuvent faire échouer une prévision si elles se trouvent dans des zones sensibles, ce qui justifie qu'environ

Figure 3 - Les orographies respectives, sur le domaine alpin, des modèles Arpège (à gauche), Aladin (au milieu) et Arome (à droite).



la moitié des prévisions ratées s'expliquent par de telles erreurs. On peut les améliorer en raffinant les techniques mathématiques d'assimilation et en développant les réseaux d'observation.

Plusieurs étapes

L'assimilation comporte plusieurs étapes : d'abord, il faut que les données utiles soient reçues à temps dans les bases de données du centre de prévision. C'est relativement aisé pour les observations terrestres, mais parfois problématique pour les satellites défilants, qui ne se trouvent pas toujours au-dessus de la zone d'intérêt du modèle ou à portée d'une antenne de réception. En raison du très grand nombre d'agences spatiales, de satellites météorologiques et de leur relativement courte durée de vie, il arrive que les flux de données en provenance de certains satellites ne soient pas utilisables dès leur lancement. Les nouveaux radars connaissent de semblables péripéties. *In fine*, seule une fraction des mesures effectuées peut servir à la prévision numérique.

La deuxième étape de l'assimilation est le tri des données, aussi appelé « contrôle de qualité ». L'utilisation de chaque

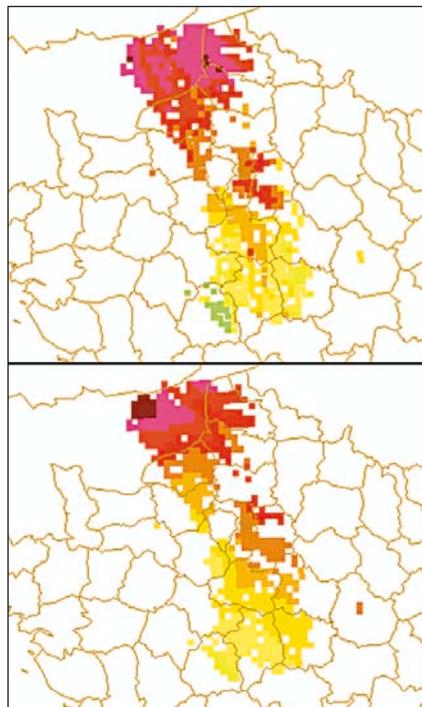


Figure 4 - Vent radial Doppler de basses couches observé par le radar de Trappes (en haut) et simulé par un modèle (en bas). Les couleurs représentent des valeurs différentes de la composante radiale du vent, par rapport à l'antenne radar (située en région parisienne). Les données sont interpolées à une même résolution spatiale (10 km). Les zones blanches sont non observées. Cette information ambiguë est difficile à visualiser, mais elle s'utilise facilement dans l'assimilation 3D-Var pour améliorer l'initialisation du vent dans les prévisions Arome.

mesure dans l'assimilation a un coût informatique, et présente le risque de dégrader la prévision si la donnée est entachée d'erreurs. Un logiciel de filtrage permet de ne garder que les données dont on est à peu près sûr qu'elles amélioreront la prévision, ce qui représente environ 10 % du total des données reçues⁽¹⁾.

La troisième étape est l'analyse, qui assure l'injection de l'information mesurée sur la grille du modèle. C'est un calcul de moyenne pondérée entre la prévision la plus récente du modèle et les corrections suggérées par les mesures, qui sont lissées dans l'espace afin de respecter les propriétés du fluide météorologique : quasi-équilibre hydrostatique et géostrophique, pompage d'Ekman, positivité et absence de supersaturation pour l'humidité, par exemple. Dans Arome, l'acquisition et le tri des observations sont similaires aux systèmes Arpège et Aladin, avec une sélection plus dense des données sur la France, puisque Arome y a une plus forte résolution. L'analyse est effectuée par une technique variationnelle, le 3D-Var, raffinée pour bien prendre en compte la distribution temporelle des observations. Dans Arome, chaque observation est utilisée pour corriger l'atmosphère dans un domaine d'environ 30 km de rayon et 2 000 m d'altitude.

Différentes classes d'observations

Parmi les classes d'observations les plus importantes pour Arome, on retiendra les mesures de systèmes précipitants (par radar et radiances satellitaires micro-ondes), d'humidité de basses couches (aujourd'hui par stations automatiques Radome et GPS, demain peut-être par lidar et radar), de vent en basses couches (stations Radome, radars Doppler et diffusiomètres satellitaires), de vent et température d'altitude (radiances satellitaires Cris et Iasi, profils de vent par avion, radiosondages et radars profileurs). L'effort consacré à l'utilisation de chaque type d'observation est fonction de la qualité de la mesure, de son informativité sur l'état de l'atmosphère, et de la qualité de la couverture du réseau : par exemple, un instrument, même excellent, qui n'a que peu de points de mesures sur la France est intéressant pour des études scientifiques, mais rarement utile pour la prévision du temps...

L'utilisation des radiances satellitaires et des observations conventionnelles *in situ*, malgré son importance, n'est pas fonda-

mentalement différente entre Arome et des systèmes à plus grande échelle tels qu'IFS, Arpège et Aladin. On notera surtout que la meilleure résolution spatiale d'Arome lui permet d'utiliser les observations à haute densité, en s'affranchissant partiellement des problèmes de représentativité dus aux perturbations locales des mesures, tels que les reliefs et les nuages. En revanche, l'utilisation des radars sera radicalement nouvelle. Il est particulièrement heureux que son développement coïncide avec la rénovation du

La « zone grise » de la convection

La taille des plus petits phénomènes décrits par un modèle numérique est d'environ deux fois la maille de la grille de calcul. Dans Arome, cette maille est de 2,5 km sur l'horizontale, et d'environ 300 m sur la verticale (17 m près du sol). La finesse de la maille est contrainte par la puissance du calculateur utilisé pour la prévision. Cette maille permet de calculer explicitement la structure des gros nuages convectifs tels que les cumulonimbus, gouvernés par des circulations d'air assez bien représentées sur la grille d'Arome. Ces circulations produisent des structures nuageuses tridimensionnelles importantes pour prévoir certains processus physiques (grêle, rafales, enclumes, limite pluie-neige, transport de nuage loin de sa zone de formation, cycle diurne...). Dans un modèle à plus faible résolution tel qu'Arpège ou Aladin, mais aussi dans Arome pour les petits nuages, les mailles de calcul sont trop lâches et l'on renonce à simuler les détails de ces nuages ; on en représente seulement l'effet net à l'échelle de la maille (production de pluie, de mélange turbulent, de couverture nuageuse partielle, de chaleur latente...), ce qui est un pis-aller pour la prévision des paramètres météorologiques affectés par les nuages. Cet effet net est calculé par des formules assez empiriques, nommées paramétrisations, qui les déduisent de caractéristiques de l'atmosphère à l'échelle de la maille (proximité de l'air à la saturation humide, instabilité thermique verticale, présence de conditions souvent associées à un type donné de nuage...).

(1) Les données rejetées sont en grande majorité des radiances satellitaires inutilisables car affectées par les nuages ou les surfaces d'une manière que l'on est encore incapable de modéliser. Il peut aussi s'agir de données localement trop denses (exemple : la plupart des mesures des avions au voisinage des aéroports) par rapport à la résolution numérique des modèles. Mais ces données restent précieuses, soit pour de futures versions du système de modélisation, soit pour d'autres applications comme la prévision immédiate.

réseau radar métropolitain (projet Panthere de Météo-France, incluant l'équipement de plusieurs radars en mesures de vent Doppler et réflectivités polarimétriques, avec balayage tridimensionnel de la troposphère). Les vents Doppler sont des mesures du vent restreintes à certaines directions, dans les basses couches et les nuages, à proximité des radars français (figure 4) ; leur intérêt pour la prévision réside surtout dans la description des lignes de convergence liées à la naissance et à l'évolution des grands nuages convectifs, ce qui est important pour la prévision des orages isolés et l'assistance aéronautique. Arpège et Aladin tiennent compte des systèmes convectifs essentiellement sous une forme implicite appelée **paramétrisation** de la convection sous-maille (encadré p. 15) : ces modèles décrivent l'effet net de la convection, plutôt que la circulation tridimensionnelle du vent, souvent complexe, associée aux cellules nuageuses. L'utilisation des vents radar Doppler dans Arome sera beaucoup plus efficace que dans ces anciens modèles. La synergie entre le modèle et les radars Doppler sera probablement l'apport le plus spectaculaire d'Arome pour la prévision numérique régionale, ainsi qu'à terme pour la prévision immédiate, à quelques heures d'échéance, jusqu'à présent assez dépendante de l'extrapolation des images des radars et satellites. Ces développements sont actuellement étudiés dans le cadre du projet européen Flysafe pour l'amélioration de la sécurité du trafic aérien.

Réflectivités radar et précipitations

L'autre défi de l'assimilation des radars est l'utilisation des réflectivités, qui renseignent sur la distribution et l'intensité des précipitations en altitude. Cette idée est particulièrement difficile à exploiter, car les précipitations sont

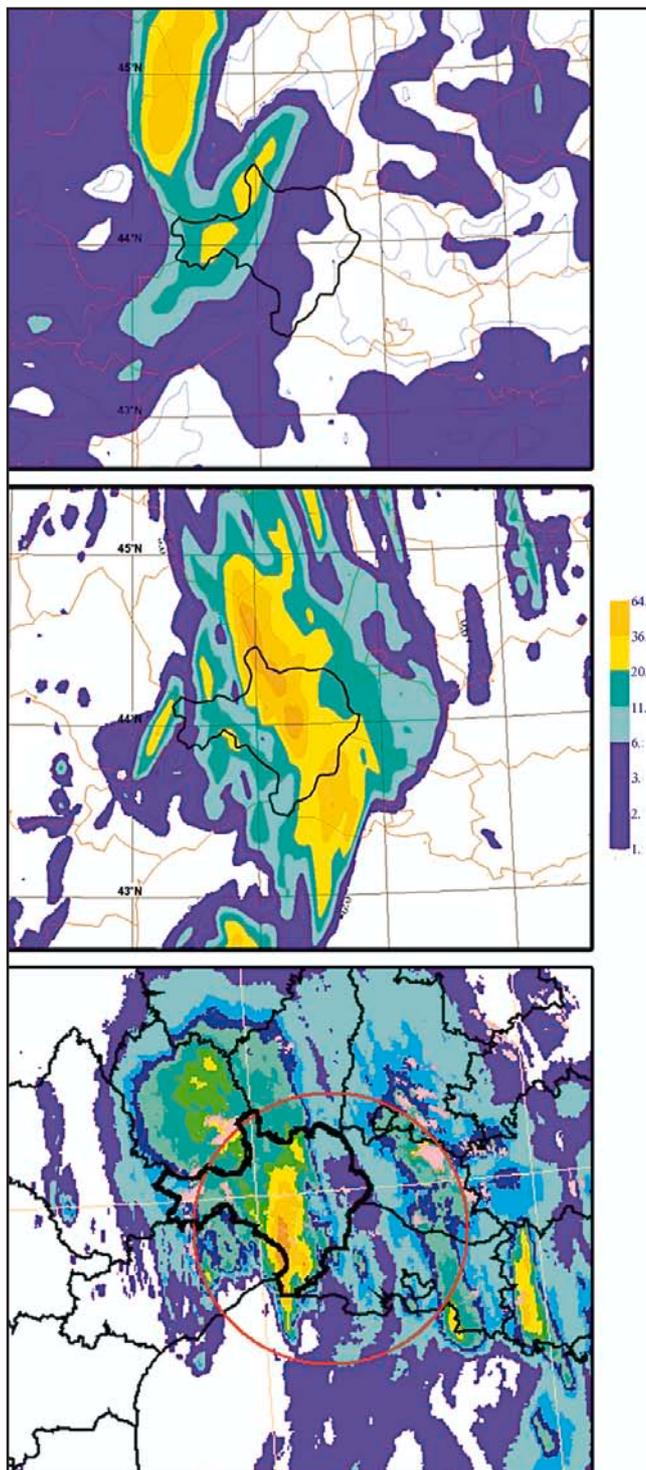


Figure 5 - Cumul sur trois heures de pluies lors de l'épisode d'inondations cévenoles du 6 septembre 2005. En haut : prévision d'Aladin ; au milieu : prévision d'Arome sans assimilation propre ; en bas : observation (radar corrigé par les pluviomètres) des pluies réellement tombées. La zone cruciale (pluies les plus intenses) est en jaune et orange. Le modèle Arome est plus performant qu'Aladin, bien que ce dernier lui fournisse ses conditions initiales et aux limites latérales.

linéaires, qui peuvent assurer un repositionnement assez simple des colonnes convectives dans les situations météorologiques favorables. Pour aller plus loin, un programme de recherche ambitieux est en gestation à Météo-France, fondé sur l'identification automatique de structures cohérentes dans l'atmosphère, et une prise en compte intelligente des processus humides dans l'assimilation de données.

Les plus grands défis pour l'avenir de l'assimilation vont être l'initialisation réaliste des précipitations, l'utilisation des observations de nuages et la prise en compte des variations spatio-temporelles des rayons d'influence des observations, par exemple au travers des inversions en sommet de couche limite (indispensables pour analyser le brouillard et les nuages bas), près des montagnes et des côtes. Cependant, la valeur des prévisions d'Arome ne proviendra pas seulement de son assimilation. Les assimilations à grande échelle (d'Arpège notamment) resteront prépondérantes pour la prévision de phénomènes dynamiques tels

l'effet, plutôt que la cause, de la mécanique nuageuse : l'assimilation des réflectivités devrait idéalement inventer des structures tridimensionnelles du vent, de la température et de l'humidité, à partir d'images de précipitations, ce qui est généralement hors de portée de toutes les techniques d'assimilation connues, pour diverses raisons (à commencer par la non-linéarité de la microphysique nuageuse à petite échelle, qui compromet à priori l'utilisation d'algorithmes classiques tels que le 4D-Var). L'effort du projet Arome porte actuellement sur des techniques d'assimilations bayésiennes, non-

que les tempêtes hivernales, qui viennent d'au-delà des frontières du domaine d'Arome. La modélisation des surfaces restera essentielle pour prévoir les phénomènes forcés par les basses couches : brises côtières, formation du brouillard, îlots de chaleur urbains, effets de la neige au sol et du gel. L'assimilation va donc se concentrer sur les précurseurs de phénomènes évolutifs à forte mémoire régionale : formation et propagation des systèmes convectifs avec leurs fronts de rafales, organisation en cellules et bandes des systèmes précipitants, évolution des inversions, des bancs de brouillards et des nuages bas.

Les premiers résultats

L'apport le plus attendu d'Arome est la capacité à bien prévoir les précipitations méditerranéennes intenses de type cévenol. Les premières évaluations menées en 2005 et 2006 ont naturellement porté sur les épisodes cévenols récents les plus médiatiques. Bien que le système soit encore incomplet (la synergie entre radars, assimilation et modèle à haute résolution n'a pas encore été testée), ces tests ont confirmé qu'Arome est nettement plus réaliste que ses prédécesseurs (IFS, Arpège et Aladin) lors des prévisions de précipitations cévenoles avec

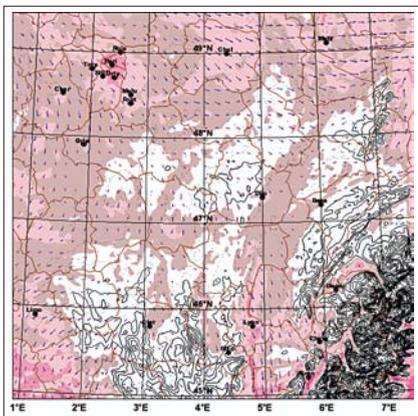


Figure 6 - Simulation par Arome des températures en basses couches (en couleurs, les zones de gel sont en blanc) et du vent (flèches bleues) sur le nord-est de la France, le 10 février 2006. Arome représente les îlots de chaleur urbains (rose foncé) de Paris, Lyon, Grenoble, Genève et la douceur relative du lac Léman, ainsi que les zones de gel du plateau de Langres et des massifs montagneux.

à vingt-quatre heures d'avance, et en particulier pour les précipitations les plus intenses, en distribution d'intensité, timing et localisation, qui sont les critères importants pour l'anticipation des risques d'inondations. L'apport

d'Arome (figure 5) est net, à la fois pour une utilisation directe des cartes de prévision et pour une interprétation subjective du risque de précipitations intenses : les autres modèles ne décrivent que des zones de risque, qui laissent au prévisionniste la lourde responsabilité de corriger leurs tendances à sur- ou sous-prévoir les cumuls de précipitations intenses, selon les cas. Arome fournit des structures précipitantes d'intensité plus proche de la réalité, l'erreur résiduelle à corriger par le prévisionniste résidant dès lors surtout dans la localisation fine de l'événement.

On ne peut pas généraliser ces conclusions à tous les épisodes cévenols, dont les mécanismes sont variables : certains sont faciles à prévoir par tous les modèles ; d'autres sont entièrement déterminés par le forçage orographique local, et ne nécessitent pas d'effort particulier sur l'assimilation ; certains ne produisent pas de précipitations importantes, malgré un contexte météorologique d'un alarmisme trompeur ; d'autres enfin, produisent des averses spectaculaires et inopinées qui échappent encore à tous les efforts de modélisation, malgré les travaux des chercheurs pour en comprendre les causes.

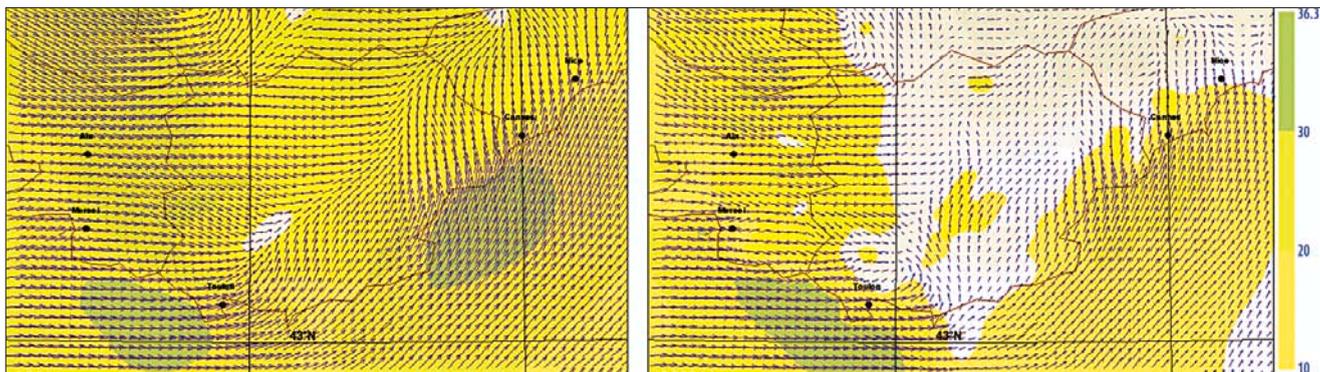
Les tests aujourd'hui disponibles ont pour la plupart été obtenus par couplage direct d'Arome à Aladin, sans assimilation à haute résolution. Les premières expériences d'assimilation d'épisodes cévenols dans Arome montrent une amélioration supplémentaire des prévisions à l'échelle régionale. L'utilisation future des radars et satellites sur la Méditerranée occidentale permettra probablement de gagner encore en prévisibilité à échelle fine et à très courte échéance.

Les systèmes numériques sont de nos jours les « bonnes à tout faire » de la

prévision météorologique : outre les tests d'épisodes cévenols, il restait à évaluer les prévisions d'Arome dans une large gamme de conditions atmosphériques, et avec plusieurs critères de notation. Depuis l'été 2005, deux prévisions Arome par jour ont été effectuées à Météo-France, sur des régions variées, et comparées à Aladin. La haute résolution spatiale du modèle améliore de façon spectaculaire le détail géographique des prévisions de basses couches, comme illustré sur les figures. On y découvre les effets météorologiques des villes, des côtes, des grandes vallées : îlots de chaleur urbains (figure 6) sur les grandes métropoles, cycle diurne des brises côtières et brises de vallées, vents orographiques locaux, effets d'abri au voisinage des massifs montagneux (figure 7), bancs de brouillards dans les cuvettes, zones de gel (figure 6). Dans certaines situations, Arome fabrique des structures atmosphériques jusqu'alors inaccessibles aux modèles opérationnels, tels que des fronts de rafales orageuses (figure 8), des enclumes de cumulonimbus, des nuages à étages multiples, les zones turbulentes du vent d'autan et du mistral (figure 7), des giboulées (figure 9), des rues de cumulus.

Bien que ces structures ne soient pas toujours produites à bon escient, la comparaison aux observations prouve qu'il s'agit d'améliorations dans la plupart des cas. Les équipes de recherche corrigent actuellement les faiblesses identifiées du modèle : la priorité porte sur les nuages stratiformes et les faibles précipitations. Aujourd'hui, les points forts avérés les plus spectaculaires d'Arome sont les précipitations convectives méditerranéennes intenses et les structures précipitantes forcées par l'orographie (figure 10), parfois très loin en aval des montagnes. Gageons qu'il y en aura bien d'autres

Figure 7 - Simulation par Aladin (à gauche) et Arome (à droite) du vent de basses couches sur le Var, lors d'un cas de mistral. Les couleurs représentent la force du vent, les zones blanches sont des zones de calme relatif. Arome représente plus nettement qu'Aladin le domaine d'influence du mistral, les effets d'abri et de rotation au voisinage des reliefs, le gradient du vent sur les côtes.



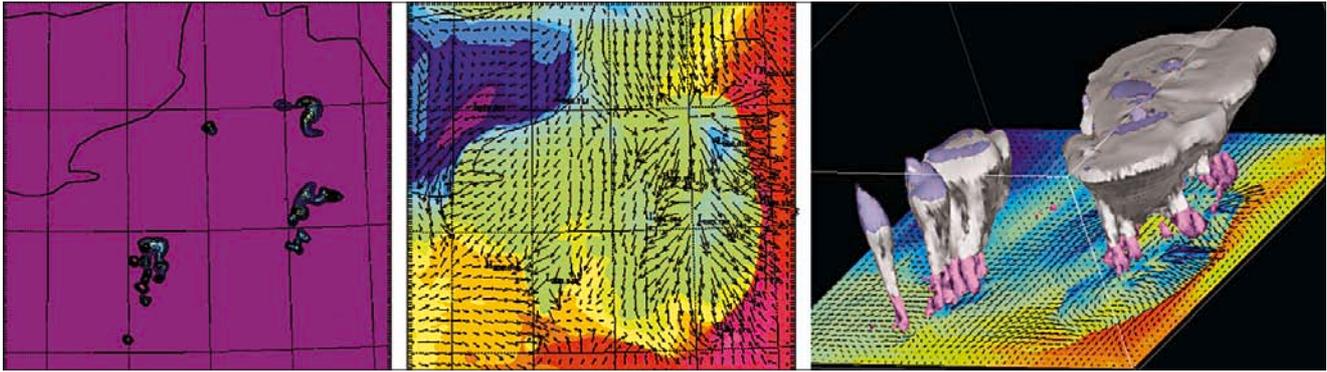


Figure 8 - Simulation par Arome d'un groupe d'orages sur la région parisienne, le 4 août 1994 à 18 heures. À gauche : noyaux de pluies au sol ; au milieu : température potentielle (zones de couleur, l'air frais est en bleu et vert, l'air chaud est en rouge et violet) et vecteur vent de basses couches (flèches noires) ; à droite : visualisation en perspective du volume de nuage associé (gris : eau nuageuse ; bleu : glace nuageuse ; violet : pluies). On observe l'intrusion d'air frais en provenance de la Manche, le refroidissement sous l'orage, les fronts de rafales divergentes associées aux écoulements de densité, la forme caractéristique en tours et enclumes des cumulonimbus.

au fur et à mesure de la montée en puissance de l'assimilation Arome et des outils de vérification objective des prévisions à échelle fine.

Quel apport pour l'usager ?

On a évoqué l'apport d'Arome pour l'anticipation des événements convectifs dangereux de type cévenol. L'expérimentation sur les autres types de phénomènes justifiant une vigilance particulière est moins avancée, mais les premiers résultats sont prometteurs. La haute résolution du modèle garantit une meilleure pertinence et une finesse accrue pour les prévisions locales des tempêtes, des chutes de neiges, du gel, des canicules, des forts vents. Les premières évaluations des prévisions de températures de basses couches (figure 11) et de vent suggèrent qu'Arome améliorera sensiblement, dans les cas extrêmes, mais aussi en moyenne, les produits en aval : qualité de l'air, aéronautique, état des routes, dispersion des polluants, hydrologie, océanographie et météorologie côtière ou en montagne, pour ne citer que quelques applications.

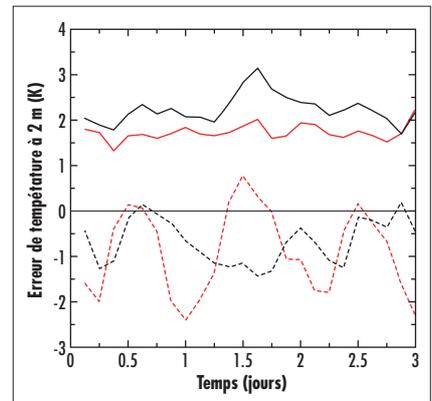


Figure 11 - Comparaison objective des prévisions de températures d'Arome (en rouge) et d'Aladin opérationnel (en noir), sur trois jours d'août 2006, dans le sud-ouest de la France. Les prévisions sont lancées chaque jour à minuit et évaluées lors des vingt-quatre premières heures. Les lignes continues sont les erreurs quadratiques de prévision, les lignes pointillées sont les erreurs moyennées sur l'ensemble du réseau d'observation Radome. Ce graphique montre que, malgré de fortes erreurs moyennes (liées à un défaut de jeunesse d'Arome en cours de correction), le modèle Arome est déjà, dans la version préliminaire évaluée, meilleur qu'Aladin.

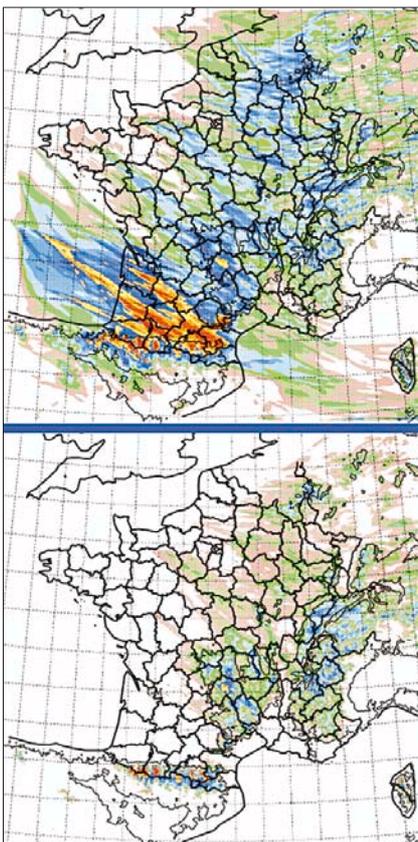


Figure 9 - Pluies (en haut) et neige (en bas) cumulées sur 24 heures lors de l'un des premiers tests d'Arome sur la métropole entière, le 10 mars 2006, jour de tempête hivernale. Les zones rouges indiquent les plus fortes précipitations. On observe de fortes accumulations sur le relief des Pyrénées et en amont (phénomène de blocage orographique). L'aspect strié des champs est dû aux giboulées.

Comme son grand frère Aladin, Arome sera un système déplaçable. À l'exception de l'assimilation des observations spécifiques à la France métropolitaine, l'ensemble du système peut être facilement cloné sur une région quelconque du globe, par couplage avec Arpège et Aladin et au besoin avec l'aide du modèle IFS pour les régions les plus lointaines. Ces applications dis-

tantes ne seront limitées que par la puissance de calcul allouée. D'ores et déjà, des tests intéressants ont été effectués par Météo-France sur l'Afrique du Nord, l'Afrique équatoriale et la Turquie, ainsi qu'en Europe centrale et en Scandinavie chez nos partenaires étrangers des consortiums Aladin et Hirlam. Ces

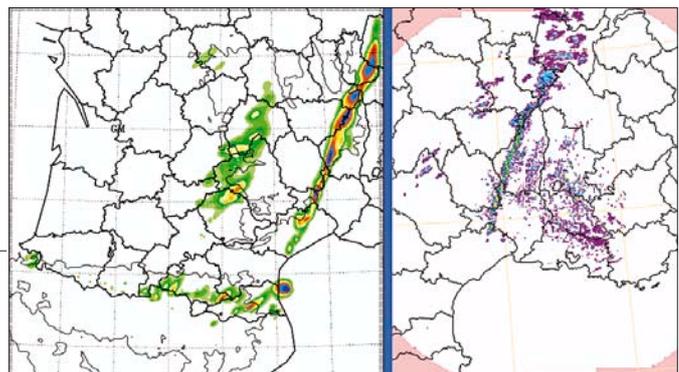


Figure 10 - Exemple de structure précipitante forcée par l'orographie. Il s'agit d'une bande de pluie liée à une zone de convergence en aval des Pyrénées, dans un flux de sud-ouest, qui s'étire jusqu'à Lyon. À gauche : pluies simulées par Arome ; à droite : pluies observées par radar. (À noter : les palettes de couleur sont différentes).

mêmes partenaires nous aideront à optimiser Arome pour une grande variété de climats : arctiques, nordiques, continentaux, méditerranéens secs, Moyen-Orient, Sahara. Un effort particulier sera investi pour une utilisation future dans les départements et territoires d'outre-mer.

La prévision du brouillard est un enjeu institutionnel crucial pour Météo-France. Elle échappe presque totalement aux modèles numériques actuels. L'étude d'une dizaine de cas propices au brouillard en hiver 2005-2006 (figure 12) a montré qu'Arome y apporte déjà une nette valeur ajoutée, que l'on continue à optimiser en améliorant son initialisation, sa modélisation et le couplage au modèle local de brouillard Cobel. Durant l'hiver 2006-2007, Arome a été associé à la campagne de mesures expérimentales Parisfog, qui se consacre à la compréhension et à la prévision du brouillard en région parisienne. Les capacités d'Arome à modéliser les forçages tridimensionnels des couches limites, les reliefs locaux, les lacs et à analyser finement l'humidité de basses couches, ouvre des perspectives excitantes pour l'amélioration de la formation et de la dissipation des brouillards ces prochaines années.

Arome, outil de recherche atmosphérique

La structure institutionnelle et logicielle d'Arome est tout à fait novatrice, car un trait fondateur du projet est son ouverture vers le monde de la recherche. Cela le distingue fondamentalement du système Aladin, ainsi que des modèles concurrents étrangers, généralement marqués par une mainmise sur le logiciel de la part de services opérationnels ou d'équipes de recherche. Arome parie qu'il y a plus à gagner qu'à perdre en utilisant un groupe hybride de développeurs, fondé sur la communauté de pré-

vision numérique, mais aussi sur des équipes de recherche parmi les plus compétentes pour maintenir au meilleur niveau certains composants pointus du système. En effet, avec la sophistication croissante des processus et observations requis en modélisation météorologique (surfaces continentales, océans, aérosols, microphysique nuageuse, radars, hydrologie...), il devient impossible aux équipes de prévision numérique de répondre seules à tous les besoins. Impliquer des chercheurs spécialisés, c'est accroître la qualité et la quantité de matière grise mobilisable. Cela implique bien sûr une organisation délicate du travail. En pratique, c'est le modèle Mésos-NH, mieux adapté aux méthodes des laboratoires, qui est utilisé de préférence pour les expériences à très haute résolution nécessaires à l'amélioration d'Arome. Les modifications des composants physiques de Mésos-NH sont régulièrement importées dans Arome. Inversement, certaines techniques d'optimisation des calculs, cruciales pour la prévision numérique en temps réel, sont développées en parallèle dans Mésos-NH et le système IFS/Arpège/Aladin/Arome afin d'assurer l'efficacité opérationnelle de ce dernier.

Le couple Mésos-NH/Arome est donc un moyen commode pour les chercheurs de valoriser rapidement leurs développements en modélisation, dans un système de prévision météorologique opérationnel. C'est aussi un outil qui intéresse la recherche amont, pour deux raisons. D'une part, l'organisation particulière des calculs dans Arome permet d'effectuer des prévisions avec un coût numérique de 5 à 50 fois inférieur à celui de Mésos-NH et autres modèles analogues. Bien qu'Arome n'offre pas toute la liberté et la flexibilité d'un logiciel de recherche, il permet d'effectuer des expériences qui seraient impossibles autrement, car elles seraient trop coûteuses. Il s'agit des expériences qui impliquent un grand nombre de simulations (par opposition à des études de cas) ou la manipulation d'un grand nombre d'espèces chimiques et d'aéro-

sols ; pour cette dernière application, une version recherche avec chimie atmosphérique a été créée. Arome deviendra encore plus utile pour la recherche lorsqu'il sera capable de simulations avec une grille horizontale plus fine que le kilomètre, ce qui est un développement actuellement à l'étude.

L'autre aspect important pour la recherche, est la capacité d'Arome à assimiler des données à haute résolution, avec de très bonnes capacités puisqu'il repose sur le logiciel IFS très réputé en la matière, notamment pour son utilisation des données satellitaires. De tels logiciels d'assimilation sont souvent difficiles d'accès pour des laboratoires de recherche, en raison de leur complexité et de leur dépendance à une base de données d'observations opérationnelles.

Pour résoudre cette difficulté, Arome a été intégré dans un système de configuration d'expériences développé à Météo-France, appelé Olive. Dans son utilisation la plus classique, Olive permet de recalculer, en temps différé, une prévision ou une période d'assimilation opérationnelle, en modifiant certains paramètres (le nombre d'observations assimilées, les réglages du modèle, le logiciel lui-même...). La comparaison automatique à l'archive des observations et prévisions opérationnelles permet de vérifier facilement si les modifications testées dans cette « expérience numérique » auraient été bénéfiques ou non au système de production opérationnel. On peut même reproduire l'expérience d'un collègue, en y changeant ensuite les paramètres que l'on veut. Pour un chercheur, c'est un moyen commode d'étudier le comportement concret du système opérationnel et d'effectuer des études plus théoriques, par exemple sur les techniques d'assimilation.

Olive sera aussi un formidable outil de valorisation des campagnes de mesure, dans lesquelles de nombreuses observations expérimentales sont effectuées, mais rarement assimilées par les centres météorologiques opérationnels. Olive permet aux laboratoires d'insérer leurs propres observations, standard ou expérimentales (telles que les nouveaux instruments GPS, radar et lidar), d'étudier la valeur de ces observations et de

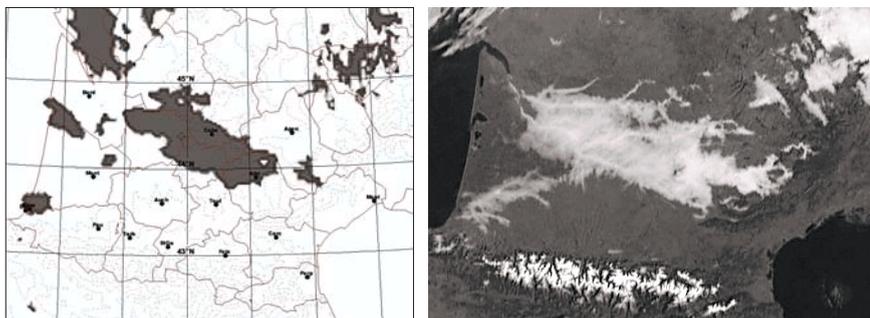


Figure 12 - Exemple de prévision de brouillard par Arome (à gauche, le brouillard prévu est représenté en gris) et observation correspondante (à droite, image visible *Météosat*, les zones en gris clair sont des brouillards), sur le sud-ouest de la France, le 11 novembre 2005.

produire des réanalyses de référence des campagnes de mesure. Bien menées, ces réanalyses sont meilleures que les analyses opérationnelles et sont idéales pour étudier les phénomènes visés par ces campagnes, grâce à la spatialisation des observations qu'apporte l'assimilation de données. Olive permet actuellement d'effectuer des prévisions et assimilations Arome (ainsi qu'Aladin et Arpège), via Internet, au centre de calcul de Météo-France, en utilisant au besoin le supercalculateur du CEPMMT. Le portage sur d'autres calculateurs, par exemple des PC ou des clusters, est en cours.

L'utilisation d'Arome dans une optique scientifique est bien installée à Météo-France, où les équipes de recherche contribuent depuis plus de dix ans aux systèmes Méso-NH et Arpège/Aladin, ce dont Arome profite directement. Elle s'est étendue récemment à des scientifiques européens et nord-africains des consortiums Aladin et Hirlam. Le modèle Arome a été déployé en temps quasi réel, à titre de démonstration, sur les campagnes de mesure Amma (Mousson africaine, été 2006) et Parisfog (brouillard en Île-de-France, hiver 2006-2007). Il a aussi été utilisé sur d'anciennes situations de la campagne MAP (Mesoscale Alpine Expe-

riment, 1999). Durant l'été 2007, le système Arome complet avec assimilation de données sera appliqué aux campagnes internationales Cops (Convective and Orographic Precipitation Study) et MAP D-phase, tournées vers la prévision des pluies convectives et l'hydrologie en Europe, sujets au cœur du projet Arome. Ces campagnes incluront l'étude de nouveaux instruments de mesure : GPS et lidars.

Perspectives

Conformément à ses engagements institutionnels, Météo-France déploiera Arome pour la prévision en temps réel sur l'ensemble de la métropole en 2008. Ce système viendra en complément d'Arpège et d'Aladin, il sera utilisé par les prévisionnistes et pour l'élaboration de produits finalisés. L'année 2007 sera donc la phase d'intégration finale et d'évaluation exhaustive de la qualité du système. Arome ne s'arrêtera pas là pour autant : comme tout système de prévision numérique, il est destiné à s'améliorer, à se diversifier vers de nouvelles applications et à échanger des composants logiciels avec les autres

centres de prévision numérique. Parmi les évolutions probables, on notera :

- l'application à la prévision immédiate par un rafraîchissement fréquent du modèle ;
- l'application à la climatologie par des réanalyses ;
- la conception d'un système de prévision probabiliste à haute résolution ;
- l'utilisation croissante du modèle à l'extérieur de la métropole ;
- son évolution vers la modélisation locale à très haute résolution, sur des sites d'intérêts, industriels, aéroportuaires et sur les grandes agglomérations, au service d'une modélisation intégrée de l'environnement.

Remerciements

Le projet Arome est le fruit du travail de dizaines d'agents, d'instituts et de pays variés. On remerciera particulièrement l'ensemble des équipes CNRM/GMAP et CNRM/GMME, le Laboratoire d'aérodynamique du CNRS, les équipes de prévision numérique des instituts partenaires Aladin et du CEPMMT, ainsi que les agents et l'encadrement de Météo-France impliqués dans la rédaction des contrats d'objectifs entre 2000 et 2008, qui donnèrent les impulsions fondatrices de ce projet.

Bibliographie

- **Bénard P., J. Masek et J. Vivoda**, 2005 : Stability of Leap-Frog Constant-Coefficients Semi-Implicit Schemes for the Fully Elastic System of Euler Equations. Case with Orography. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 1065-1075.
- **Bergot T., D. Carrer, J. Noilhan et P. Bougeault**, 2005 : Improved site-specific numerical of fog and low clouds: a feasibility study. *Weather and Forecasting*, 20, 627-646.
- **Champeaux J.-L., V. Masson et R. Chauvin**, 2005 : Ecoclimap: a global database of land surface parameters at 1 km resolution. *Meteorological Applications*, 12, 29-32.
- **Ducrocq V., J.-P. Lafore, J.-L. Redelsperger et F. Orain**, 2000 : Initialisation of a fine scale model for convective system prediction: a case study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 3041-3066.
- **Ducrocq V., F. Bouttier, S. Malardel, T. Montmerle et Y. Seity**, 2005 : Le projet Arome, crues méditerranéennes : les réponses scientifiques et techniques de l'État. *La Houille Blanche*, 2, 39-44.
- **Fischer C., T. Montmerle, L. Auger et B. Lacroix**, 2006 : L'assimilation opérationnelle de données régionales à Météo-France. *La Météorologie*, 8^e série, 54, 43-48.
- **Fischer C., T. Montmerle, L. Berre, L. Auger et S. E. Stefanescu**, 2005 : An overview of the variational assimilation in the Aladin/France NWP system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 613, 3477-3492.
- **Lafore J.-P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, C. Fischer, P. Hérel, J.-L. Redelsperger, E. Richard et J. Vilà-Guerau de Arellano**, 1998 : The Méso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophys.*, 16, 90-109.
- **Sun J. et N. A. Crook**, 2001 : Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Weather Forecast*, 16, 117-132.
- **Sites Internet**
- www.cnrn.meteo.fr/arome/
- www.cnrn.meteo.fr/aladin/meetings/surfex.html
- <http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh/index2.html>
- www.cnrn.meteo.fr/aladin/
- www.cnrn.meteo.fr/
- www.ecmwf.int/