

# Aperçu de la prévision numérique du temps à travers les outils mis en œuvre à Météo-France

*François Bouyssel  
CNRM-GAME/GMAP  
Météo-France*

Météorologie : de l'atmosphère à l'espace  
18-19 juin 2015, Meudon

# Outline

- Introduction
- Numerical weather prediction models
- Operational constraints

# Grandes étapes de l'histoire de la prévision numérique en météorologie

- 1922 : Richardson : solution numérique approchée des équations régissant l'évolution de l'atmosphère. Réalisation d'une prévision à 6 h d'échéances
- 1939 : Rossby : interprétation du déplacement observé des centres d'action atmosphériques par l'équation de conservation du tourbillon absolu
- 1948 : Charney : simplification du système général d'équation
- 1950 : Charney, Fjörtoft et Von Neumann : première prévision numérique du temps sur le calculateur ENIAC.
- 1955 : début de la prévision opérationnelle par l'US Weather Bureau : Initialisation de l'état atmosphérique à un instant donné ; Simulation de son évolution
- Vers 1970 : installation opérationnelle de modèles numériques dans beaucoup de services météorologiques

(source: Jean Coiffier, La Météorologie , 2000)

# Principe de la Prévision Numérique

◆ Description de l'état présent de l'atmosphère  
= analyse

◆ **Modèle numérique:**  
équations de la mécanique,  
thermodynamique,  
continuité,  
phénomènes physiques divers...

◆ Description de l'état futur de l'atmosphère  
= prévision

# Equations en météorologie

- $\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}p} - 2 \vec{\Omega} \wedge \vec{V} + \vec{F}_f$
- $\text{div} \vec{V} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = 0$
- $dU(T) = \delta U + \delta Q$  (Travail + Chaleur)
- $p = \rho R T$
- $\frac{dq}{dt} = \text{Evaporation} - \text{Précipitation}$

$\vec{V} = (u, v, w)$  : vecteur vitesse

$p$  : pression

$\rho$  : densité

$U$  : énergie interne

$T$  : température

$q$  : concentration en vapeur d'eau

## Besoins en ressources de calcul

Adaptation continue des caractéristiques du modèle de PN aux ressources calcul disponibles:

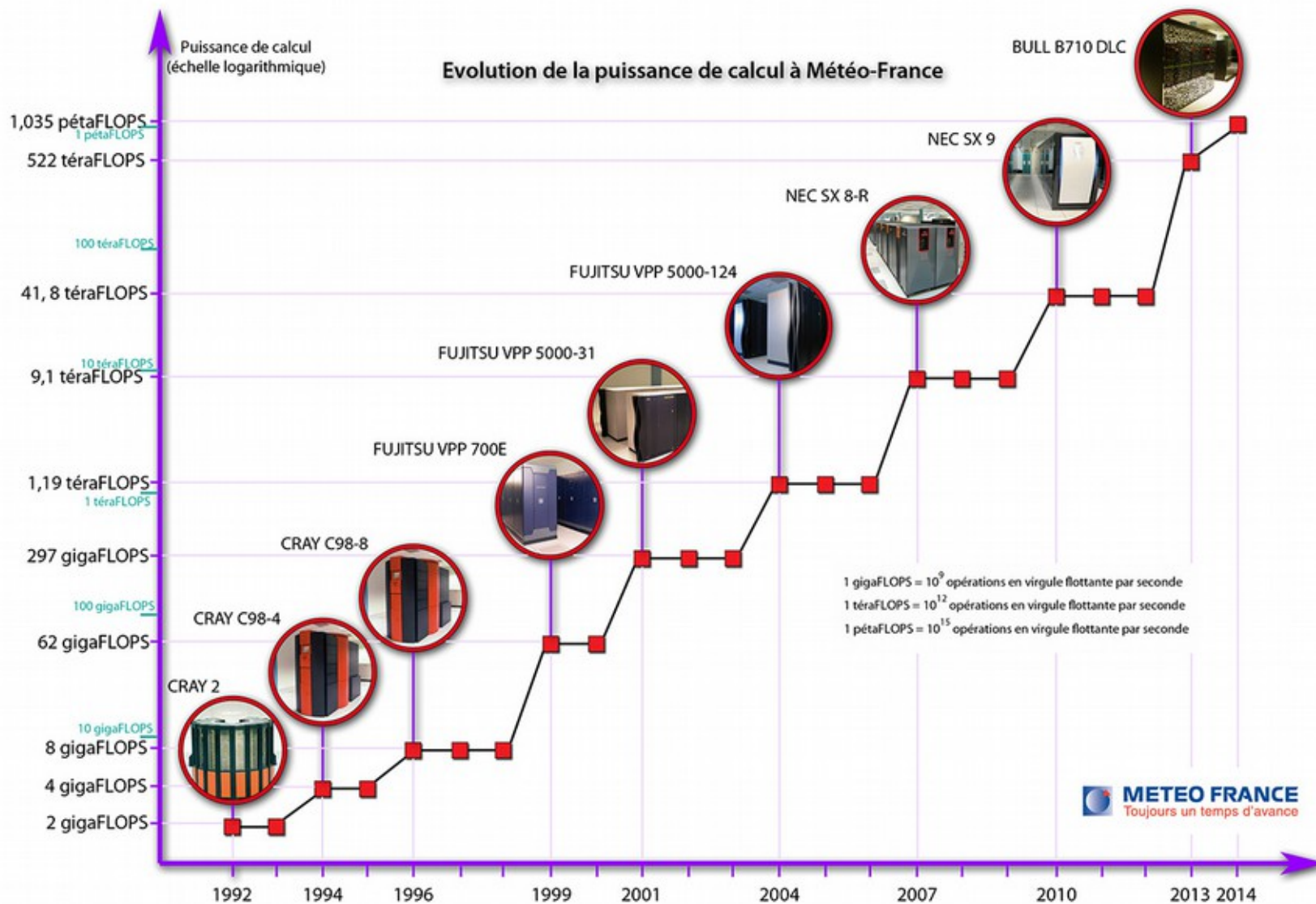
- Augmentation du domaine géographique → modèles globaux
- Augmentation de la résolution spatiale de la grille de calcul / modèles emboîtés
- Augmentation des échéances de prévision liée à la performance croissante des modèles
- Prévision d'ensemble pour des prévisions probabilistes à courte et moyenne échéance
- Amélioration de la prise en compte des processus physiques:
  - Échanges énergétiques à la surface
  - Transferts radiatifs dans l'atmosphère
  - Phase condensée de l'eau (nuages, précipitations)
  - Mouvements convectifs, etc..

+ contrainte opérationnelle sur les temps d'exécution

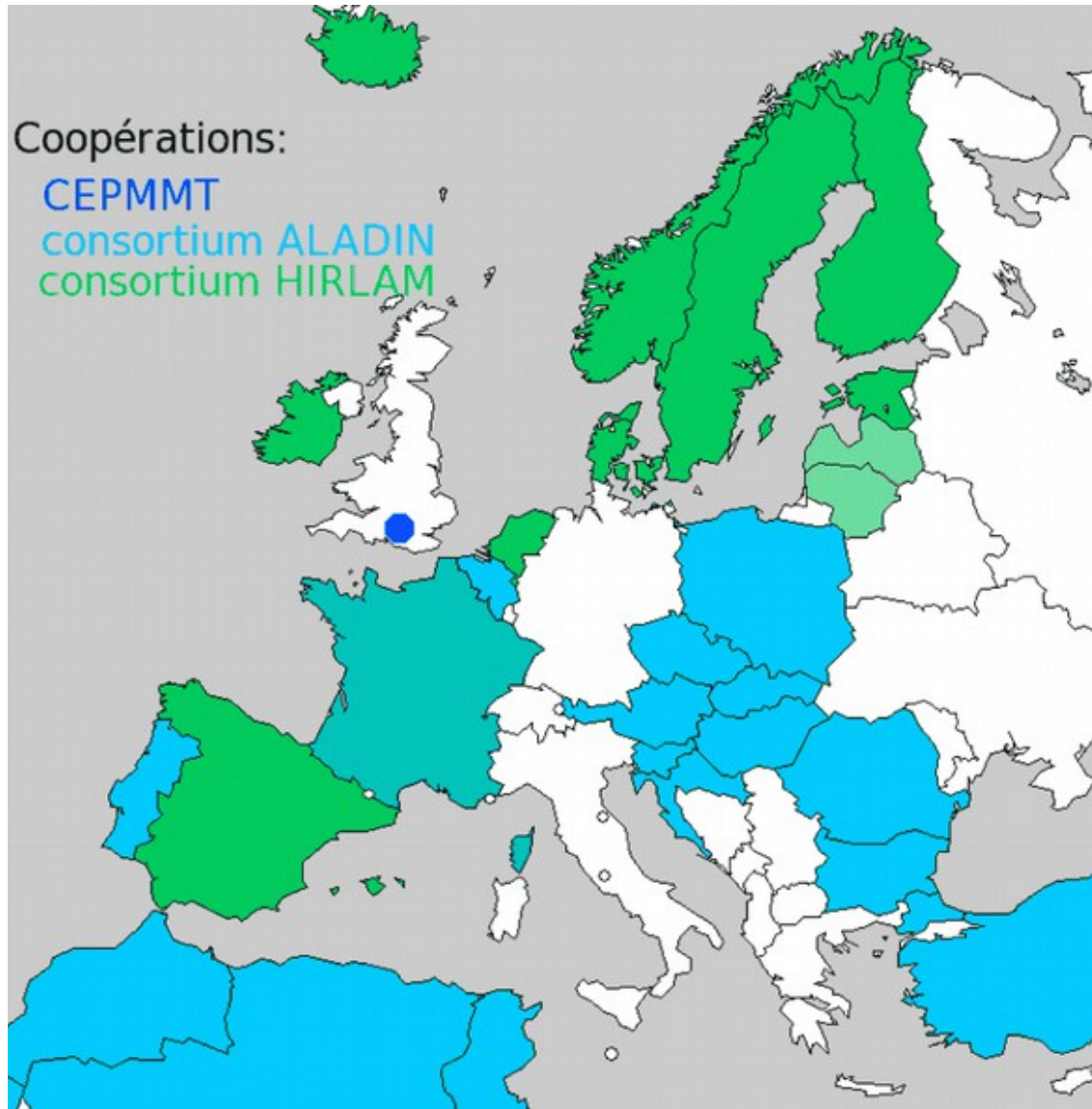
➔ **Équipement des services météorologiques en super-calculateurs**

➔ **Besoins en ressource de calcul sans limite connue**

# HPC : fast increasing computing power



# International collaborations on Ifs/Arpege NWP software



*Ifs/Arpege NWP software conceived, developed and maintained in collaboration with ECMWF since 1987. Includes all constituents needed for global numerical prediction (global spectral model (TL and AD models, 3D et 4D-VAR global assimilation, etc.). Around 13000 routines.*

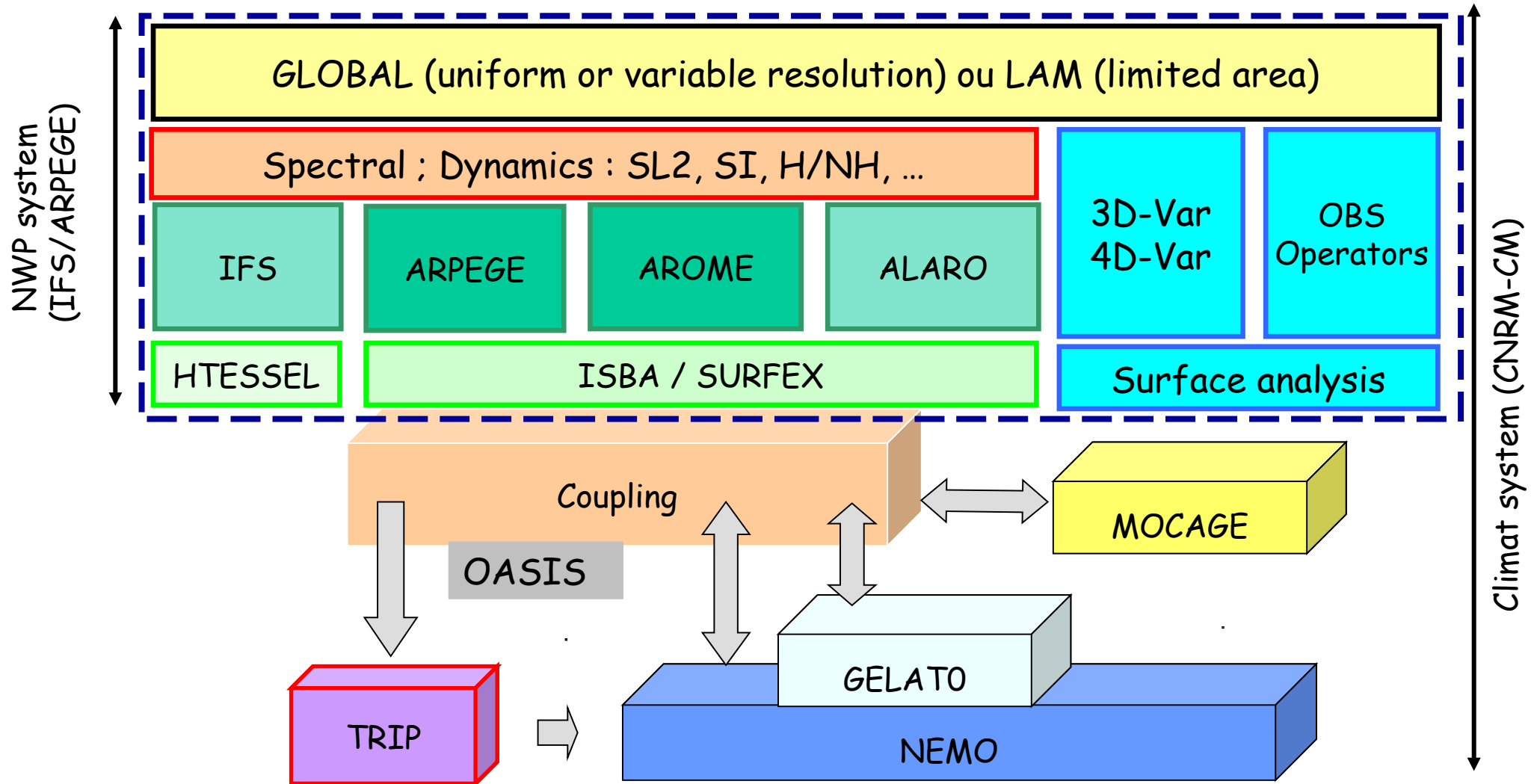
*Aladin, project started by Météo-France in 1990: A mutually beneficial collaboration with National Meteorological Services of Central and Eastern Europe and Northern Africa concerning numerical prediction*

*Collaboration with ALADIN and HIRLAM Consortiums on LAM development and maintenance within Ifs/Arpege software*



# Numerical codes

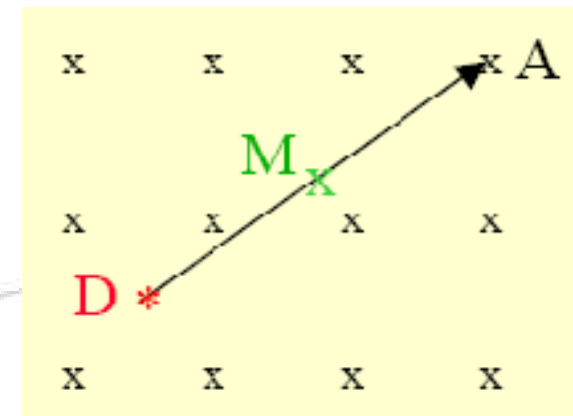
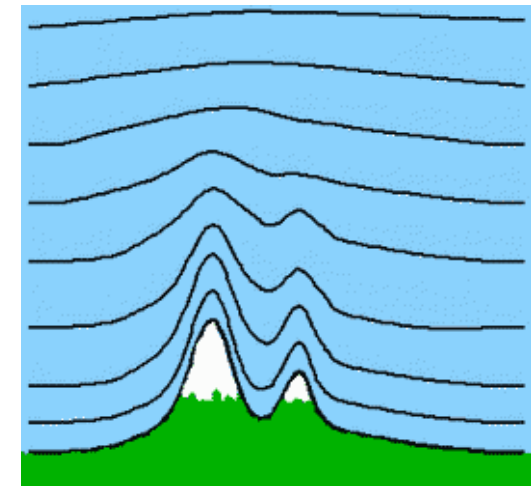
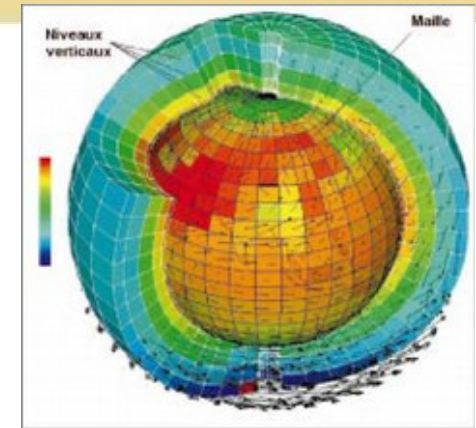
✓ IFS/ARPEGE and CNRM-CM



✓ MESO-NH : research model for meso-alpha scale to micro-scale, anelastic system, two way nesting, advanced physical parameterizations for kilometeric scales, process studies, tracers, more diagnostics, 1D, 2D

# Arpege / Arome

- Configurations of « IFS/ARPEGE » software developed in collaboration with ECMWF and National Meteorological Services of ALADIN and HIRLAM Consortia
- Global and LAM geometry
- Hydrostatic / Non-hydrostatic
- Vertical hybrid coordinate
- Two time level semi-implicit semi-lagrangian advection scheme
- Spectral horizontal representation
- Vertical representation Finite elements / finite differences finies
- Prognostic variables:  $u$ ,  $v$ ,  $q$ ,  $d$ ,  $qv$ ,  $ql$ ,  $qi$ ,  $qr$ ,  $qs$ ,  $qg$ ,  $tke$
- Variational assimilation 4D / 3D
- Observations: conventional, satellites, radars

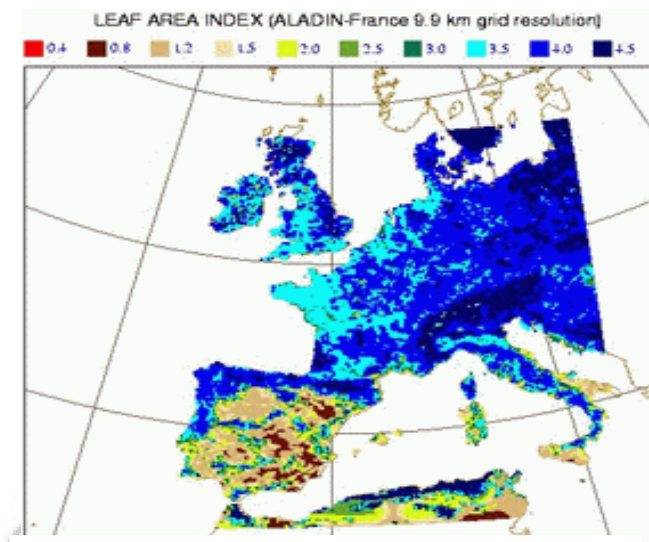
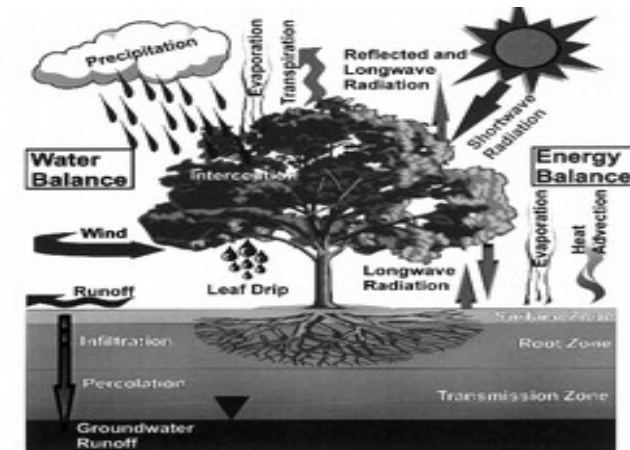


# Variables pronostiques

- **Pour l'atmosphère** : Composantes du vent (U,V,W), Température (T), Humidités spécifiques de l'eau vapeur ( $Q_v$ ), de l'eau liquide nuageuse ( $Q_l$ ), de l'eau solide nuageuse ( $Q_i$ ), de la pluie ( $Q_r$ ), de la neige ( $Q_s$ ), des graupels ( $Q_g$ ), de l'énergie cinétique turbulente sous-maille (ECT)

- **Pour la surface** : Températures de surface ( $T_s$ ) et profonde ( $T_p$ ), Contenus en eau interceptée par la végétation (WI), dans le sol ( $W_s$ ,  $W_p$ ,  $W_{si}$ ,  $W_{pi}$ ), de la neige ( $S_n$ ), Albédo de la neige (AI)

- Des climatologies mensuelles sont utilisées pour décrire les propriétés physiographiques du sol et de la végétation, l'ozone et les aérosols



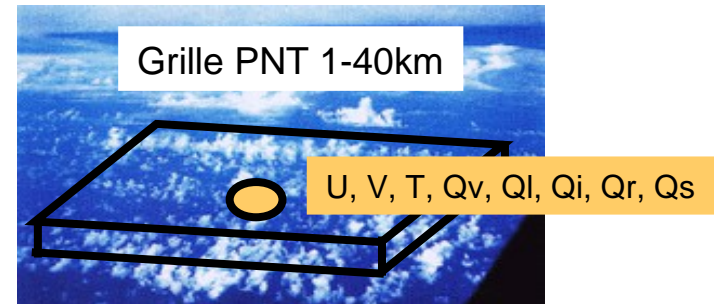
Exemple: indice foliaire

# Paramétrisations physiques

**Objectif** : Prise en compte des processus physiques et du transport sous-maille sur l'évolution des variables du modèle

**Paramétrisations physiques :**

- **Processus de surface**
- **Rayonnement**
- **Microphysique**
- **Transport sous-maille :**

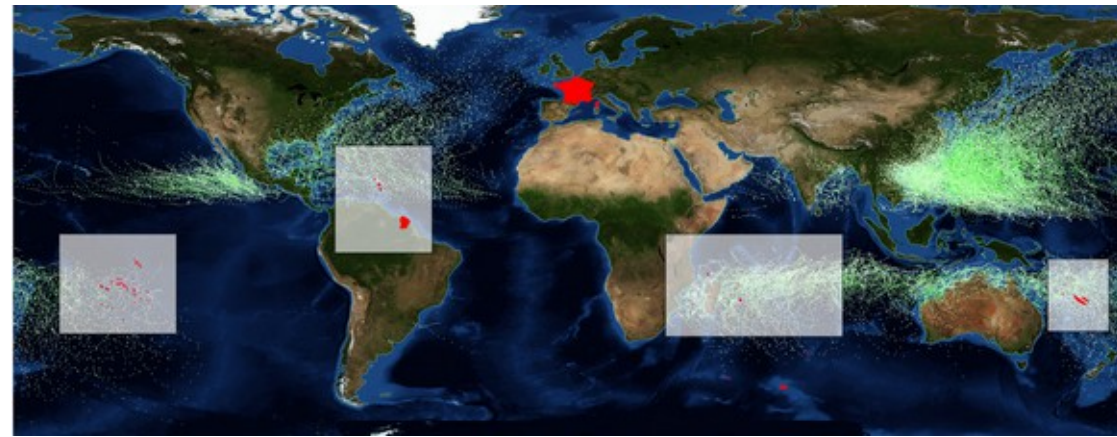
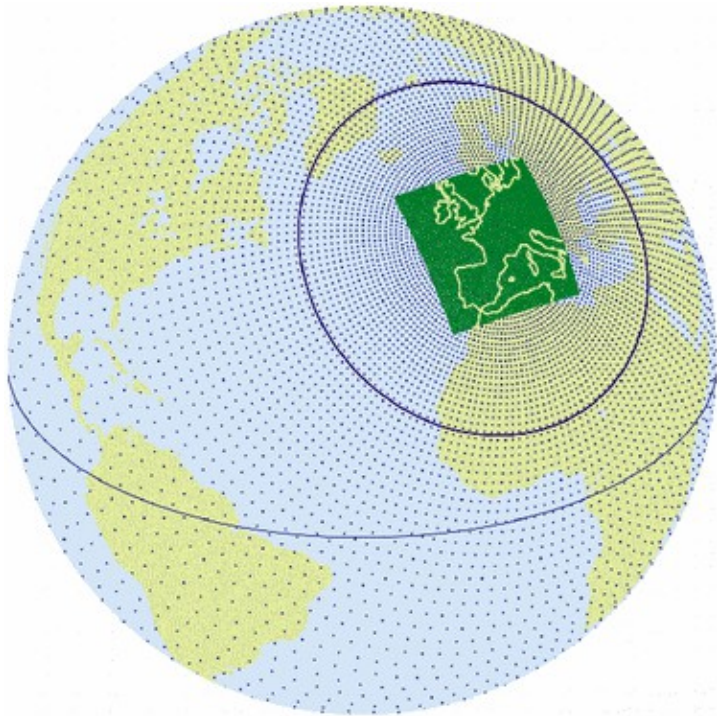


- \* **Turbulence** (tourbillons isotropes)
- \* **Convection peu profonde** (circulations anisotropes dans la CLP)
- \* **Convection profonde** (circulations anisotropes non limitées à la CLP)
- \* **Ondes de gravité** (orographiques, convectives)

Le transport sous-maille est progressivement résolu par les équations dynamiques du modèle en augmentant la résolution spatiale. La convection profonde et les ondes de gravité sont en grande partie résolues à 2.5 km.

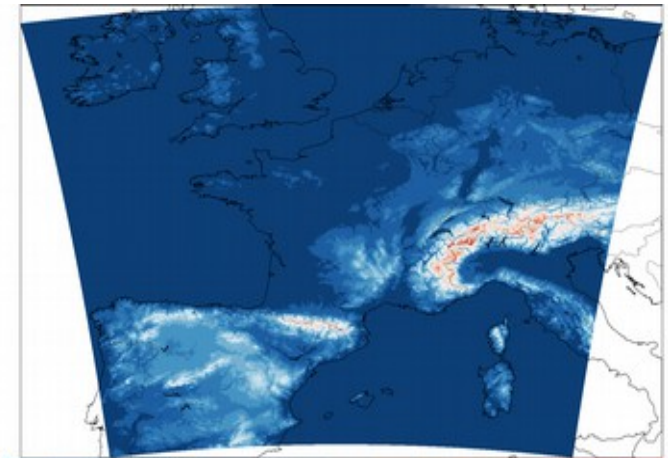
Paramétrisations physiques 1D (pas d'échange entre colonnes)

# NWP deterministic systems with assimilation



**LAM ALADIN Overseas** : ~3-days forecasts,  $dx \sim 8\text{km}$ , 70 vertical levels,  $dt = 450\text{s}$  - 3DVar Data Assimilation

**Global ARPEGE** : T1198c2.2L105  
~4-days forecasts every 6 hours  
 $dx \sim 7.5\text{km}$  over France,  $\sim 36\text{km}$  over antipodes,  
 $dt \sim 6\text{mn}$ , 105 vertical levels  
4DVar incremental Data Assimilation  
Low resolutions : T149c1L105 ( $\sim 135\text{km}$ )  
and T399c1L105 ( $\sim 50\text{km}$ )



**LAM Cloud Resolving Model AROME**  
42 h forecasts every 6h  
 $dx = 1.3\text{km}$ , 90 vertical levels,  $dt = 50\text{s}$   
3DVar Data Assimilation (RUC1h)

# Ensembles : 4DVar EDA and global EPS

## AEARP (Ensemble Data Assimilation):

25 perturbed global members, T479 L105 with 4D-Var analysis

(explicit obs perturbations, implicit background perturbations through perturbed DA cycling).

Flow-dependent background error variances for obs. quality control and for minimizations

Model error contributions by on-line inflation of perturbations

## PEARP (Ensemble Prediction System):

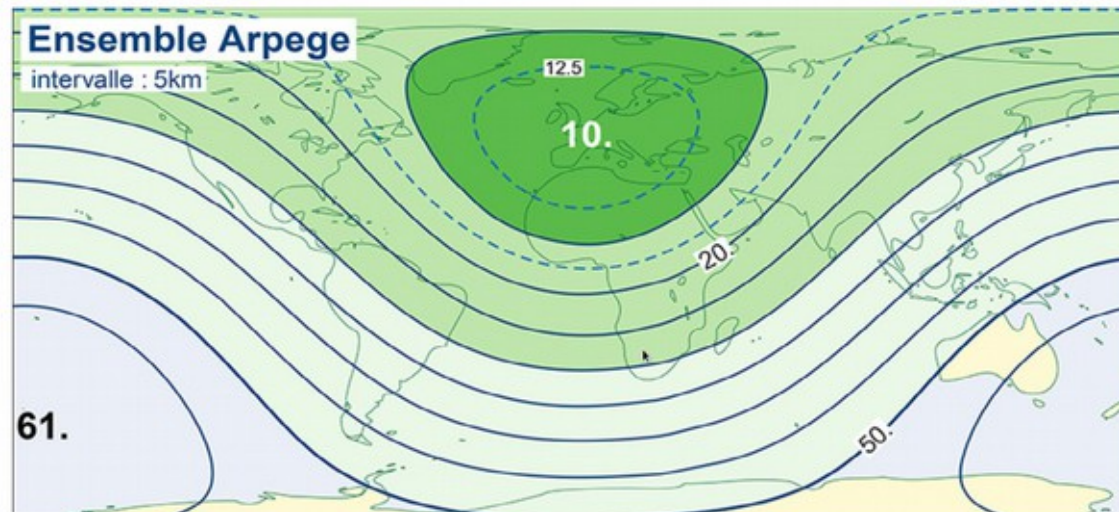
35 members including the control member running at : 06UTC (90h range) and 18UTC (108h range)

Forecasts resolution : T798C2.4L90 (~10km over France, 60km on antipodes)

Using the 17 background states and the mean from AEARP

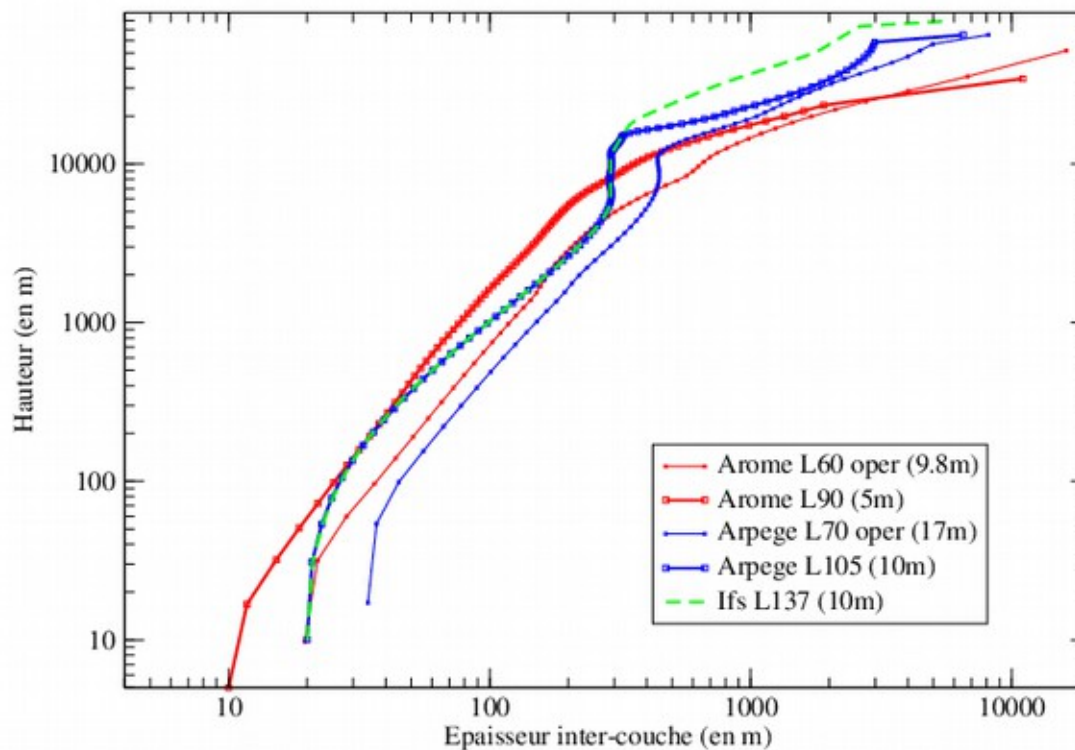
Singular vectors computed over 7 areas (rescaled by  $s_b$ ): resolution T195, norm: TE or KE

Using 10 physical packages including that of operational ARPEGE model



*Nouvelle résolution horizontale (en km) du modèle Arpege ensemble*

# Vertical resolution

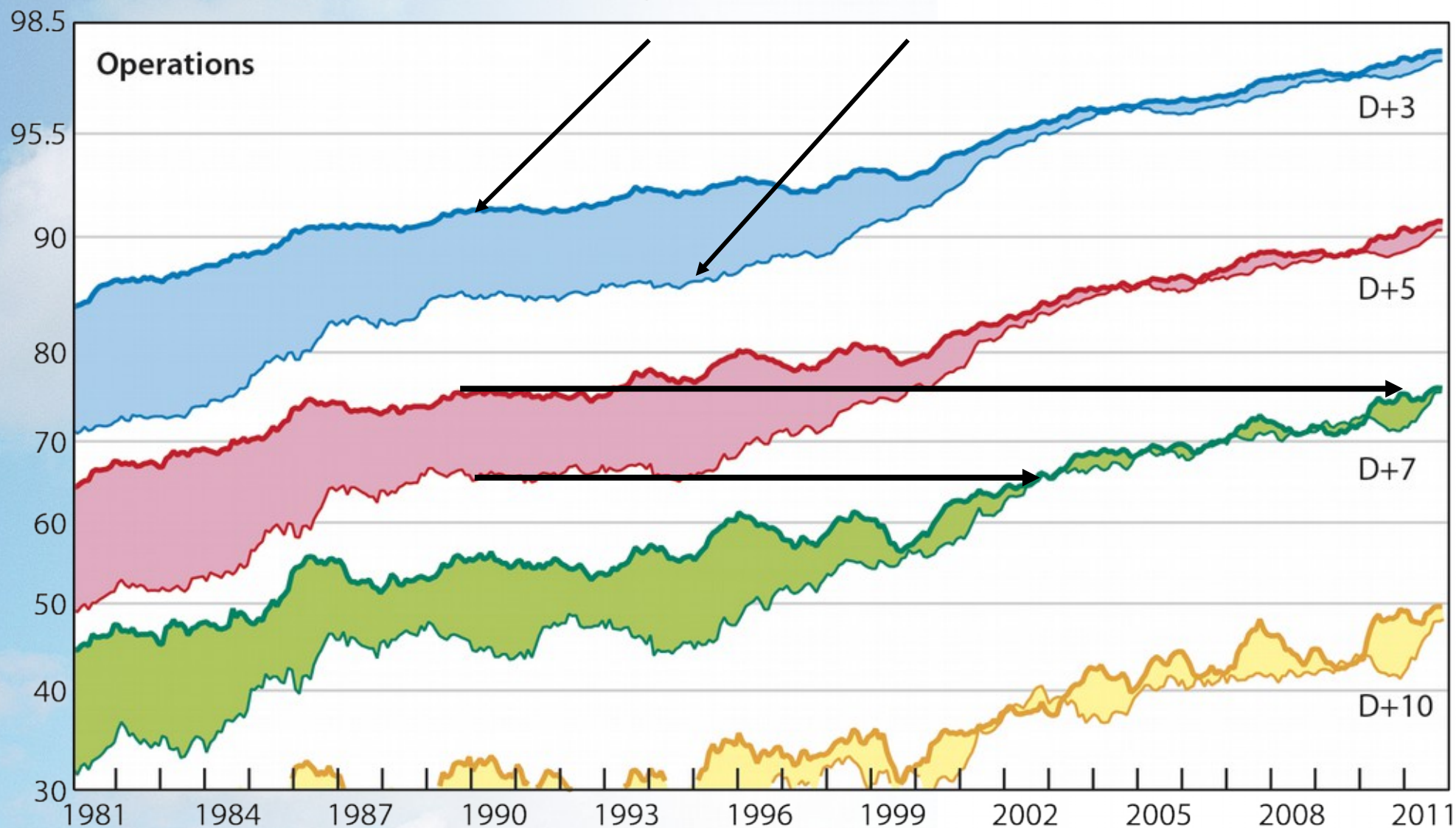


	Epaisseur standard (km)	Aro90	<b>Arp105</b>	Ifs137
Couche limite de surface	0 - 0.15	7	<b>6</b>	6
Couche limite planétaire	0.15 - 1.5	21	<b>18</b>	18
Troposphère libre	1.5 - 8.0	38	<b>26</b>	26
Tropopause	8.0 - 15.0	16	<b>24</b>	24
Stratosphère	15.0 - 50.0	8	<b>27</b>	51
Mesosphère	50.0 - 80.0+	0	<b>4</b>	12

# Evolution of ECMWF scores comparison northern and southern hemispheres

Anomaly correlation of 500 hPa height forecasts

— Northern hemisphere      — Southern hemisphere





## Bascules opérationnelles récentes

07/2008 : Nouvelles observations (IASI, etc.), ensemble d'assimilation Aearp, effets orographiques sous-maille, etc.

12/2008 : Arome-France opérationnel

02/2009 : Nouvelle physique Arpege (CBR, KFB, Ecume, SW6, ozone clim), observations (micro ondes sur terre, ...), analyse de surface Aladin, etc.

04/2009 : *Bascule Diapason vers Soprano*

09/2009 : *Passage sur le NEC SX9*

04/2010 : Nouvelles résolutions spatiales, augmentation de la densité des obs satellites, couplage direct de Arome à Arpege, réflectivités dans arome, etc.

11/2010 : SSMI/S, ASCAT, SST Ostia, longueurs de rugosité, agrandissement domaine Arome, analyse de surface Arome, etc.

09/2011 : Anti-arpegeades, SSMI/S, GPS-RO. GPS sol dans Arome, etc.

09/2012 : Anti-arpegeades, niles observations, Inflation dans Aearp, etc.

12/2012 : *Passage en 4DVar de l'analyse PACOURT*

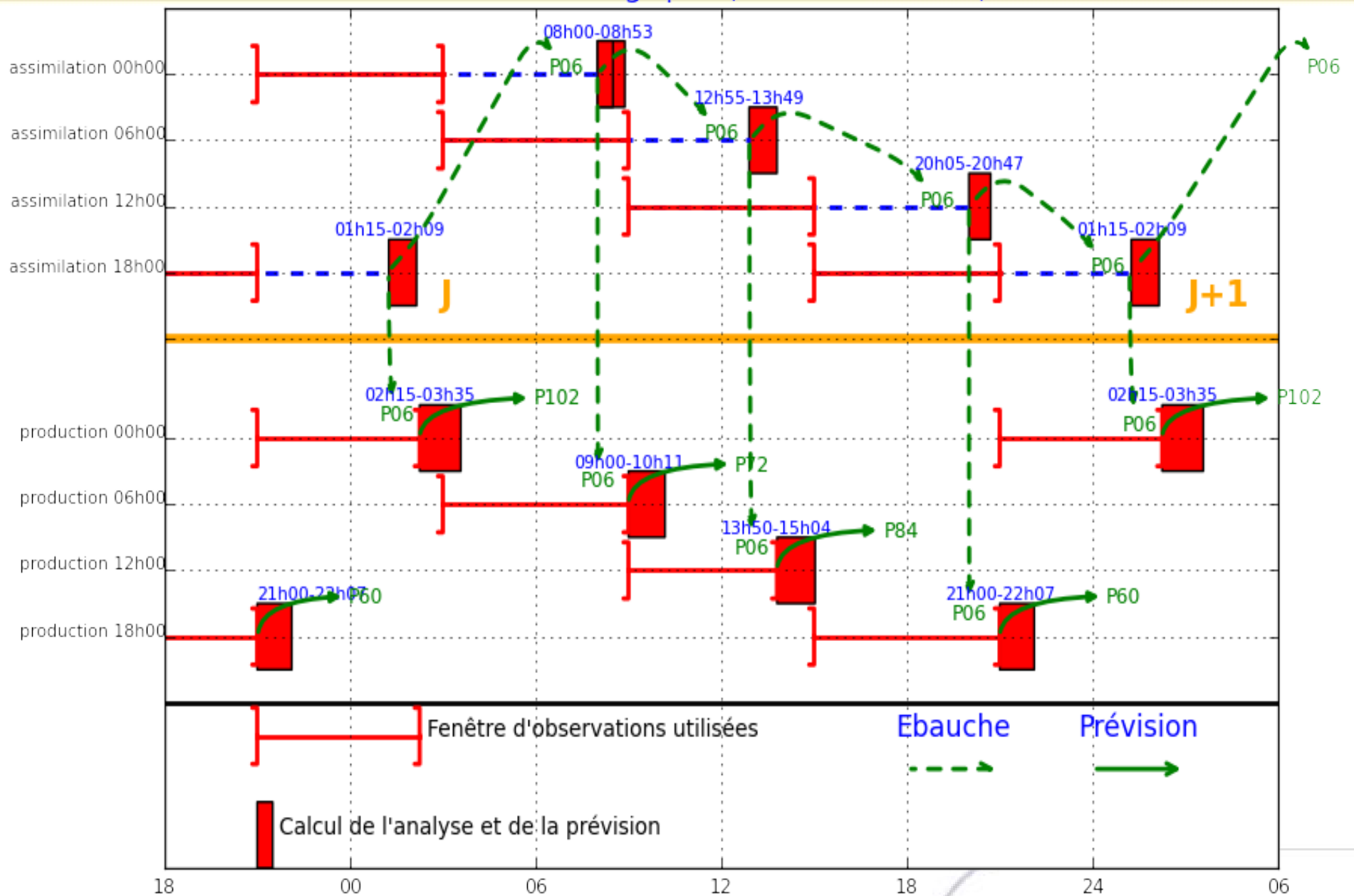
07/2013 : Assimilation en ondelettes, nouvelles observations, etc.

01/2014 : *Passage sur le calculateur BULL*

04/2015 : Augmentation de résolution spatiale, nouvelles observations, etc.

# CHAINE DE PREVISION OPERATIONNELLE POUR ARPEGE

## schéma logique (heures en UTC)



# Parallel computing

Why ? Serial computing is too slow. Large amount of memory needed not accessible by a single processor

Arpege forecast :

102h forecast in 45 min on 81 nodes (1944 cores)

Arome forecast :

42h forecast in 50min on 275 nodes (6600 cores)

**MPI** = **M**essage **P**assing **I**nterface, standard for programming processes (tasks) on systems with distributed memory

**OpenMP** = standard for shared memory programming (threads)

What performance do meteorological applications achieve ?

About 20-30 % of peak performance on vectors computers

About 5-10 % of peak performance on scalar computers

# Challenges in parallel computing

## Parallel Computers

- Have ever increasing processors, memory, performance, but
- Need more space (new computer halls = \$)
- Need more power (MWs = \$)

## Parallel computers require/produce a lot of data (I/O)

- Require parallel file systems (GPFS, Lustre) + archive store

## Applications need to scale to increasing numbers of processors, problems areas are

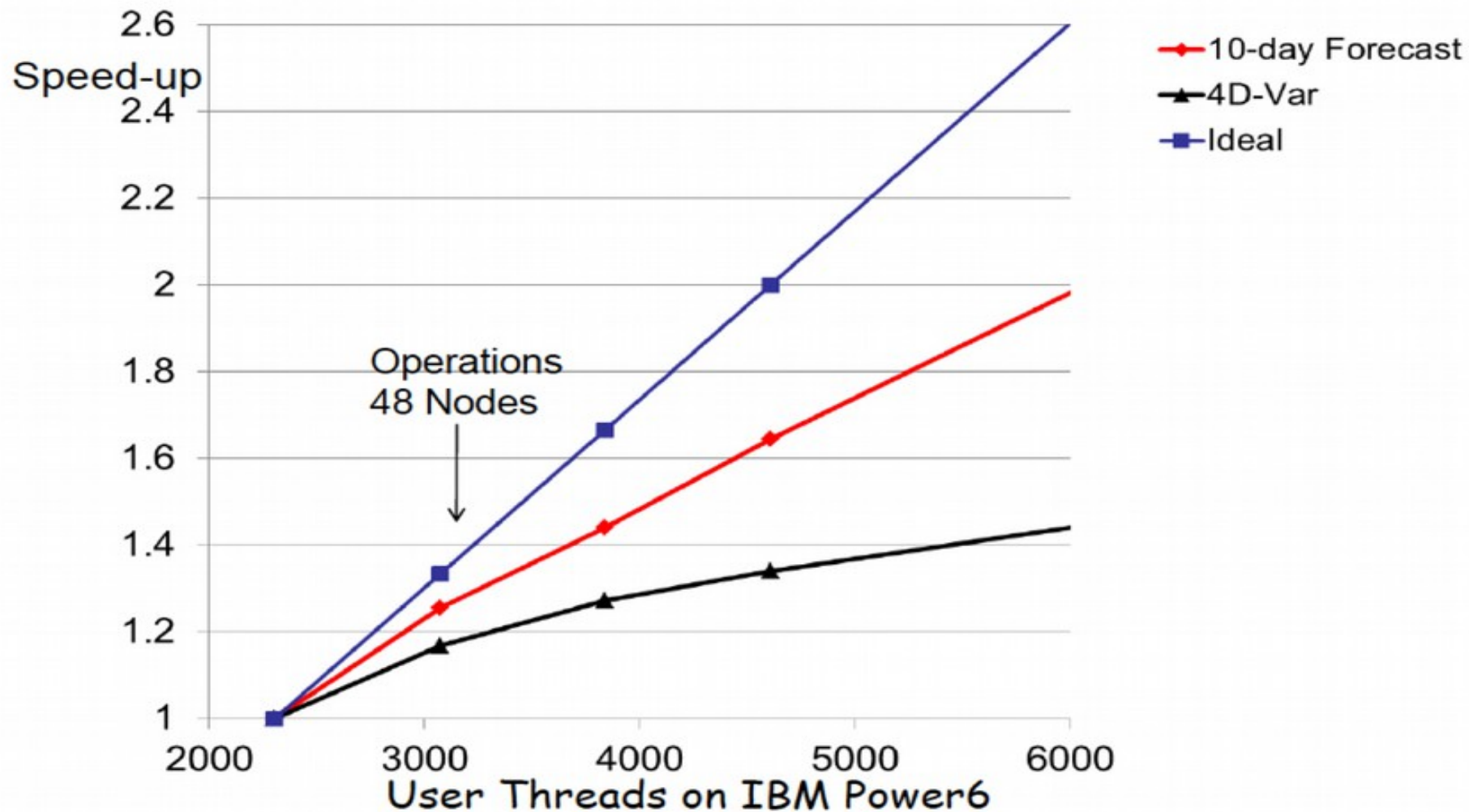
- Load imbalance, Serial sections, Global Communications

## Debugging parallel applications (totalview, ddt)

**We are going to be using more processors in the future!**

**More cores per socket, little/no clock speed improvements**

## Experiments with IFS: Main components



# Advancement of numerical weather prediction

Big improvement in the last 30 years for short and medium range forecasts (better spatial resolution, better physics, better data assimilation, more/better observations, etc.)

Development of ensemble prediction (4 days and beyond) through a probabilistic approach

Development of non hydrostatic kilometric scale model resolving explicitly deep convection

Feeding the observation database

# Prospects for development of prediction models

- ◆ **More details in the prediction** : hectometric resolution
- ◆ **More physical components in the models** : aerosols, chemistry, more realistic couplings with surface (sea ice, ocean/wave models, lake, etc.)
- ◆ **Development of a probabilistic approach of prediction**, including short-term
- ◆ **Improvement of assimilation algorithms**, with more efforts put on small scales
- ◆ **Development and use of new observation systems**