

**Les systèmes de prévision numérique du temps Arpège et Arome de Météo-France**  
(28/06/2015)

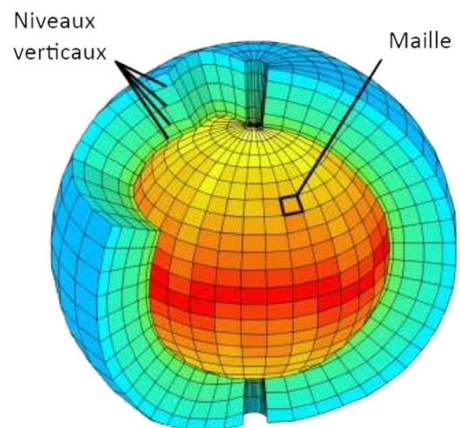
I) Introduction

Une prévision météorologique est élaborée en quatre étapes fondamentales : l'observation, l'assimilation des données observées pour obtenir une représentation du temps qu'il fait, la simulation de l'évolution de l'atmosphère au moyen de modèles numériques et l'analyse des résultats par les prévisionnistes.

Météo-France est en charge des **observations** sur les territoires français et reçoit des autres services météorologiques, des mesures recueillies sur l'ensemble du globe. Météo-France figure parmi les rares centres au monde à collecter et traiter des observations venues du monde entier H24 et 7 jours sur 7.

Les données d'observation ne sont pas utilisables telles quelles par les modèles numériques, qui ont besoin d'une cartographie cohérente de l'atmosphère à l'instant initial, c'est-à-dire les valeurs des paramètres météorologiques clés (température, pression, vent, humidité) en tout point d'une grille en 3D représentant l'atmosphère. Or, en dépit de leur nombre croissant, les mesures ne couvrent pas toute l'atmosphère en continu : les observations ne sont homogènes ni dans l'espace, ni dans le temps. Pour transformer toutes ces données en une description cohérente de l'état initial utilisable par le modèle, une première étape de traitement, appelé **assimilation de données**, est nécessaire. L'assimilation de données consiste à combiner une prévision récente, qui donne une première ébauche du temps qu'il fait, avec toutes les observations du même moment. L'ébauche porte l'histoire antérieure de l'atmosphère, adossée aux observations passées. Lors de la combinaison, les poids relatifs entre mesures et ébauche dépendent des incertitudes qui pèsent sur l'une et sur l'autre. A l'arrivée, l'assimilation fournit un nouvel état de l'atmosphère plus proche des observations que la première ébauche, propre à une nouvelle prévision.

A partir des états initiaux produits par l'assimilation, les **modèles** calculent l'évolution des paramètres météorologiques sur la grille en 3D qui représente l'atmosphère, en s'appuyant sur les lois physiques qui régissent son comportement : les lois de la mécanique des fluides, complétées par les lois des changements d'état de l'eau (condensation, évaporation, formation des précipitations), de turbulence, de rayonnement ou encore les lois décrivant les nombreuses interactions avec la surface terrestre et même l'espace. La résolution horizontale est définie par la longueur de maille de la grille du modèle, et la résolution verticale, par le nombre de niveaux verticaux du modèle. La résolution spatiale impose de respecter une résolution temporelle pour que les calculs restent faisables. Les résultats des simulations effectuées par les modèles sont interpolés horizontalement et verticalement sur des grilles horizontales régulières en latitudes et longitudes, et des niveaux verticaux iso-pression ou iso-altitude pour faciliter leur exploitation.



Une **expertise humaine** est indispensable pour analyser ces résultats complexes et les traduire en informations concrètes. Les prévisionnistes de Météo-France choisissent parmi les différents scénarios celui qui apparaît comme le plus probable et le déclinent en cartes et bulletins de prévision adaptés aux utilisateurs. Ils caractérisent aussi les risques de phénomènes dangereux et prennent les décisions relatives à la vigilance. De plus, ils assurent un contact direct avec certaines catégories d'utilisateurs, comme les services en charge de la sécurité civile en France.



## II) Le système global de prévision numérique du temps : Arpège

Le système de prévision numérique planétaire Arpège<sup>1</sup> est un élément essentiel pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France. Il fait partie intégrante du logiciel Arpège-IFS conçu, développé et maintenu en coopération avec le CEPMMT<sup>2</sup>. Le modèle Arpège couvre l'ensemble du globe avec une résolution plus fine sur la métropole. Il est utilisé pour prévoir les évolutions des phénomènes de grande échelle (dépressions, anticyclones) et pour la prévision jusqu'à 3-4 jours d'échéance sur la métropole, l'outremer, les domaines maritimes et les zones d'intérêt pour la France. Dans le monde, les grands services météorologiques nationaux comme Météo-France comparent en permanence les qualités des prévisions issues de leurs modèles globaux de prévision numérique du temps. Le système Arpège figure toujours aux tout premiers rangs mondiaux.

Les conditions initiales du modèle Arpège sont déterminées par une assimilation de données variationnelle quadridimensionnelle (4D-Var) intégrant une très grande quantité et variété d'observations conventionnelles (ballons-sondes, mesures des avions, des bateaux, des bouées, des stations terrestres, etc.) et issues de la télédétection (sondeurs infra-rouges à milliers de canaux sur satellites, sondeurs et imageurs micro-ondes sur satellites, températures et humidités déduites du signal GPS satellite-satellite, vents de surface depuis satellites (par diffusiométrie), humidités déduites du signal GPS satellite-sol, vents déduits d'images satellites, radars-vents à tir vertical, etc.). Les poids relatifs entre mesures et ébauche sont estimés à l'aide d'un ensemble d'assimilation basé sur 25 scénarios de prévisions à courte échéance. La figure 1 illustre l'évolution importante du nombre mensuel d'observations utilisées dans Arpège depuis 2002.

---

1 Arpège : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle

2 CEPMMT: Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme ( <http://www.ecmwf.int/> )

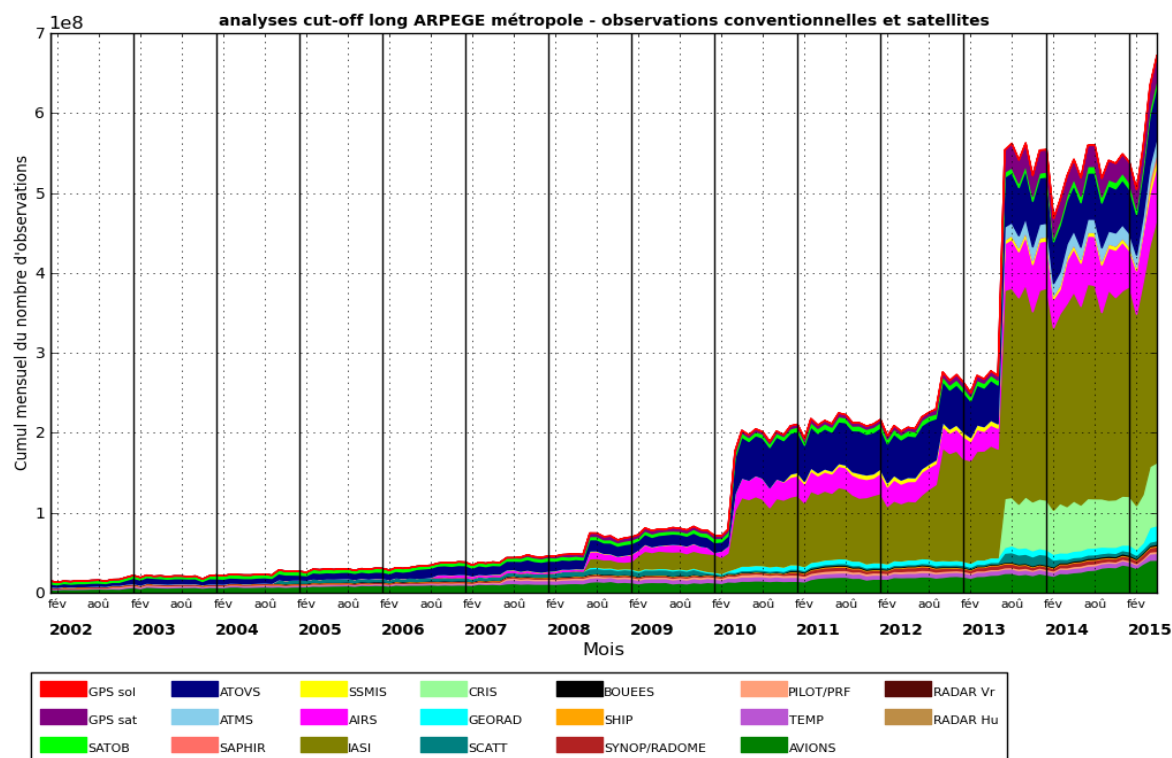


Figure 1: Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées dans Arpège par type d'observations

Arpège est un modèle spectral hydrostatique avec une résolution horizontale variable, une représentation en éléments finis sur la verticale et une coordonnée verticale hybride. Il utilise un schéma temporel semi-lagrangien, semi-implicite. La résolution horizontale du modèle Arpège est de 7.5 km environ sur la France et de 35 km aux antipodes, comme l'illustre la figure 2. Le modèle découpe l'atmosphère en 105 niveaux verticaux, avec un premier niveau à 10 mètres au dessus de la surface et un niveau supérieur à 70 km environ. Le pas de temps est de 360 secondes.

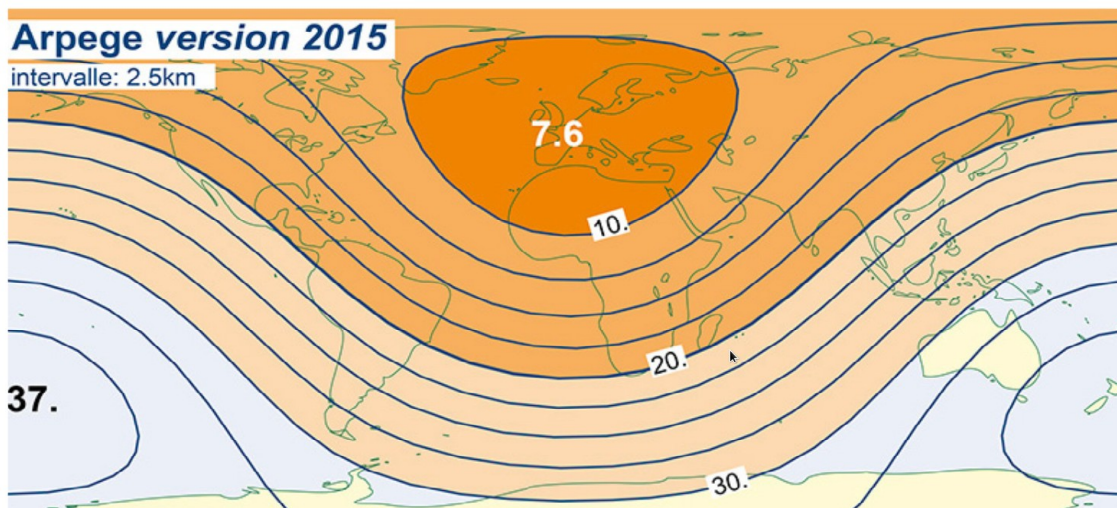


Figure 2: Résolution horizontale (en km) du modèle Arpège

Les variables d'état du modèle pour la partie atmosphérique sont les composantes horizontales du vent, la température, les humidités spécifiques de la vapeur d'eau et de quatre catégories d'hydrométéores (gouttelettes liquides, cristaux de glace, pluie, neige) et l'énergie cinétique turbulente sous-maille. Plusieurs variables caractérisent les conditions de surface et du sol superficiel (températures, contenus en eau liquide et solide, contenu en eau du manteau neigeux, ...). Des climatologies mensuelles sont utilisées pour décrire les propriétés physiographiques du sol et de la végétation, l'ozone et les aérosols.

Les paramétrisations physiques représentent l'influence des processus physiques (rayonnement, microphysique, processus de surface) et des phénomènes sous-maillages (turbulence, convection, ondes de gravité) sur l'évolution des variables pronostiques du modèle. Les échanges radiatifs dans l'atmosphère (ciel clair, nuages, ozone, aérosols) et avec la surface sont calculés toutes les heures. Plusieurs effets liés à l'orographie sous-maille sont pris en compte tels que les ondes de gravité et le blocage aérodynamique du flux. Le transport dans la couche limite repose sur un schéma en diffusion dont les coefficients d'échange dépendent de l'énergie cinétique turbulente et d'une longueur de mélange, et sur un schéma de convection peu profonde en flux de masse. Un schéma en flux de masse basé sur une fermeture en convergence d'humidité traite des effets associés aux orages sous-maille (transport, nuages, précipitations, etc.). La paramétrisation des nuages utilise une description statistique de l'écart à la saturation sous-maille et suppose un ajustement instantané entre les trois phases de l'eau. Les processus microphysiques associés aux précipitations résolues tels que l'autoconversion, la collection, l'évaporation, la sublimation, la fonte et la sédimentation sont représentés explicitement.

Le schéma de surface inclut un nombre important de processus physiques intervenant à l'interface sol-végétation-atmosphère et dans le sol superficiel (diffusion de la chaleur et de l'eau dans le sol, ruissellement, gel, fonte de la neige, etc.) pour déterminer les flux de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité sur les surfaces continentales. Les flux turbulents océaniques sont calculés à l'aide d'une paramétrisation dont les coefficients d'échanges ont été calibrés sur de nombreuses campagnes de mesures.

### III) Le système régional de prévision numérique du temps : Arome

Le système régional de prévision numérique du temps Arome<sup>3</sup> est exploité en opérationnel à Météo-France depuis décembre 2008. Arome a été développé grâce à d'étroites collaborations, nationales (CNRS) et internationales (CEPMMT, Aladin<sup>4</sup>, Hirlam<sup>5</sup>), afin de tenir compte des dernières avancées en modélisation atmosphérique. Les paramétrisations physiques du modèle sont en majeure partie héritées du modèle de recherche Mésos-NH<sup>6</sup> alors que la partie dynamique est une adaptation pour la fine échelle du noyau dynamique du modèle Aladin. L'initialisation du modèle est réalisée par un système d'assimilation de données tridimensionnel 3DVar dérivé du système d'assimilation variationnelle d'Arpège, adapté à la résolution du modèle et alimenté en données fines.

La modèle Arome couvre la France métropolitaine et les pays voisins avec une maille de 1,3 km et 90 niveaux verticaux avec un premier niveau à 5 m au dessus de la surface. Le domaine géographique couvert est représenté sur la figure 3. Arome est un modèle spectral, non-hydrostatique, avec une représentation en différences finies sur la verticale et une coordonnée verticale hybride. Il utilise un schéma temporel itératif semi-lagrangien, semi-implicite. Le pas de temps est de 50 secondes. Alimenté via ses bords latéraux par les simulations d'Arpège, Arome produit des prévisions très détaillées, que les prévisionnistes utilisent pour affiner leurs prévisions à petite échelle, notamment en termes d'anticipation et de localisation des phénomènes météorologiques potentiellement dangereux, tels que les fortes pluies méditerranéennes (épisodes Cévenols), les orages violents, le brouillard ou les îlots de chaleur urbains en période de canicule. Ces prévisions fournissent des informations locales et précises de température, d'humidité, d'état du ciel, répondant aux besoins des citoyens dans leur vie quotidienne.

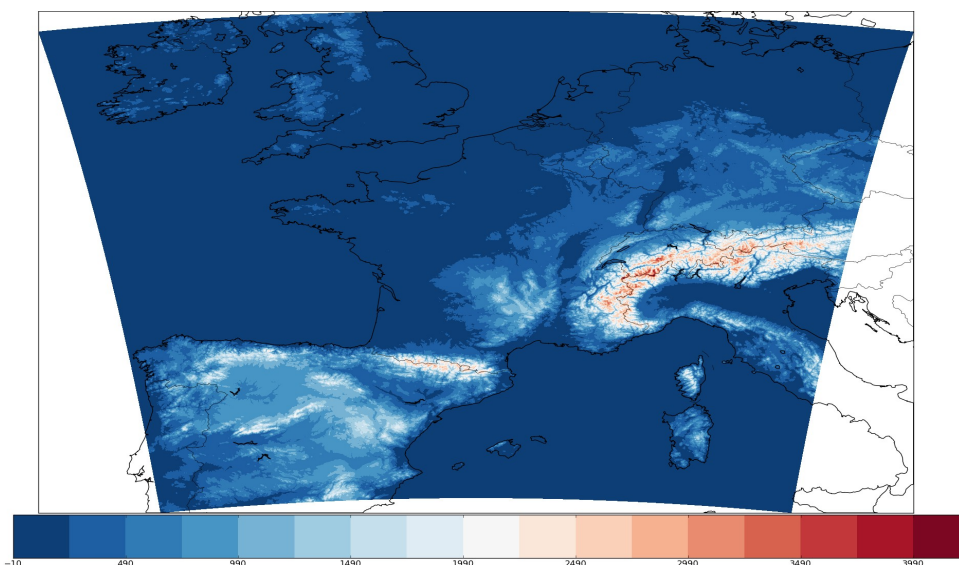


Figure 3: *Domaine de calcul du modèle Arome*

Accroître la résolution du modèle suppose une densité d'observations accrue permettant de décrire l'état présent de l'atmosphère le plus finement possible. Il est notamment essentiel d'injecter dans le système de prévision des données suffisamment détaillées sur les précurseurs des phénomènes à prévoir. Arome se distingue d'Arpège : il prend en effet en compte les observations de vent produites par la plupart des radars Doppler météorologiques. Arome intègre également les observations de précipitations fournies par ces mêmes radars. Toutes ces données renseignent sur la position des nuages à l'origine des pluies intenses et des orages ainsi que sur la distribution et l'intensité des précipitations. Enfin Arome intègre des données

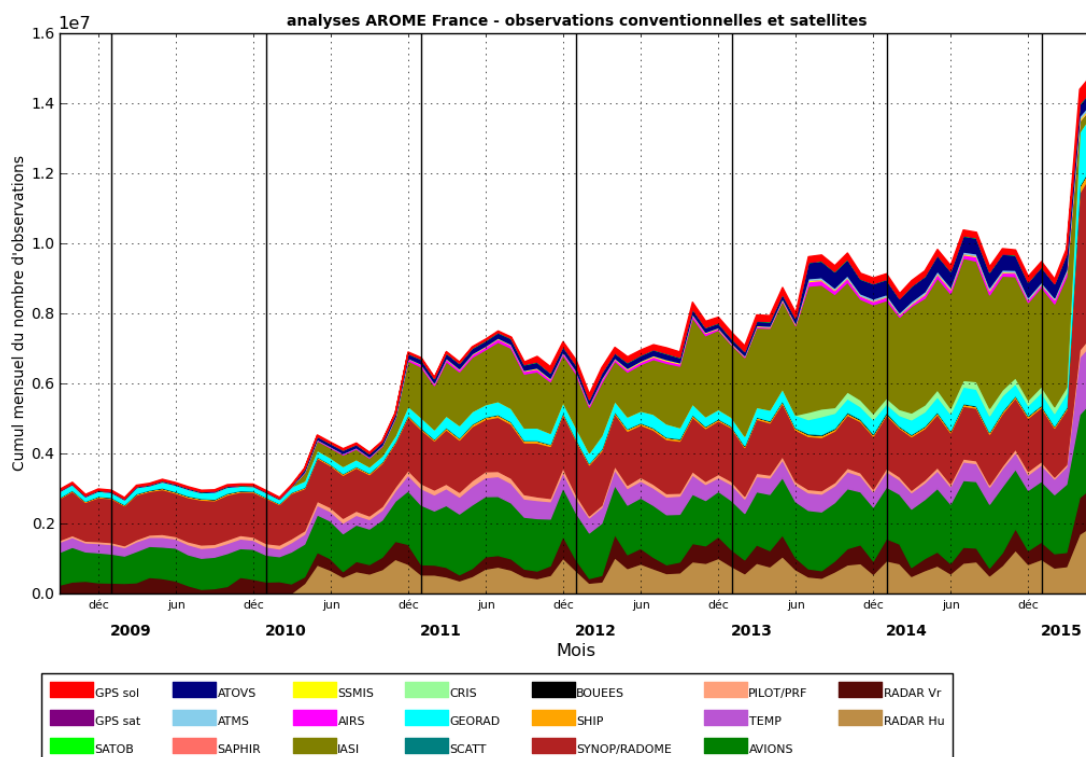
3 Arome : Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Mésoséchelle

4 ALADIN ( <http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/> )

5 HIRLAM : HIgh Resolution Limited Area Model ( [www.hirlam.org](http://www.hirlam.org) )

6 Meso-NH: MESOscale Non-Hydrostatic model ( <http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh51> )

(issues des stations automatiques au sol, radiosondages, stations GPS, satellites ...) plus nombreuses que le modèle Arpège. La figure 4 illustre l'évolution importante du nombre mensuel d'observations utilisées dans Arome depuis 2009.



DirOP/COMPAS 01-juin-2015

Figure 4: Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées dans Arome par type d'observations

Les variables d'état du modèle pour la partie atmosphérique sont les composantes horizontales du vent, la vitesse verticale, l'écart à la pression hydrostatique, la température, les humidités spécifiques de la vapeur d'eau et de cinq catégories d'hydrométéores (gouttelettes liquides, cristaux de glace, pluie, neige, grésil) et l'énergie cinétique turbulente sous-maille. La représentation des processus microphysiques est nettement plus détaillée que dans le modèle Arpège. Le transport dans la couche limite repose sur un schéma de turbulence commun avec le modèle Arpège et sur un schéma spécifique représentant les thermiques secs et humides. Les échanges radiatifs dans l'atmosphère et avec la surface sont calculés toutes les 15 minutes.

Arome bénéficie d'une base de données orographiques récente et fine, qui contribue à une représentation très réaliste des zones de relief. La nature du sol influence directement les conditions météorologiques locales. Afin de mieux modéliser ces échanges entre l'atmosphère et les surfaces, chaque maille est caractérisée par un type de surface. Le modèle est alimenté par une base de données mondiale développée par les chercheurs de Météo-France qui détaille environ 250 écosystèmes : lacs, mers et océans, surfaces urbanisées (villes, aéroports) et surfaces naturelles (végétation). Douze classes de végétation sont également définies : sol nu, rochers, neige permanente, arbres à feuilles caduques, forêt de conifères, parcs et jardins ...

Autre atout : Arome tient compte des mouvements verticaux violents de petite échelle associés au développement des cumulonimbus, les nuages d'orages. Un modèle à maille plus large, comme Arpège, ne "voit" pas ces mouvements verticaux locaux. Avec sa maille de 1,3 km, Arome est capable de les modéliser ainsi que le cycle de vie des systèmes nuageux qui produisent des précipitations. Il peut alors mieux simuler les phénomènes "convectifs", les systèmes pluvio-orageux.

Avec une nouvelle version tous les ans environ, les systèmes Arpège et Arome sont en constante évolution afin d'exploiter au mieux la puissance des supercalculateurs, assimiler les données des nouveaux systèmes

*d'observation et améliorer les composantes des modèles de prévision.*