

La Prévision Numérique du Temps

The Numerical Weather Prediction

Formation OMM des prévisionnistes de la RA1
WMO training for the forecasters of AR1

David BARBARY
CMRS/RSMC La Réunion –
Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones
Septembre 2015

Plan

1. Principes généraux

- Un peu d'histoire
- Le modèle numérique
- 2 étapes pour la prévision

2. L'analyse (assimilation de données)

3. La prévision

4. Performances actuelles

5. Prochaine étape : Arome-OM

6. Conclusions et perspectives

1. General principles

- *Some history*
- *The numerical model*
- *2 steps for the forecast*

2. The analysis (data assimilation)

3. The forecast

4. Present skill

5. Next step : Arome-OM

6. Conclusions and prospects



1. Principes généraux / *General principles*

Un peu d'histoire ...
Some history ...

- **Bjerkness (1904)**
- **Richardson (1920)**



- **Von Neumann: ENIAC (1945) premier calculateur électronique /**
first computer
- **Charney : Premier modèle (3 niveaux) en routine (USA, 1955) /**
first model (3 levels) run routinely (USA, 1955)



METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

Un peu d'histoire ...
Some history ...

- Vers 1970 : installation opérationnelle de modèles dans beaucoup de services
 - 1979: Le CEPMMT opérationnel en Europe (Reading – GB)
 - Années 1960-70: modèles quasi-géostrophiques surtout
 - Années 80-90 : modèles hydrostatiques (équations primitives)
 - A partir de 2000 environ: relâchement de l'hypothèse hydrostatique.
- *In 1970s : operational use of models is effective in numerous meteorological services*
 - *1979 : ECMWF model operational in Europe*
 - *1960-70 : most of models are quasi-geostrophic*
 - *1980-90 : hydrostatic models (primitive equations)*
 - *From 2000 : more and more non-hydrostatic models*



1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

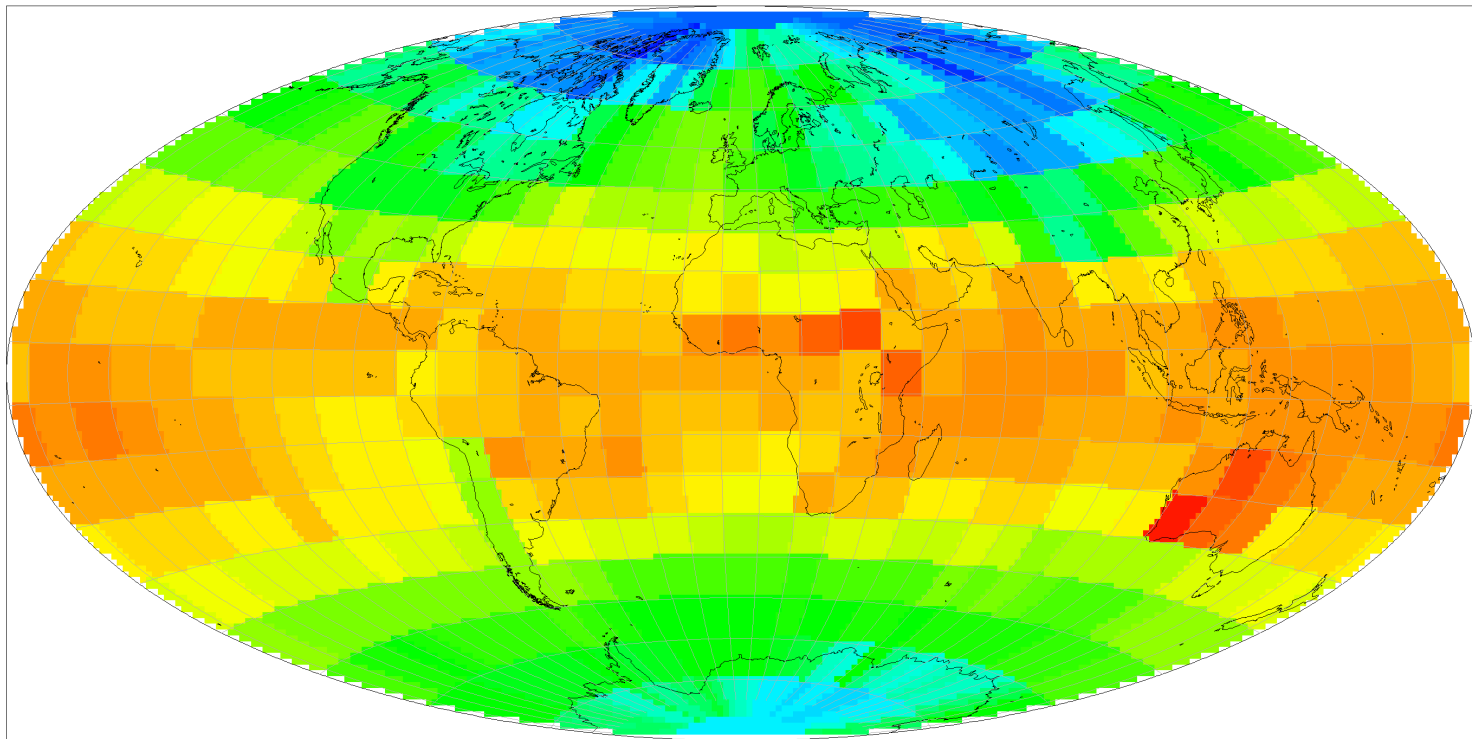
- La prévision numérique, c'est déterminer les valeurs futures des paramètres atmosphériques à partir de valeurs initiales, par le calcul numérique
= un problème aux conditions initiales
- Pour être manipulée par un ordinateur, l'atmosphère doit être discrétisée
- *Numerical prediction is to determine the values of atmospheric parameters in the future from some initial values, using numerical computation*
= an initial-value problem
- *To be handled by a computer, the atmosphere must be discretized*



1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Discrétisation horizontale de l'atmosphère
- *The horizontal discretization of the atmosphere*



resolution 10°

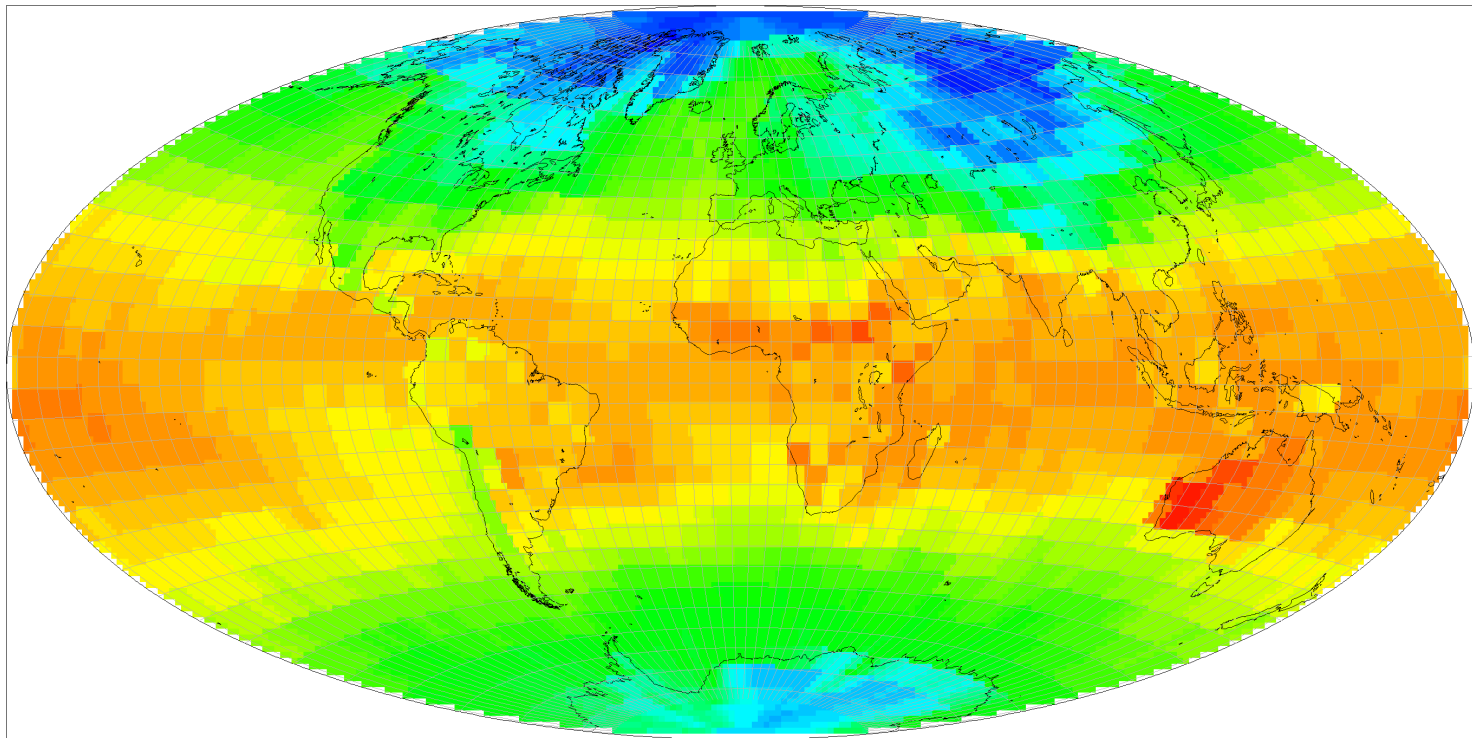


METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Discrétisation horizontale de l'atmosphère
- *The horizontal discretization of the atmosphere*



resolution 5°



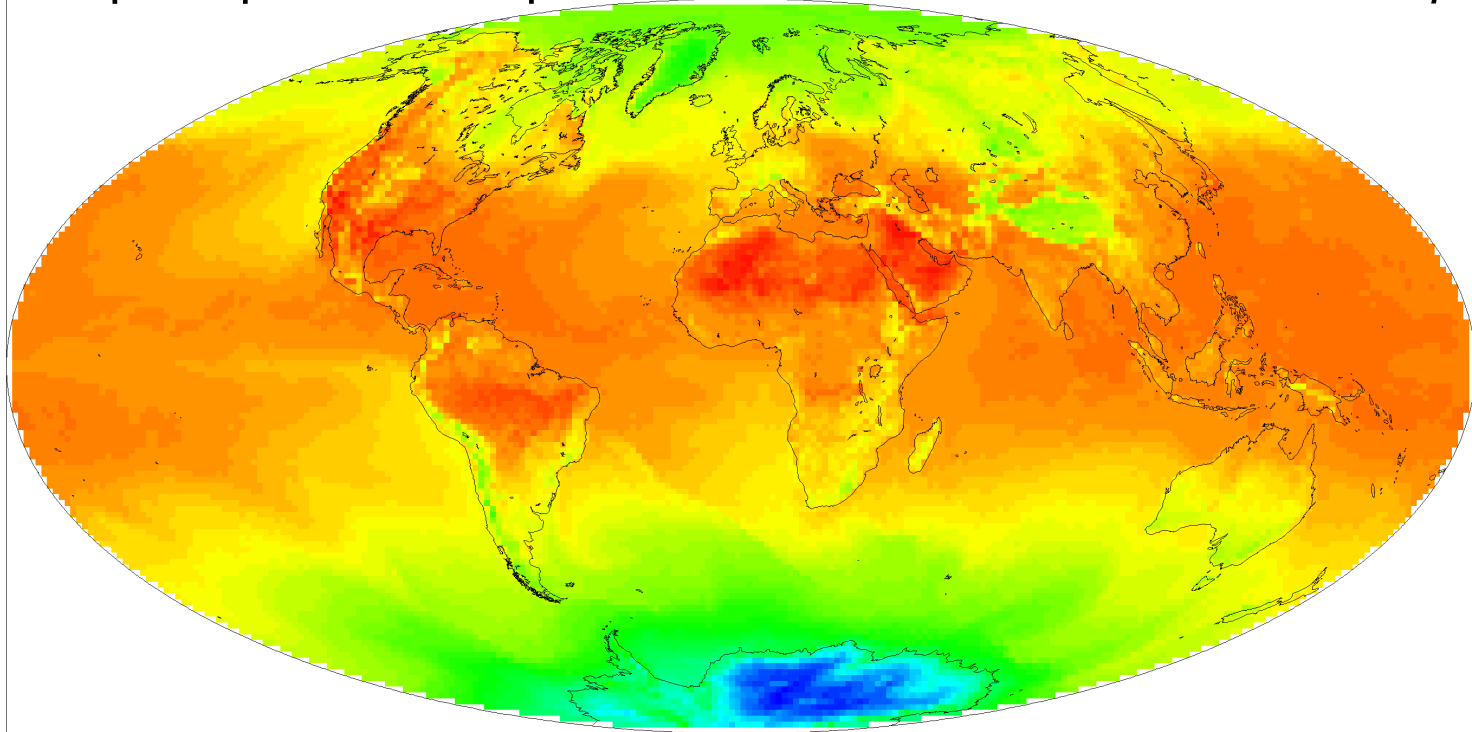
METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Discrétisation horizontale de l'atmosphère
Mais plus que de l'interpolation

- *The horizontal discretization of the atmosphere*
But more than interpolation



resolution 1° ($\approx$ 100 km)



METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Les grilles des modèles actuels :
 - Modèle global du CEPMMT : résolution 16 km, 137 niveaux verticaux
→ 110 000 000 points
 - Modèle ALADIN à aire limitée dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien : résolution 8 km, 70 niveaux verticaux
→ 38 000 000 points
 - Modèle AROME-Indien à aire limitée dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien : résolution 2.5km, 90 niveaux verticaux
→ 130 000 000 points
- The grids of present-day models :
 - *Global model from ECMWF: 16 km resolution, 137 vertical levels*
→ 110 000 000 points
 - *Limited-area ALADIN model in the South-West Indian Ocean : 8 km resolution, 70 vertical levels*
→ 38 000 000 points
 - *Limited-area AROME-Indian model in the South-West Indian Ocean : 2.5km resolution, 90 vertical levels*
→ 130 000 000 points
- L'**état** de l'atmosphère à un instant est donné par les valeurs des paramètres météorologiques en ces points (= **vecteur d'état**)
- *The atmospheric **state** at an instant is given by the values of the meteorological parameters at these points (= **state vector**)*



METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Pour effectuer une prévision, on doit se donner :
 - 1 - les valeurs de l'**état initial**; cet état s'appelle l'**analyse** ;
 - 2 - les **équations d'évolution** pour les paramètres caractérisant l'atmosphère, qui explicitent leurs tendances temporelles en tout point. Ces équations définissent le **modèle** ;
 - 3 - les **valeurs** prises par les paramètres sur la **frontière** du domaine à tout instant, qui définissent les **conditions aux limites** du problème.
 - **La qualité** de la prévision numérique dépend de la qualité du traitement de ces trois points.
- *In order to make a forecast, we need:*
 - 1 – the values of the **initial state**.
*This state is called the **analysis** ;*
 - 2 – the **equations of evolution** of these parameters, giving their temporal derivatives at every grid point in the volume V. These equations make the **model** ;
 - 3 – **The values** of parameters at the **boundaries** of the domain at every instant, which are the **boundary conditions**
 - *The forecast **quality** depends on the three above points.*



METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

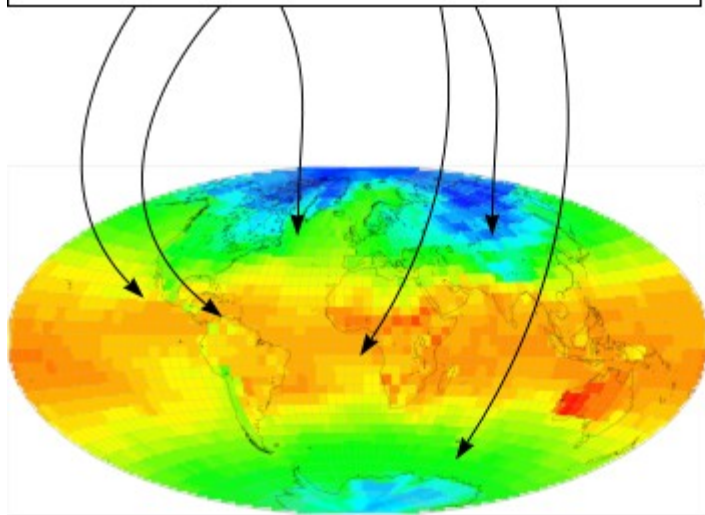
2 étapes pour la prévision
2 steps for the forecast

- Les 2 étapes principales :
l'analyse et la prévision

- *The 2 main steps : the
analysis and the forecast*

Observations météorologiques
(température, pression, vent,
mesurées au sol, par satellite, bouées...)

*Meteorological observations
(temperature, pressure, wind, ...
measured at the ground, by satellite, buoys, ...)*



Etat initial
Initial state



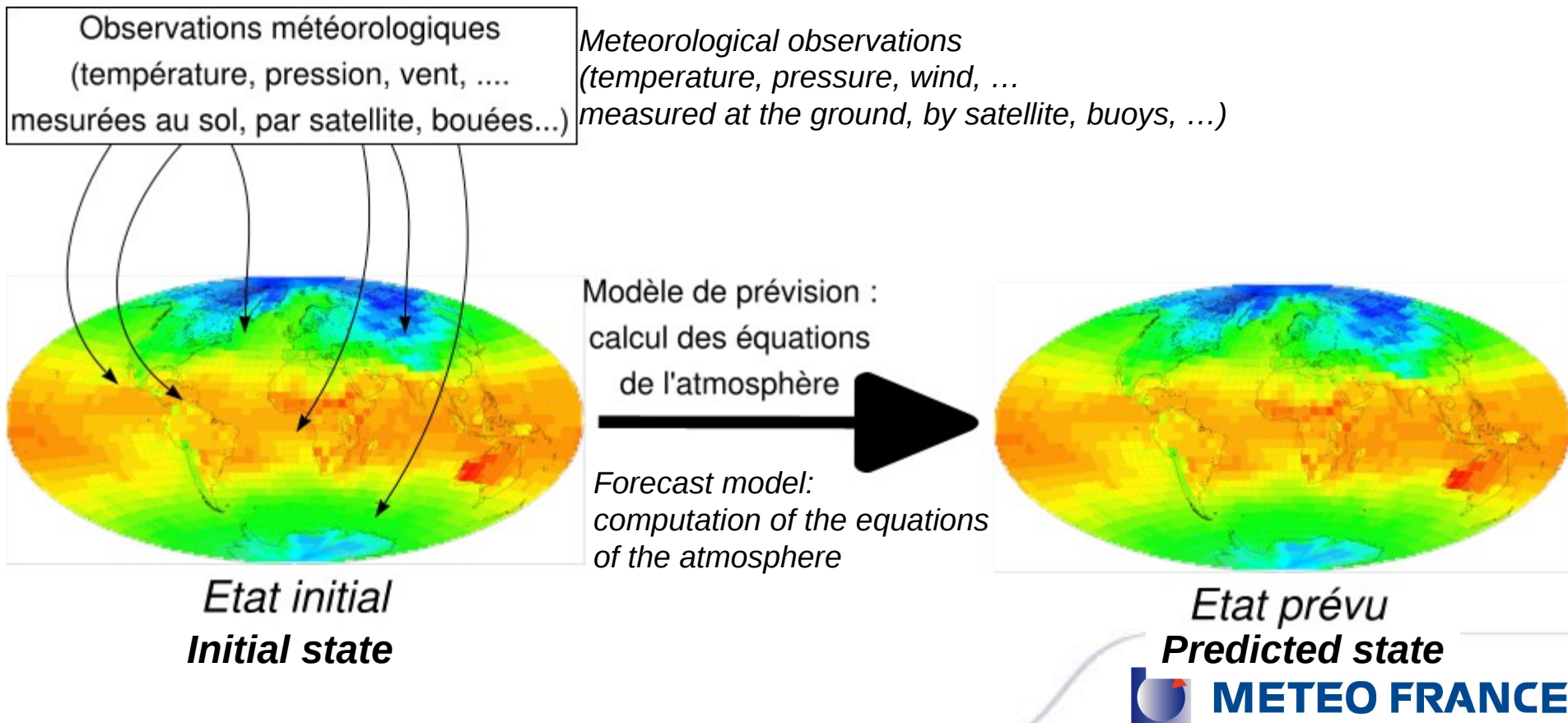
METEO FRANCE

1. Principes généraux / *General principles*

2 étapes pour la prévision
2 steps for the forecast

- Les 2 étapes principales :
l'analyse et la prévision

- *The 2 main steps : the
analysis and the forecast*



Plan

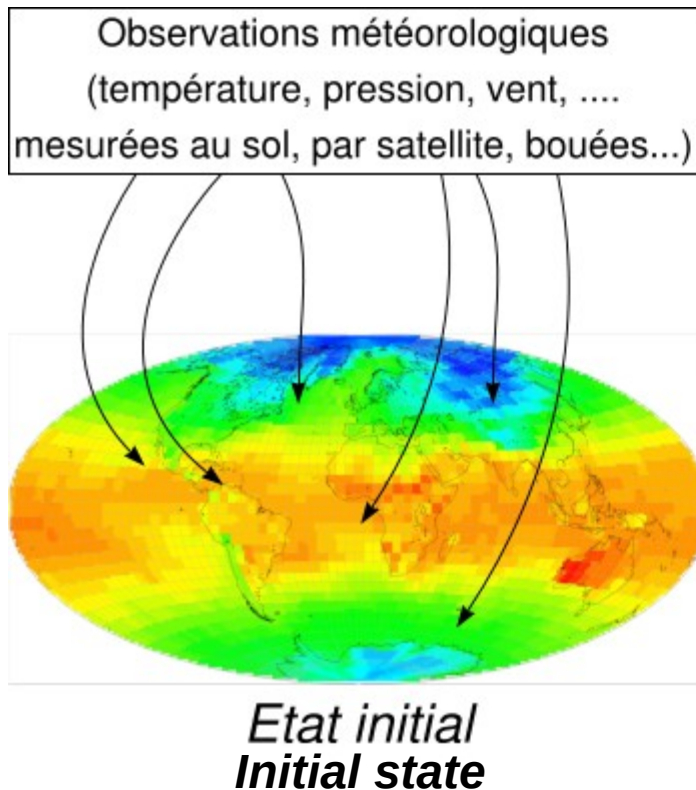
1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
 - Les observations météorologiques disponibles
 - Les algorithmes d'assimilation
 - Spécificités pour les cyclones
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

- 1. General principles*
- 2. The analysis (data assimilation)*
 - *The available meteorological observations*
 - *The algorithms of assimilation*
 - *Specificities for cyclones*
- 3. The forecast*
- 4. Present skill*
- 5. Next step : Arome-OM*
- 6. Conclusions and prospects*



2. L'analyse / *The analysis*

- Objectif : estimer l'état initial de l'atmosphère en utilisant des observations météorologiques
- Aim: to estimate the atmospheric initial state by using some meteorological observations



*Meteorological observations
(temperature, pressure, wind, ...
measured at the ground, by satellite, buoys, ...)*



METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

■ Types d'observations

- Les stations de surface et les radiosondages du réseau synoptique fournissent des **mesures directes** de ces données aux **heures synoptiques** mais de façon très **inhomogène** dans l'espace.
- Les systèmes spatiaux fournissent des **mesures indirectes** (radiances, ondes réfléchies) à des **heures quelconques** et de façon **inhomogène** dans l'espace.

■ *Types of observations:*

- *Which measures are available ? The soundings and synoptic stations give **direct measurements** of these parameters at **synoptic hours** but **not homogeneously** in space.*
- *Satellites make **indirect measurements** of these parameters (brightness temperatures, reflected waves) at **asynoptic hours** and **not homogeneously** in space.*

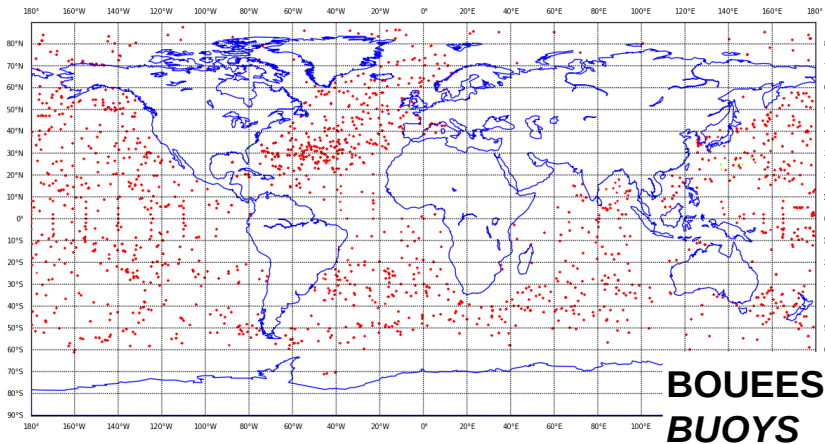


2. L'analyse / The analysis

METEO-FRANCE couverture de donnees - BUOY - 2015/08/30 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 9686

9638 BUOY
9 BATHY
28 TESAC

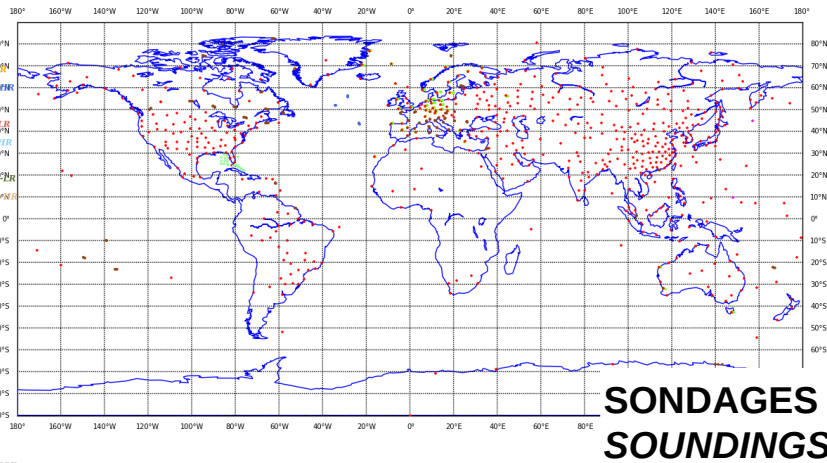


ARPEGE oper

METEO-FRANCE couverture de donnees - TEMP - 2015/08/30 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 1027

630 TEMP
167 TEMP/BUFR-LR
176 TEMP/BUFR-HR
2 TEMP-SHIP
0 TEMP-SHIP/BUFR-LR
17 TEMP-SHIP/BUFR-HR
29 TEMP-DROP
0 TEMP-DROP/BUFR-LR
0 TEMP-DROP/BUFR-HR
0 TEMP-MOBIL
0 TEMP-MOBIL/BUFR-LR
0 TEMP-MOBIL/BUFR-HR

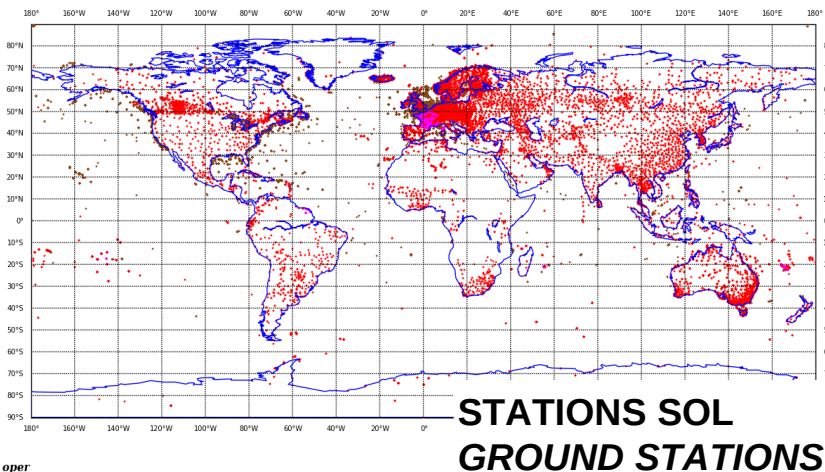


ARPEGE oper

METEO-FRANCE couverture de donnees - SYNOP/SHIP - 2015/08/30 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 35952

21754 SYNOP
6064 SHIP
166 SYNOR
7966 RADOME

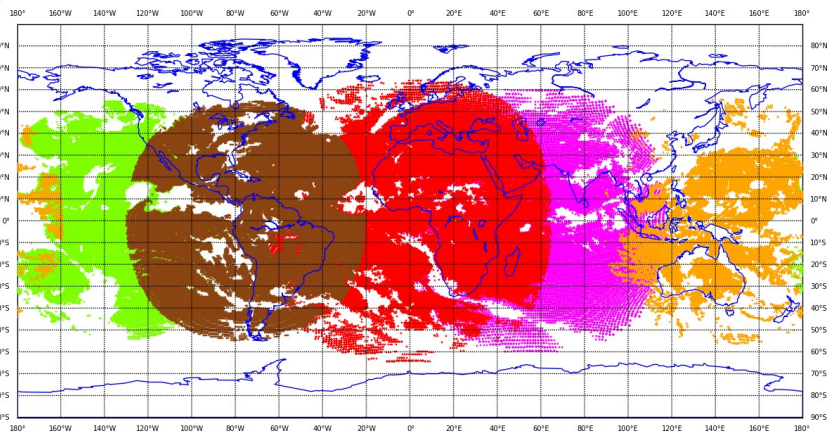


ARPEGE oper

METEO-FRANCE couverture de donnees - CSR - 2015/08/30 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 430758

149438 METEOSAT-10
103773 GOES-13
92719 GOES-15
60834 METEOSAT-7
21994 MTSAT-2



ARPEGE oper

GeoSat

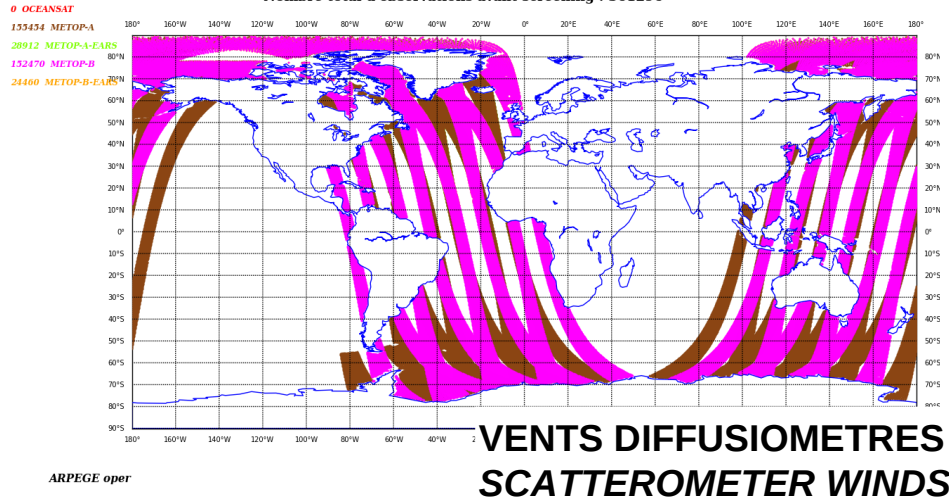
2. L'analyse / The analysis

Importance du réseau / Impact of assimilation time

00UTC

METEO-FRANCE couverture de donnees - SCATTEROMETER - 2015/08/30 00H UTC cut-off long

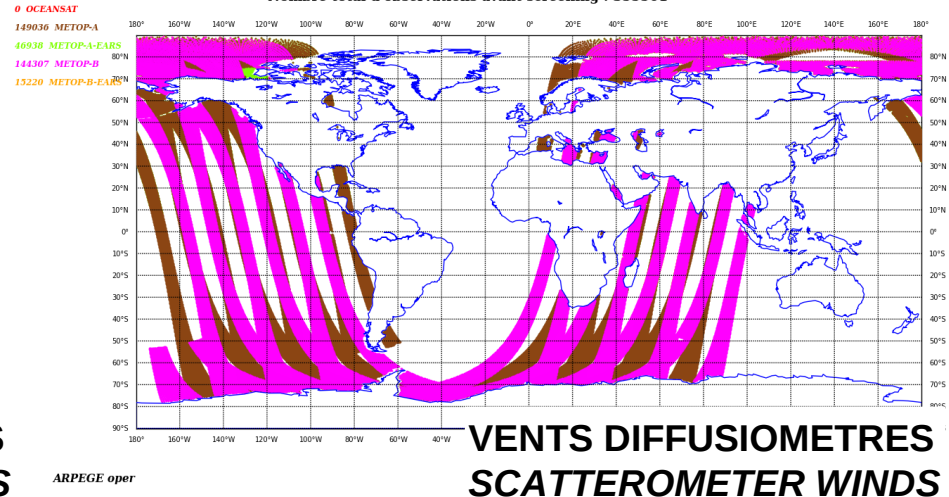
Nombre total d'observations avant screening : 361296



06UTC

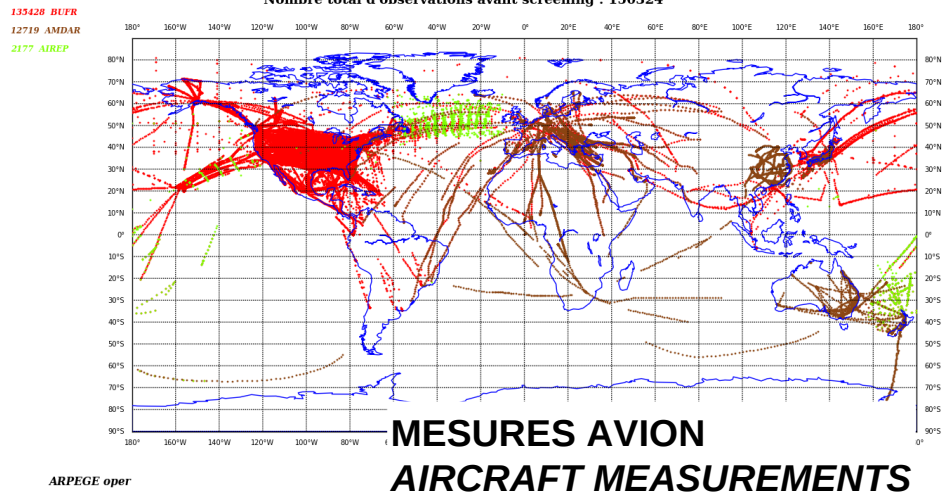
METEO-FRANCE couverture de donnees - SCATTEROMETER - 2015/08/30 06H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 355501



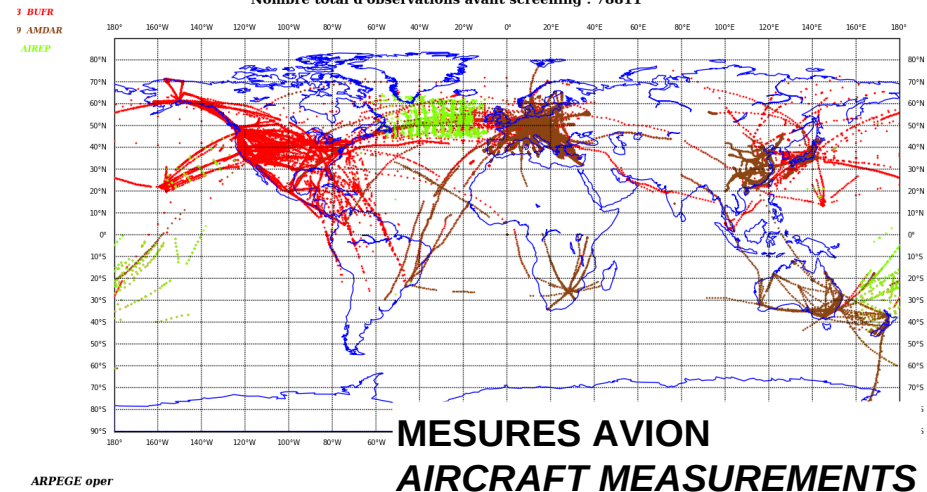
METEO-FRANCE couverture de donnees - AVIONS - 2015/08/30 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 150324



METEO-FRANCE couverture de donnees - AVIONS - 2015/08/30 06H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 78811



2. L'analyse / The analysis

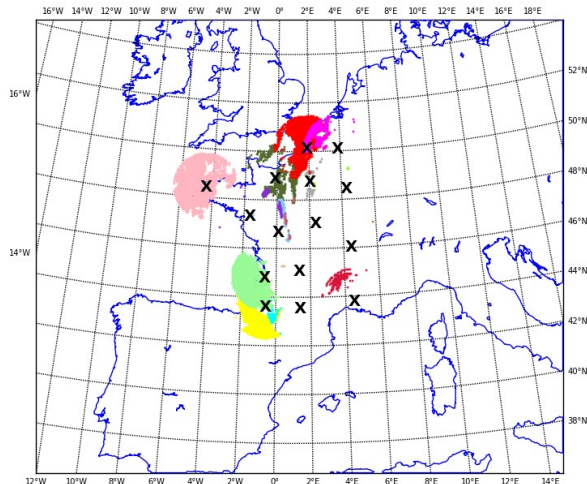
Importance du réseau / Impact of assimilation time

00UTC

METEO-FRANCE couverture de donnees - RADAR Vr - 2015/08/31 00H UTC

Nombre total d'observations avant screening : 7487

1269 ABBEVILLE
0 ALERIA
7 ARCIS/AUBE
331 AVESNES
0 BLAISY
0 BOLLENE
1260 BORDEAUX
23 BOURGES
116 CHERVES
0 COLLOMBIERES
711 FALAISE
4 GREZES
1211 MOMUY
0 MONTANCY
0 MONTCLAR
0 MI-MAUREL
0 NANCY
164 NIMES
0 OPOUL
1776 PLABENNEC
1 St-NIZIER
0 SEMBADEL
79 TOULOUSE
472 TRAPPES
61 TREILLERES



AROME France oper

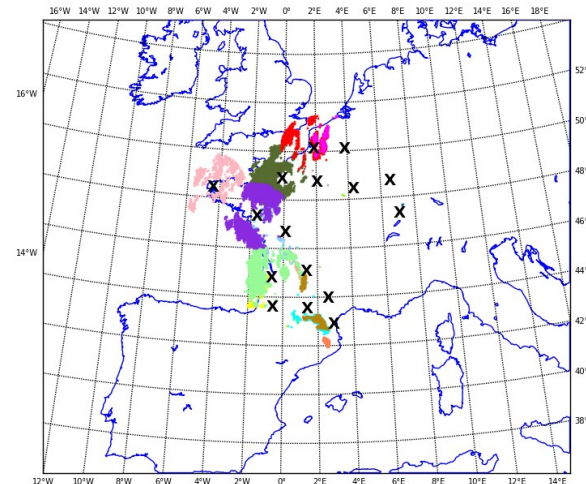
Radar : Vent Radial
Radar : Radial Wind

06UTC

METEO-FRANCE couverture de donnees - RADAR Vr - 2015/08/31 06H UTC

Nombre total d'observations avant screening : 6520

376 ABBEVILLE
0 ALERIA
2 ARCIS/AUBE
149 AVESNES
0 BLAISY
0 BOLLENE
962 BORDEAUX
0 BOURGES
302 CHERVES
0 COLLOMBIERES
1334 FALAISE
227 GREZES
244 MOMUY
2 MONTANCY
193 MONTCLAR
0 MI-MAUREL
2 NANCY
0 NIMES
64 OPOUL
633 PLABENNEC
0 St-NIZIER
0 SEMBADEL
272 TOULOUSE
63 TRAPPES
1253 TREILLERES



AROME France oper

Radar : Vent Radial
Radar : Radial Wind

Assimilation à haute résolution par le modèle Arome-France

High resolution assimilation in the Arome-France model

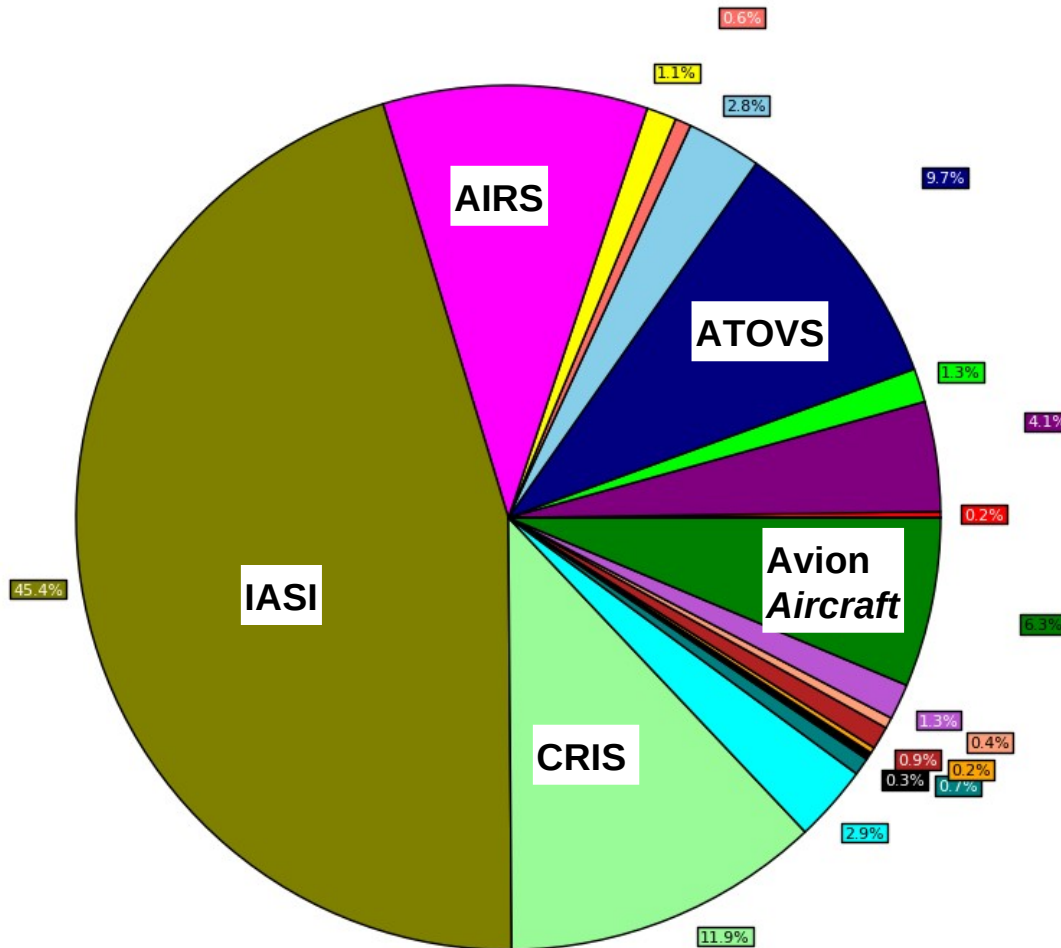


METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

GPS sol	0.2 %	ATMS	2.8 %	IASI	45.4 %	BOUEES	0.3 %	TEMP	1.3 %
GPS sat	4.1 %	SAPHIR	0.6 %	CRIS	11.9 %	SHIP	0.2 %	AVIONS	6.3 %
SATOB	1.3 %	SSMIS	1.1 %	GEORAD	2.9 %	SYNOP/RADOME	0.9 %	RADAR Vr	0.0 %
ATOVS	9.7 %	AIRS	9.9 %	SCATT	0.7 %	PILOT/PRF	0.4 %	RADAR Hu	0.0 %



Répartition des
observations assimilées
par le **modèle global**
Arpege

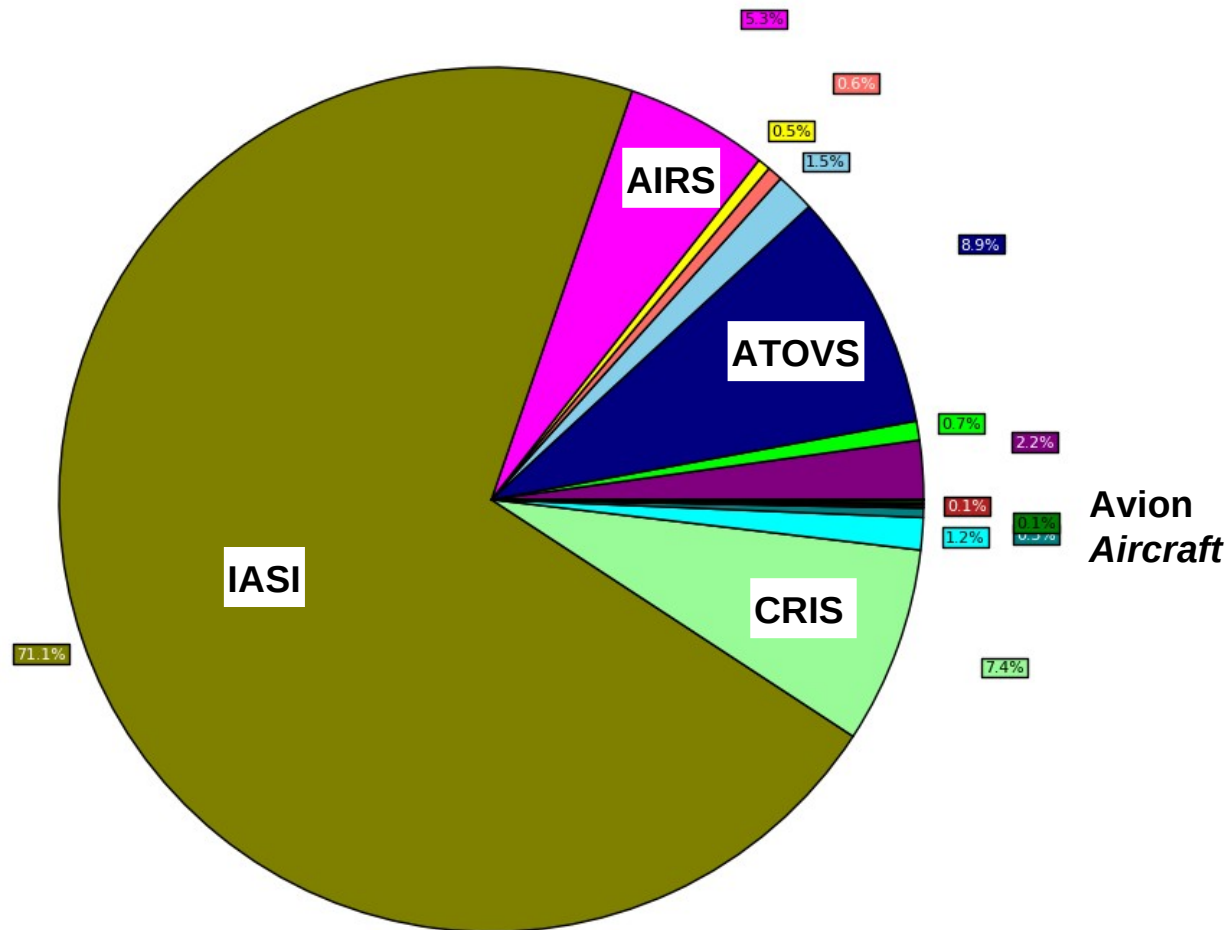
*Repartition of the
observations assimilated
in the **global model**
Arpege*

2. L'analyse / *The analysis*

Importance du domaine / *Impact of area*

GPS sol	0.0 %	ATMS	1.5 %	IASI	71.1 %	BOUEES	0.0 %	TEMP	0.0 %
GPS sat	2.2 %	SAPHIR	0.6 %	CRIS	7.4 %	SHIP	0.0 %	AVIONS	0.1 %
SATOB	0.7 %	SSMIS	0.5 %	GEORAD	1.2 %	SYNOP/RADOME	0.1 %	RADAR Vr	0.0 %
ATOVS	8.9 %	AIRS	5.3 %	SCATT	0.3 %	PILOT/PRF	0.0 %	RADAR Hu	0.0 %

Les observations
The observations

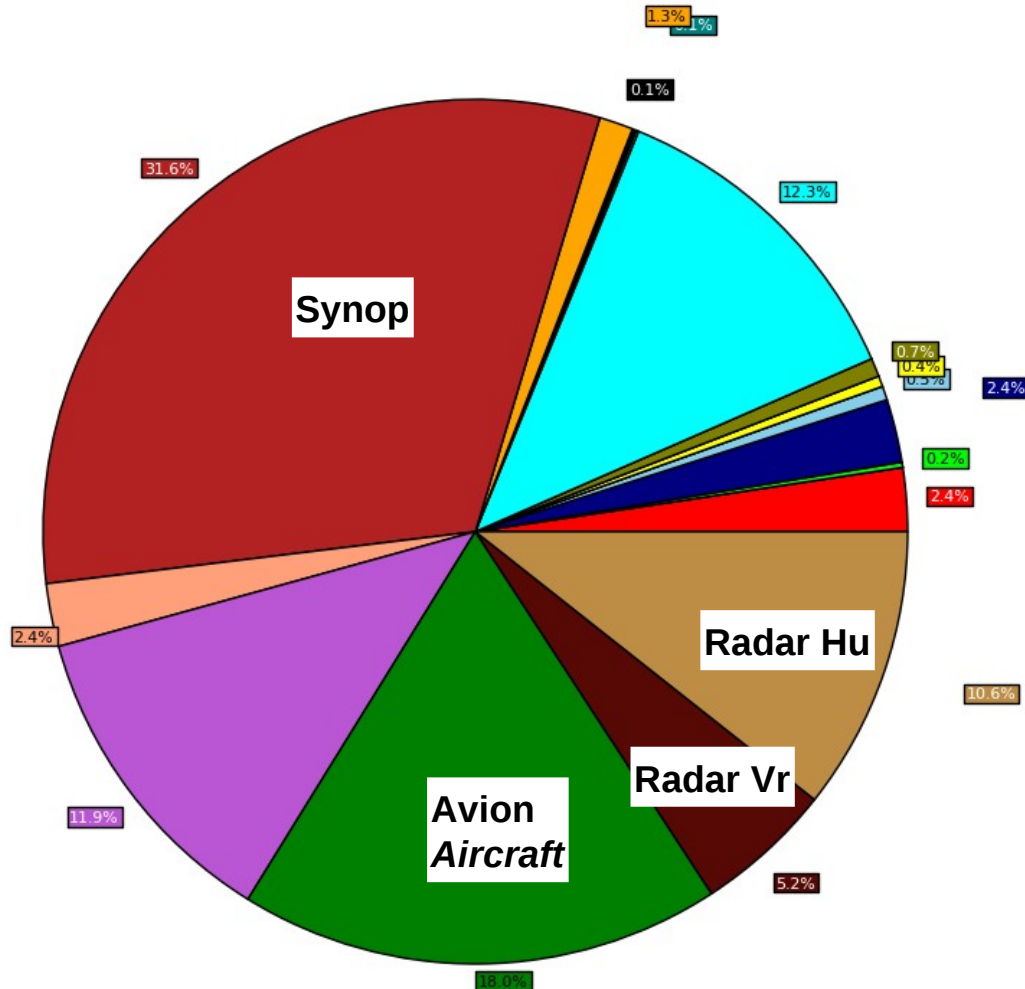
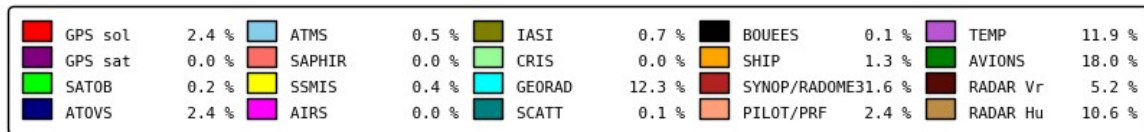


Repartition des
observation assimilées
par le modèle Aladin
(**bassin cyclonique**)

*Repartition of the
observations
assimilated in the
model Aladin (**cyclone
basin**)*

Importance de la résolution / *Impact of resolution*

Les observations *The observations*



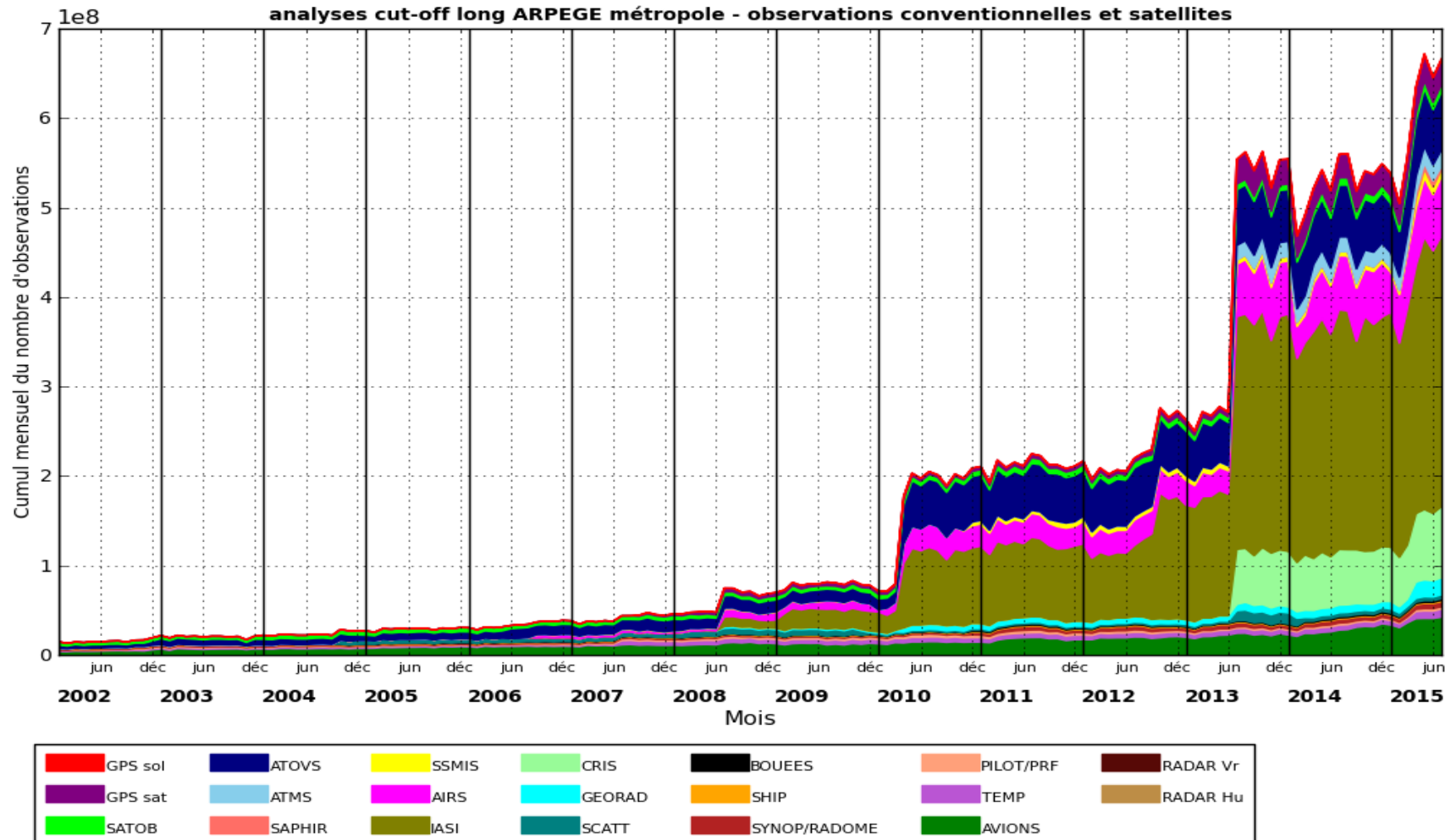
Repartition des observation assimilées par le modèle Arome France

*Repartition of the
observations
assimilated in the
model Arome France*

2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées par type d'observation



Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
 - Les observations météorologiques disponibles
 - Les algorithmes d'assimilation
 - Spécificités pour les cyclones
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

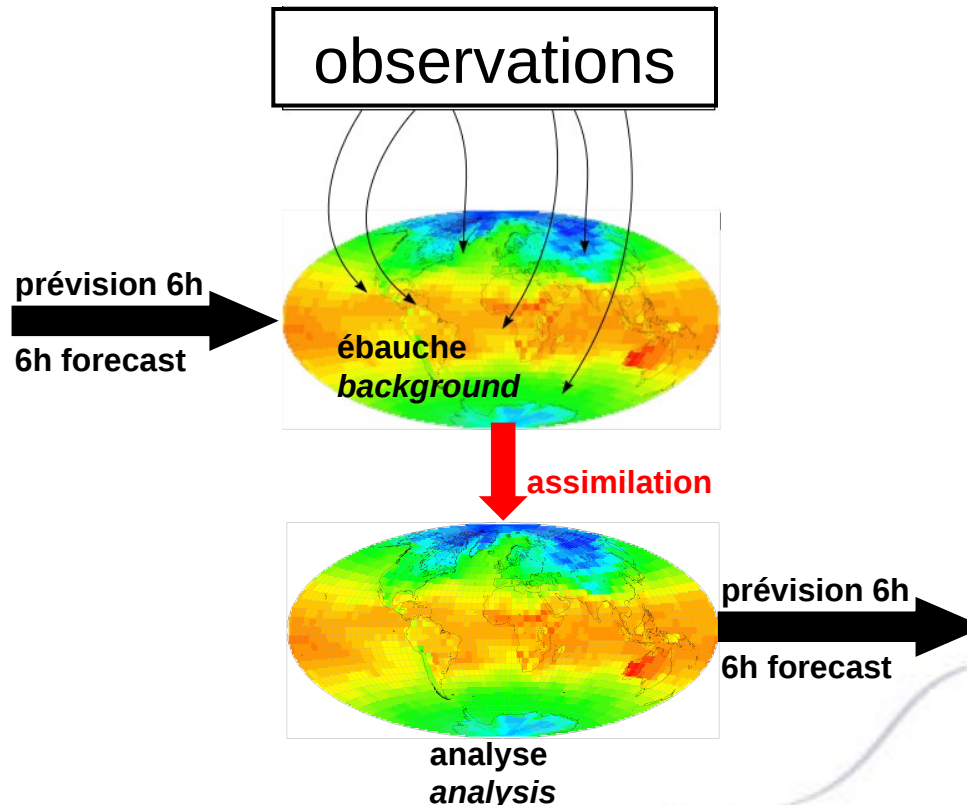
1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
 - *The available meteorological observations*
 - *The algorithms of assimilation*
 - *Specificities for cyclone*
3. *The forecast*
4. *Present skill*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*



2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Les observations sont **assimilées** dans une prévision provenant du passé récent : l'**ébauche**
- *The observations are **assimilated** in a forecast coming from the recent past: the **background***



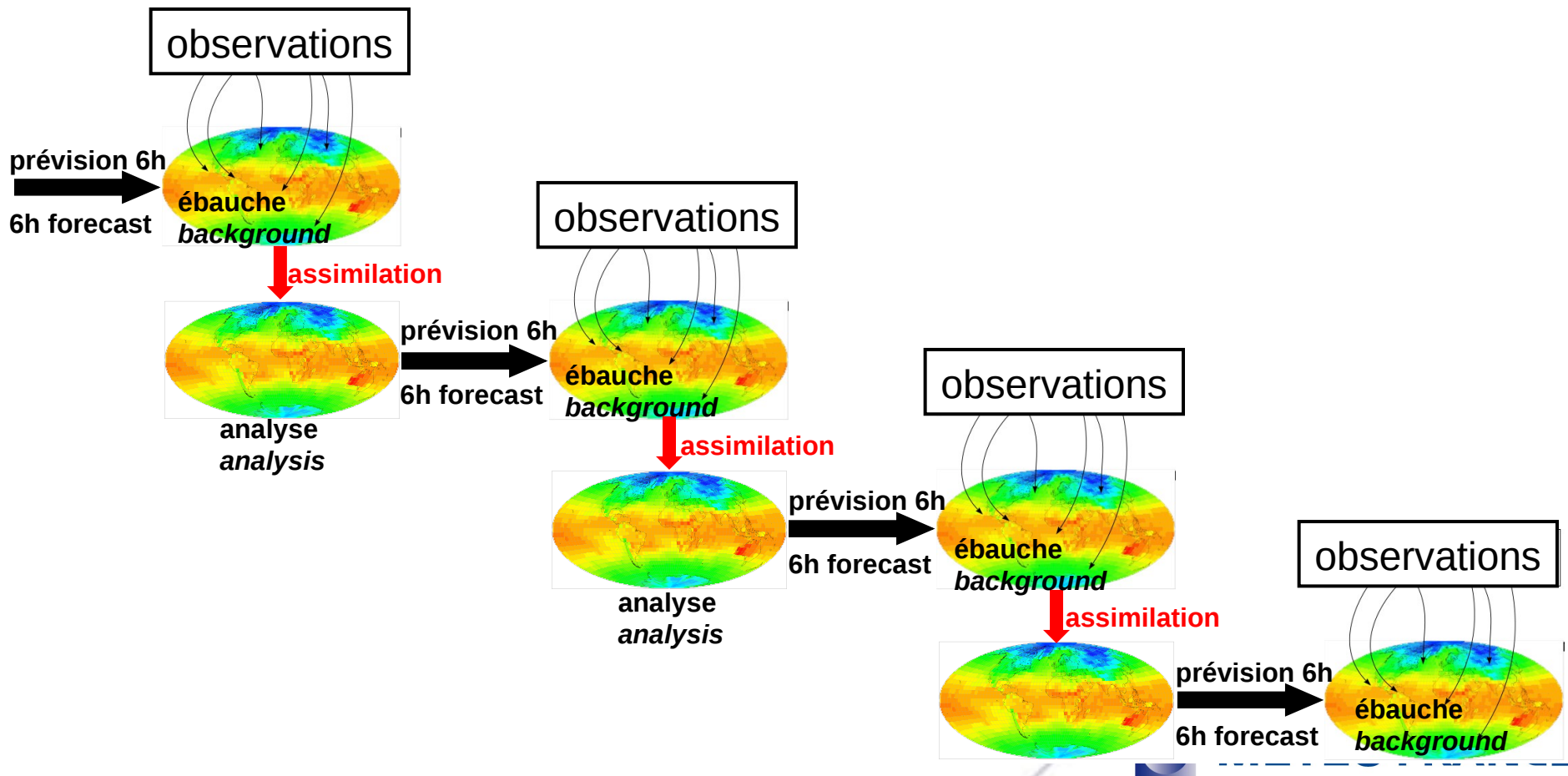
METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Le cycle d'assimilation :

- The assimilation cycle :*



2. L'analyse / The analysis

L'assimilation
The assimilation

- Le cycle d'assimilation :

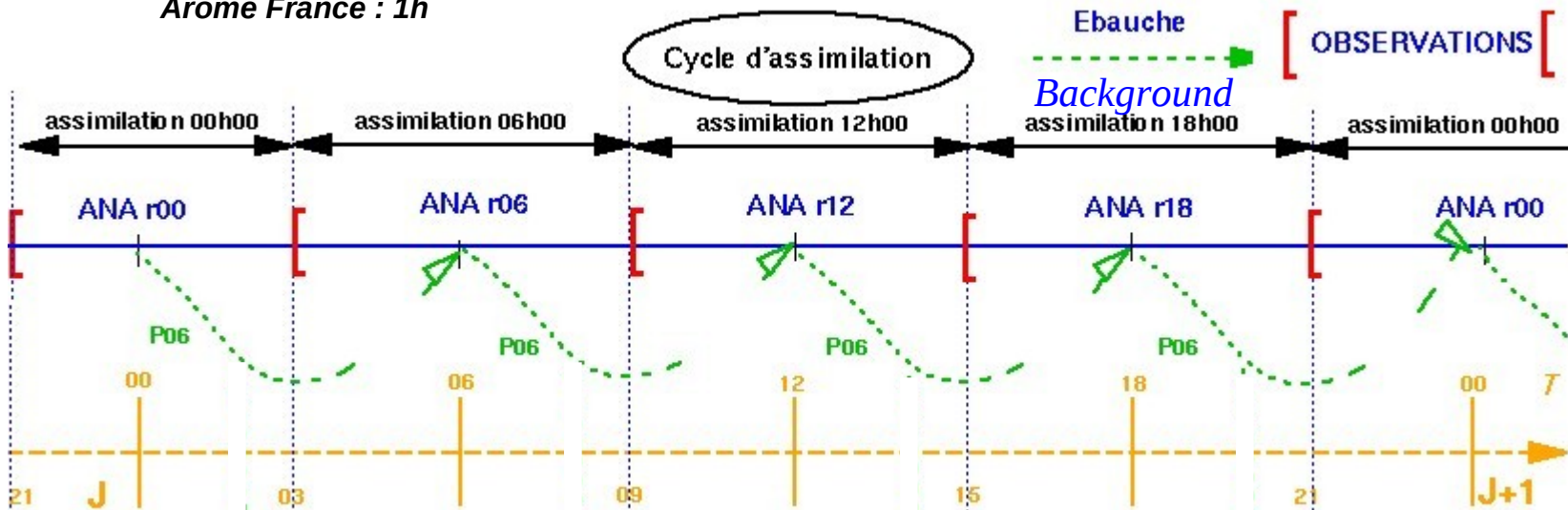
*La fenêtre temporelle pendant laquelle les observations sont prises en compte est définie par son **temps de coupure***

Arpège : 6h

Arome France : 1h

- The assimilation cycle :

*The time window during which the observations are integrated is defined by its **cut-off time***



METEO FRANCE

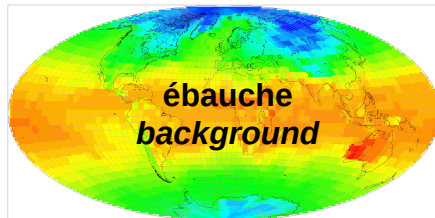
2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Assimilation des observations par estimation par les moindres carrés

- *The Assimilation of observations by least-square estimation*

$$X_a = X_b + K[Y - HX_b]$$

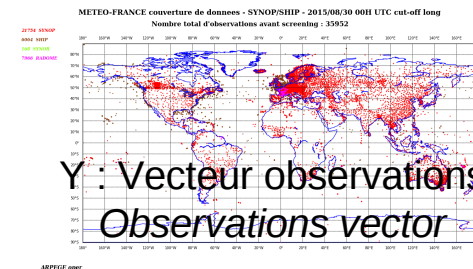


X_b : Vecteur ébauche
background vector

B : matrice de covariance d'erreur d'ébauche
covariance matrix of background error

$$K = B^t H (H B^t H + R)^{-1}$$

la meilleure estimation qui minimise la variance d'erreur
the best estimator that minimizes the error variance



R : matrice de covariance d'erreur d'observations
covariance matrix of observation error

H : opérateur d'observation
observation operator

2. L'analyse / *The analysis*

Méthodes de calcul
Methods of computation

- Méthodes de calcul de cette estimation :
 - Interpolation optimale
 - Filtre de Kalman
 - L'assimilation variationnelle
 - 3D-Var (ex Arpège)
 - 4D-Var (ex IFS)
 - Données dérivées
- *Methods of computation of this estimation:*
 - *Optimal interpolation*
 - *Kalman Filter*
 - *Variational assimilation*
 - *3D-Var (ex Arpège)*
 - *4D-Var (ex IFS)*
 - *Variables deduced from model*

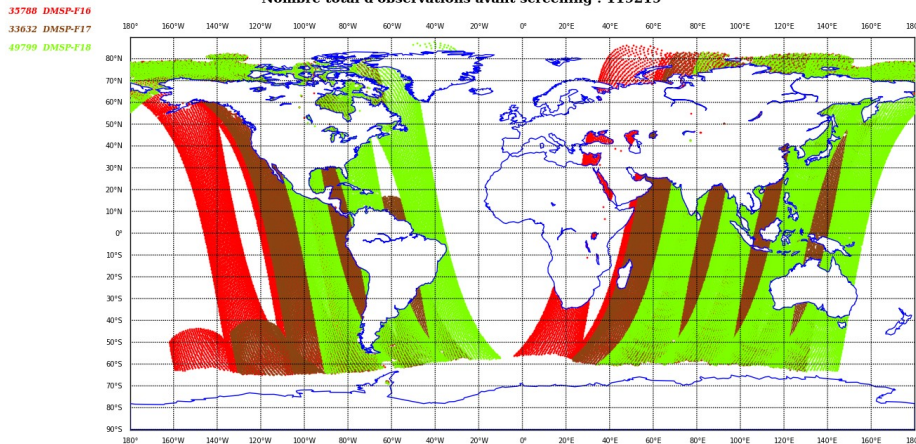


2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
L'assimilation

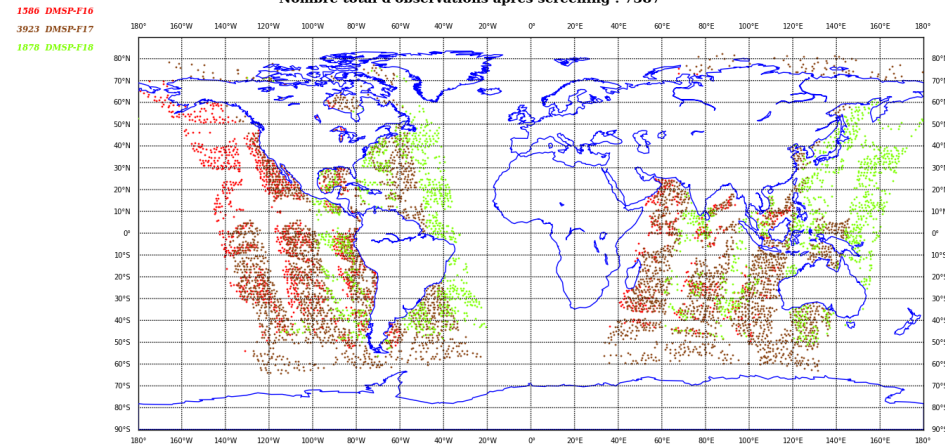
- Exemple de sélections des observations (radiances SSMI/S)
 - seulement mesures décorrélées (suffisamment éloignées)
 - seulement ciel clair
- Example of selected observations (radiances SSMI/S)
 - *only measures that are decorrelated (sufficiently away one to the others)*
 - *clear-sky only*

METEO-FRANCE couverture de donnees - SSMIS - 2015/08/30 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations avant screening : 119219



Before

METEO-FRANCE couverture de donnees - SSMIS - 2015/08/31 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations apres screening : 7387



ARPEGE oper

After



METEO FRANCE

Plan

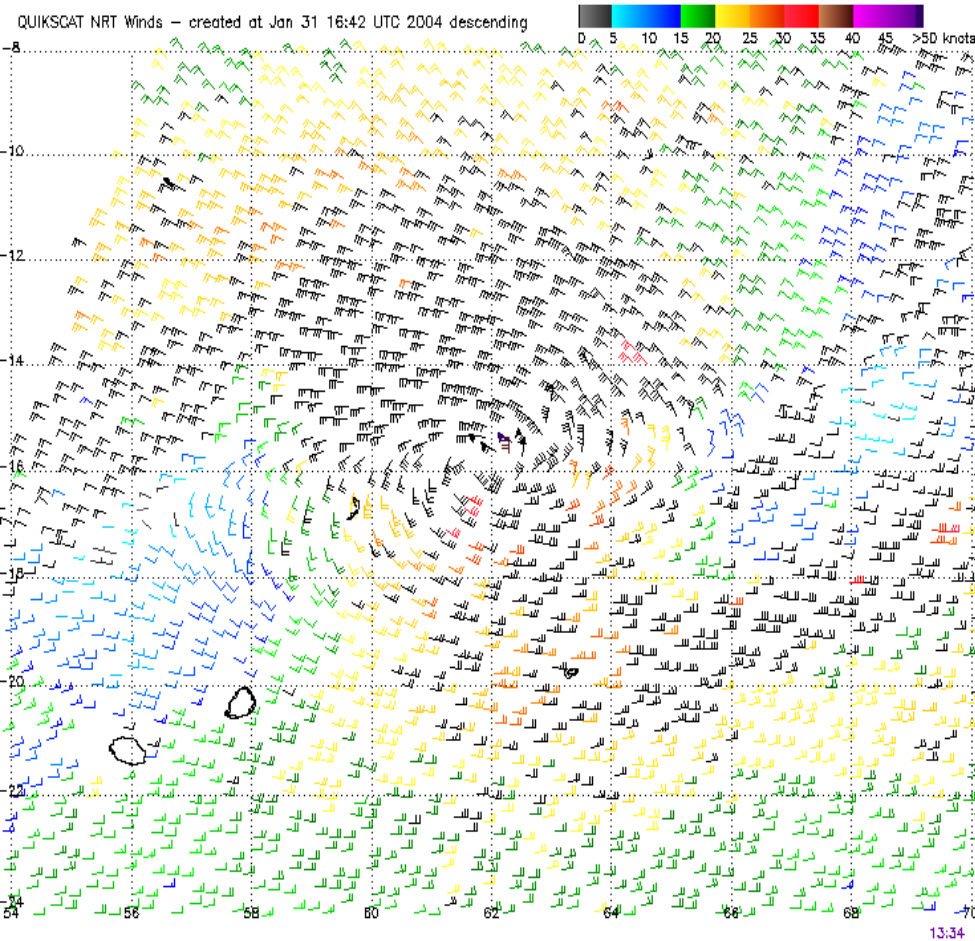
1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
 - Les observations météorologiques disponibles
 - Les algorithmes d'assimilation
 - Spécificités pour les cyclones
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
 - *The available meteorological observations*
 - *The algorithms of assimilation*
 - *Specificities for cyclone*
3. *The forecast*
4. *Present skill*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*

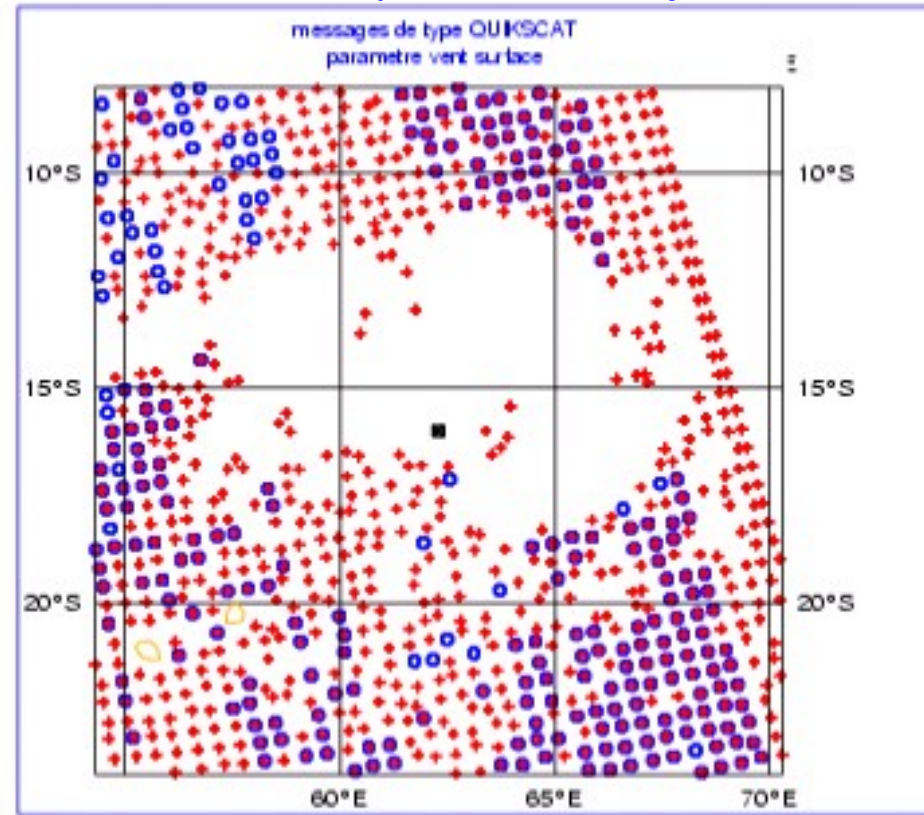


2. L'analyse / The analysis

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones



Observed QuikScat winds



Available QuikScat winds for the analysis :

+ not assimilated

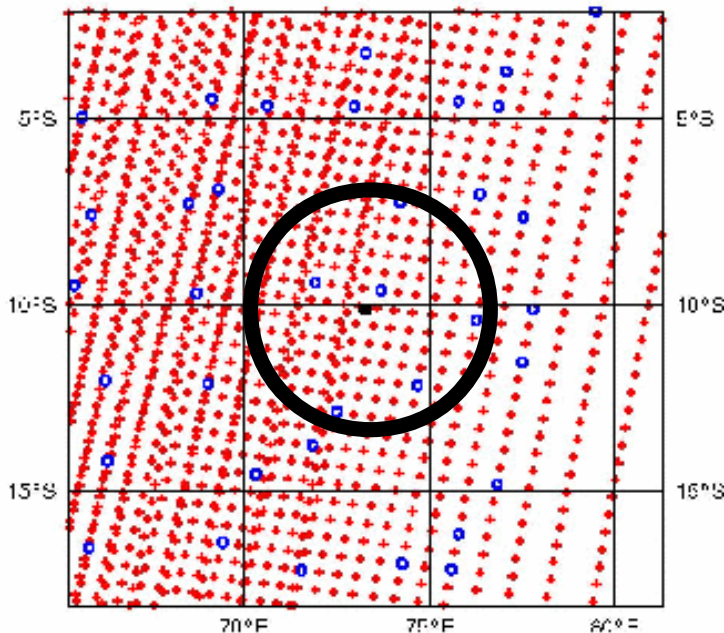
o assimilated



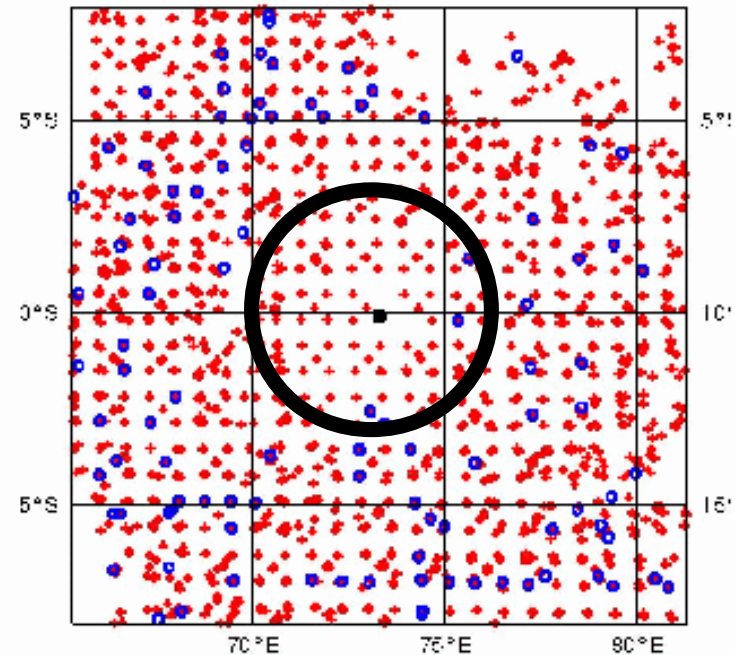
MÉTÉO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones



AMSU-A 12
(peak at 10 hPa)



SATO B winds



Manque d'informations dans le cyclone
Lack of information in the cyclone



METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones

- Les CMRS responsables du suivi des cyclones tropicaux diffusent en temps réel des informations sur le SMT contenant les **caractéristiques des systèmes dépressionnaires tropicaux**
- Ces informations sont issues de l'analyse des prévisionnistes
- Ces pseudo-observations permettent de **pallier en partie le déficit d'information** au coeur du cyclone.
- Disponible uniquement pour certains modèles utilisant le bogus
- *The RSMC issue in real time bulletins containing the **characteristics of the tropical depressions** on the GTS.*
- *These informations come from the forecasters analysis*
- *These pseudo-observations can partly **remedy the lack of information** in the cyclone*
- *Available only for some models using bogus*

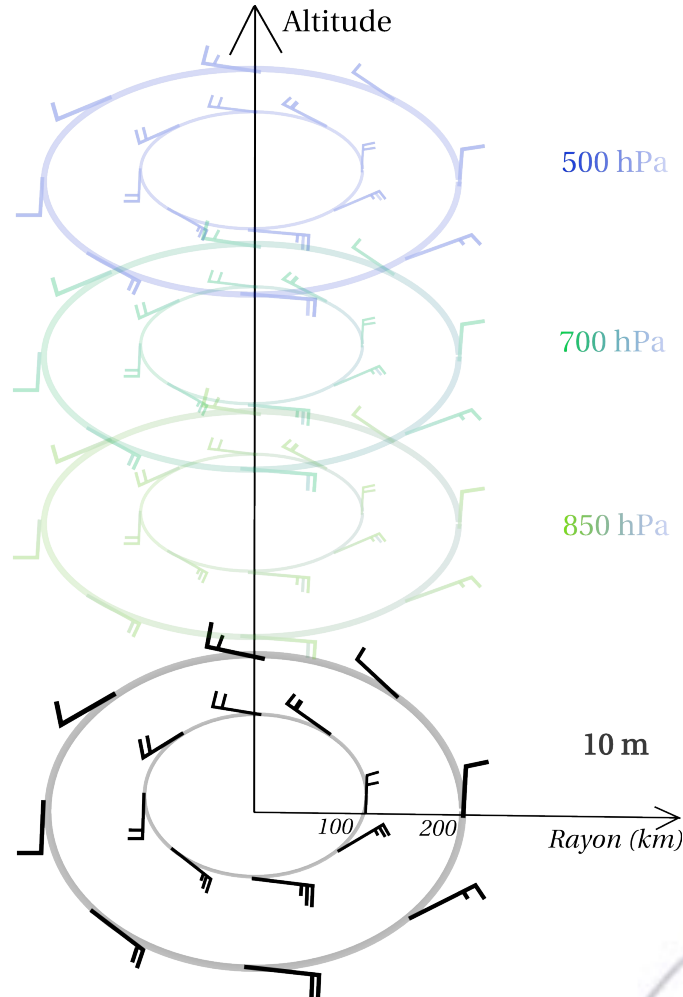


METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Bogus 3 D for Aladin

- Bogus de vent à 1000, 850, 700 et 500 hPa. Un facteur d'atténuation est appliqué avec l'altitude.
- En surface (1000 hPa), une convergence de 12° est appliquée au vecteur vent.
- A ce bogus symétrique est rajouté le **vecteur déplacement** sur les dernières heures (message cyclone) permettant de décrire les asymétries.



Spécificités pour les cyclones *Specificities for cyclones*

- *The bogus is made at levels 1000, 850, 700 and 500 hPa. Wind velocity is decreased with height.*
- *In surface (1000 hPa), a 12° convergence is added to the wind vector*
- *The **motion vector** is added to this axisymmetric vortex to create the asymmetries.*



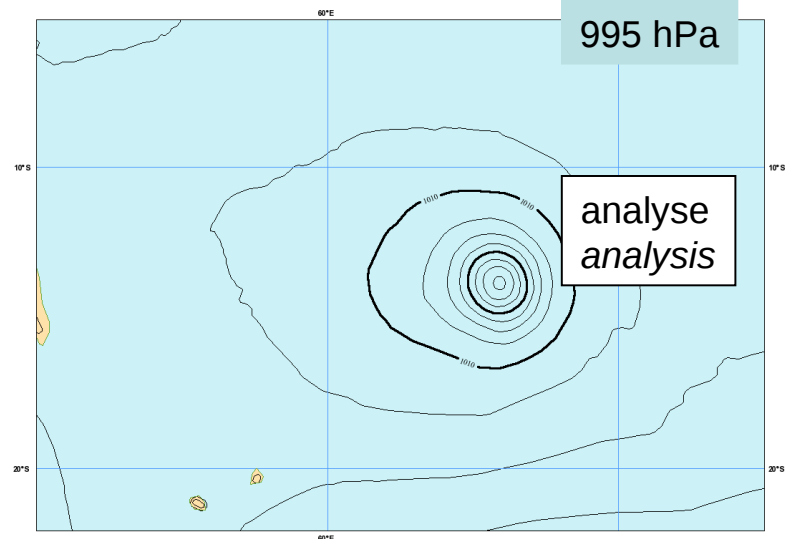
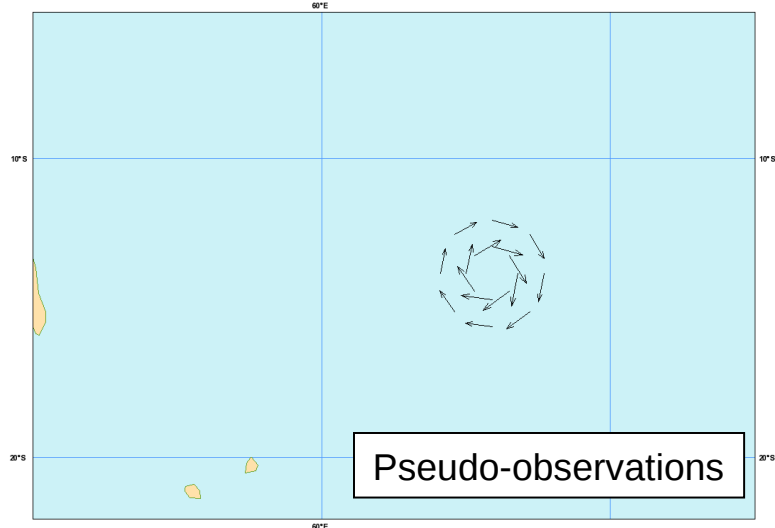
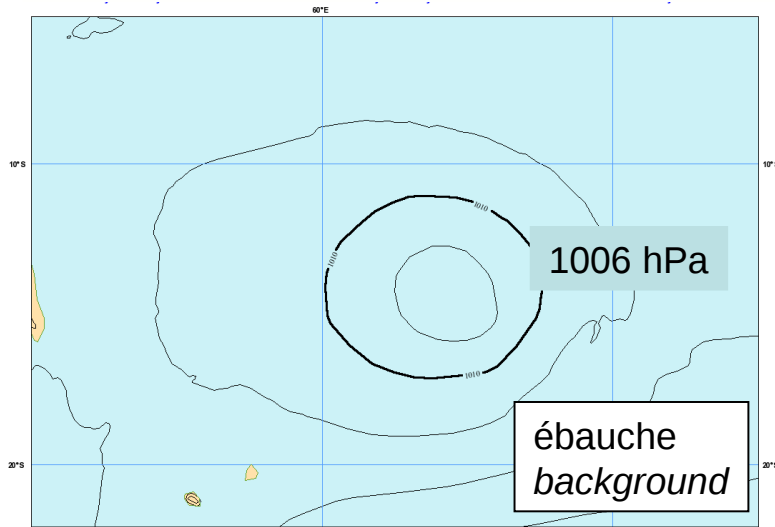
METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones

Effets du bogus :

- diminue l'erreur de position initiale
- améliore l'intensité du cyclone initial
- mais, perturbe l'environnement du cyclone



The effects of bogus :

- reduces the initial position error*
- improves the intensity of the cyclone initially*
- but, perturbs the environment of the cyclone*



METEO FRANCE

Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
 - Les équations d'évolution
 - Les paramétrisations physiques
 - Les conditions aux bords
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
 - *The equations of evolution*
 - *The physical parametrizations*
 - *The boundary conditions*
4. *Present skill*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*



3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- L'évolution de l'atmosphère est basée sur quelques **principes physiques** appliqués à un système fermé

- 1 - Equation du **mouvement** (Newton) : conservation de la quantité de mouvement.
- 2 - Equation de **continuité** : conservation de la masse.
- 3 - Equation pour la **vapeur d'eau** : conservation de la vapeur d'eau.
- 4 - Equation de la **thermodynamique** : conservation de l'énergie totale.

- *The atmosphere evolution is based on **physical principles***

- 1 – The **motion** equation (Newton) : momentum conservation
- 2 – **Continuity** equation : mass conservation
- 3 – **Water vapor** conservation
- 4 – **Thermodynamic** equation : total energy conservation



Dynamique
Dynamics



METEO FRANCE

3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- Les **processus physiques** d'échelle inférieure à la **résolution** du modèle, et qui participent cependant aux échanges avec l'extérieur, doivent être **paramétrés**. On cherche seulement à déterminer leur **effet moyen** sur les variables du modèle
- *The **physical processes** which take place at a smaller scale than the model **resolution** must be **parameterized** to approximate their **mean effect** on the model variables.*



Physique

Physics



METEO FRANCE

3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- $\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p - 2 \vec{\Omega} \wedge \vec{V} + \underline{F_f}$ Motion
- $\text{Div } \vec{V} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = 0$ Continuity
- $dU(T) = \delta U + \underline{\delta Q}$ (Travail + Chaleur) Energy
- $\frac{dq}{dt} = \underline{\text{Evaporation} - \text{Précipitation}}$ Water
- $p = \rho RT$

P : pressure; V(u,v,w) : Vecteur vitesse

ρ : density ; U : internal energy; T : temperature

q : water vapor content

— Terms which are the model physics (without these terms, the equations are adiabatic and without frictions)

3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- La simplification des équations d'origine

- Pellicule mince (épaisseur de l'atmosphère $\ll$ rayon de la terre)
- Équilibre hydrostatique (phénomènes d'échelles $>$ à 10 km) : on néglige l'accélération verticale (mais non le mouvement vertical)

→ équations primitives

- *The whole set of equations is simplified by a few approximations :*

- *Shallow layer (atmospheric layer thickness $\ll$ Earth radius)*
- *Hydrostatism (scales $>$ 10 km) : vertical acceleration is neglected (but not the vertical motion)*

→ *primitive equations*



3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- Ce sont des équations d'évolution pour les variables **pronostiques** :
 - le **vent horizontal** (deux composantes u et v),
 - la **température** de l'air T ,
 - la pression de surface P_s ,
 - l'**humidité spécifique** $q = M_{\text{eau}} / M_{\text{totale}}$
- *They are evolution equations for **prognostic** variables :*
 - **horizontal** wind (zonal and meridian components),
 - air **temperature** T ,
 - surface pressure P_s ,
 - **specific humidity** $q = M_{\text{water}} / M_{\text{total}}$
- On peut en déduire toutes les autres quantités = variables **diagnostiques** :
Géopotential, la vitesse verticale, le tourbillon, la divergence ...
- *All other quantities (= **diagnostic** variables) can be deduced from these variables :*
Geopotential height, vertical velocity, vorticity, divergence ...

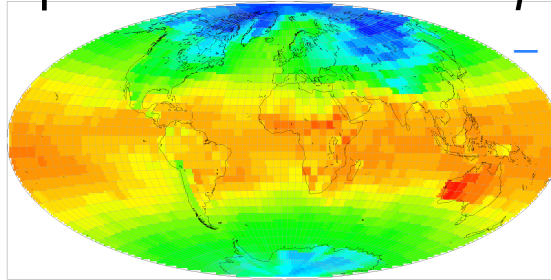


3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- Les équations d'évolution sont discrétisées dans l'espace

- Points de grille ou fonctions spectrales



- *The equations of evolution are spatially discretized*

- *Gridpoints or spectral functions*

- Et dans le temps, suivant un schéma d'avance temporelle

- *The equations are computed using a temporal advance scheme*

$$\frac{\partial Z(x,t)}{\partial t} = A[Z(x,t)]$$



$$Z(x, \Delta t) = Z(x, 0) + \Delta t \cdot A[Z(x, 0)]$$
$$Z(x, t + \Delta t) = Z(x, t - \Delta t) + 2\Delta t \cdot A[Z(x, t)]$$



METEO FRANCE

Plan

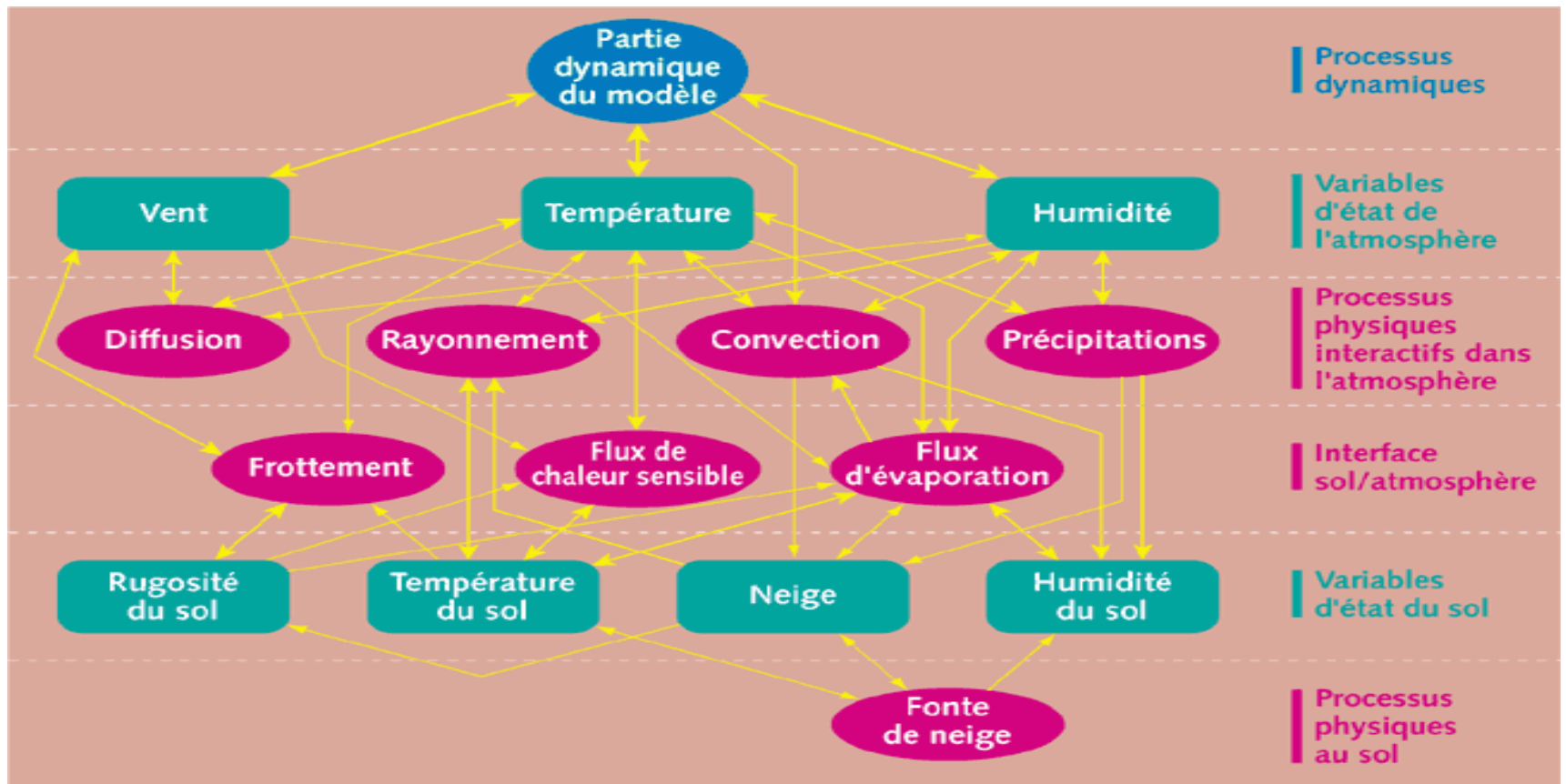
1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
 - Les équations d'évolution
 - Les paramétrisations physiques
 - Les conditions aux bords
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
 - *The equations of evolution*
 - *The physical parametrizations*
 - *The boundary conditions*
4. *Present skill*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*



3. La prévision / *The forecast*

Les processus physiques
The physical processes



METEO FRANCE

3. La prévision / *The forecast*

Les paramétrisations physiques
The physical parametrizations

- Les phénomènes physiques à paramétrer :
 - le rayonnement,
 - les échanges avec le sol/ocean et la diffusion turbulente,
 - les précipitations de grande échelle,
 - les effets de la convection,
 - L'effet des ondes de gravité orographiques.
- *Physical processes to parameterize :*
 - *The radiation,*
 - *Exchanges with the surface and turbulent diffusion,*
 - *Large scale precipitation,*
 - *convection,*
 - *Orographic gravity waves.*



3. La prévision / *The forecast*

Les paramétrisations physiques
The physical parametrizations

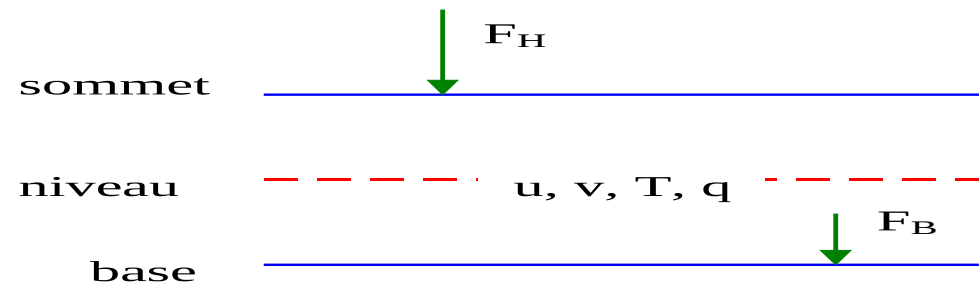
- On cherche à calculer **l'effet moyen** de ces processus sur les variables du modèle.
- On doit évaluer des **flux** (de quantité de mouvement, d'énergie et d'humidité) dus aux divers processus physiques à la base et au sommet de chaque couche du modèle.
- *It is the **mean effect** of these processes on the model variables which is estimated.*
- ***Fluxes** (momentum, energy, humidity) linked to the physical processes at the top and bottom of each layer must be estimated.*



3. La prévision / *The forecast*

Les paramétrisations physiques
The physical parametrizations

- Les termes de **source ou de puits** (de quantité de mouvement, d'énergie et d'humidité) permettant de calculer les tendances physiques sont donnés par le bilan des flux dans la couche.
- **Source and sink** terms (of momentum, of energy, of humidity) contributing to the tendencies are given by the balance of fluxes in each layer.



The diagram illustrates a vertical layer between a 'sommet' (top) and a 'base' (bottom). A horizontal blue line at the top is labeled 'sommet' on the left. A green arrow labeled F_H points downwards from above this line. A dashed red line in the middle is labeled 'niveau' on the left and contains the variables u, v, T, q . A horizontal blue line at the bottom is labeled 'base' on the left. A green arrow labeled F_B points downwards from above this line.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{F_H(X) - F_B(X)}{Z_H - Z_B}$$

3. La prévision / *The forecast*

Paramétrisation du rayonnement
Parametrization of radiation

- Compte tenu des profils de température et d'humidité, le calcul des **flux de rayonnement** prend en compte :
 - le rayonnement **solaire** (visible),
 - le rayonnement **atmosphérique** (infrarouge),
 - le rayonnement **terrestre** (infrarouge)
- Ces flux radiatifs contribuent au **réchauffement** ou au **refroidissement** des diverses couches atmosphériques.
- *The **radiation flux** takes into account :*
 - *the **solar** radiation (visible),*
 - *the **atmospheric** radiation (infra-red),*
 - *the **earth** radiation (infra-red)*
- *These radiative fluxes **warm or cool** the atmospheric layers.*



3. La prévision / *The forecast*

Paramétrisation du rayonnement
Parametrization of radiation

- Ces flux sont partiellement réfléchis par les **nuages**, d'une part et par la **surface du sol** d'autre part compte tenu de son **albédo**.
- La **température de surface** résulte de l'équilibre qui s'établit sous l'effet des flux énergétiques.
- *These fluxes are partially reflected by the **clouds**, and by the **soil surface** depending on its albedo*
- *The **surface temperature** results from the balance of the energetic fluxes*



3. La prévision / *The forecast*

Paramétrisation des précipitations de grande échelle
Parametrization of large-scale precipitation

- Principe général
 - **Elimination** de la vapeur d'eau en **sursaturation**.
 - **Précipitation immédiate** dans les couches inférieures.
 - Examen successif des couches de haut en bas
 - L'eau condensée dans la dernière couche (la plus basse) constitue la **précipitation de grande échelle**.
- *General principle*
 - *No **supersaturated** wated*
 - ***Straight precipitation** in underlying layers*
 - *Layers are examined from top to bottom*
 - *The condensated water of the bottommost layer is the **large scale precipitation**.*



Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
 - Les équations d'évolution
 - Les paramétrisations physiques
 - Les conditions aux bords
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

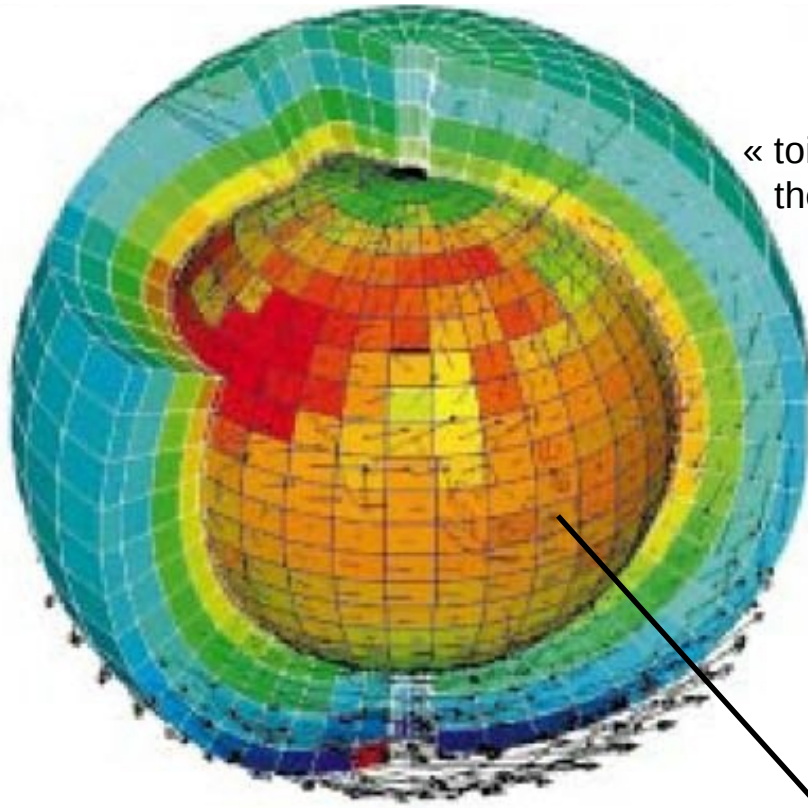
1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
 - *The equations of evolution*
 - *The physical parametrizations*
 - *The boundary conditions*
4. *Present skill*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*



3. La prévision / *The forecast*

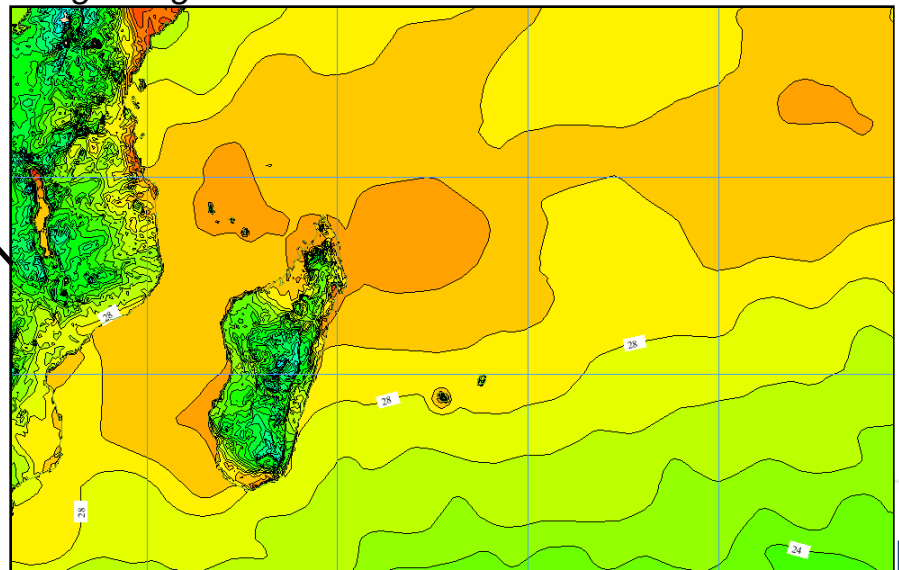
Les conditions aux bords
The boundary conditions

« toit » du modèle très haut (~ 100 km 0.1hPa)
the « top » of the model is very high (~ 100 km 0.1hPa)



surface : paramètres météorologiques donnés à chaque début de prévision

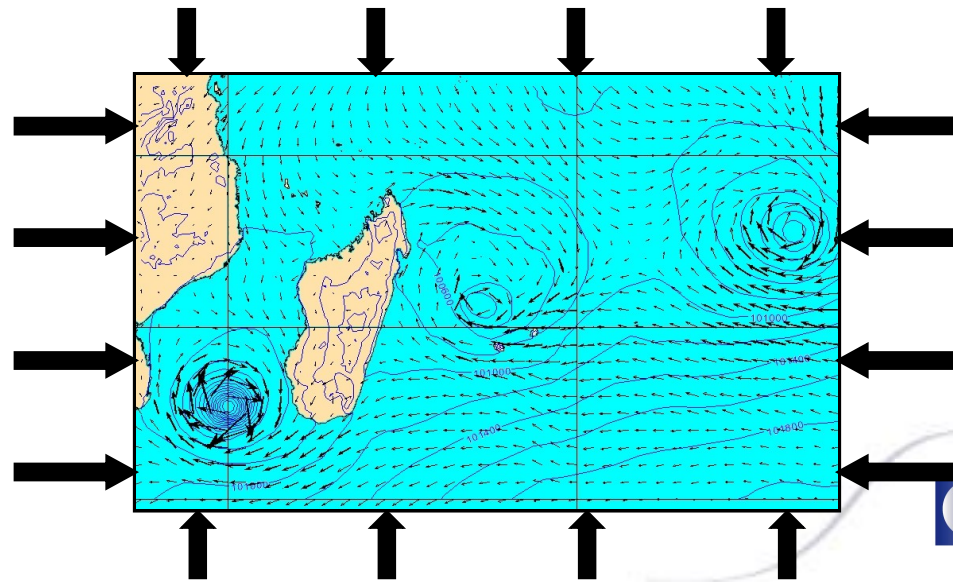
surface: meteorological parameters given at the beginning of each forecast



3. La prévision / *The forecast*

Les conditions aux bords
The boundary conditions

- Les conditions aux bords du domaine d'un modèle à aire limitée sont les variables météorologiques prévues par un modèle global (le **modèle coupleur**), fournies à intervalles réguliers (la **fréquence de couplage**)
- *The boundary conditions of the domain of a limited-area model are the meteorological variables predicted by a global model (the **coupling model**), given at fixed intervals (the **coupling frequency**)*



METEO FRANCE

Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. Performances actuelles
 - Evolution globale des modèles
 - Les modèles pour la prévision des cyclones et méthodes
 - Evolution des performances en trajectoires
 - Evolution des performances en intensité
 - Performances sur la saison 2014-2015
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
4. *Present skill*
 - *Overall improvement of models*
 - *Several models for cyclone forecast and methods*
 - *Evolution of scores about track*
 - *Evolution of scores about intensity*
 - *Scores for the 2014-2015 season*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*



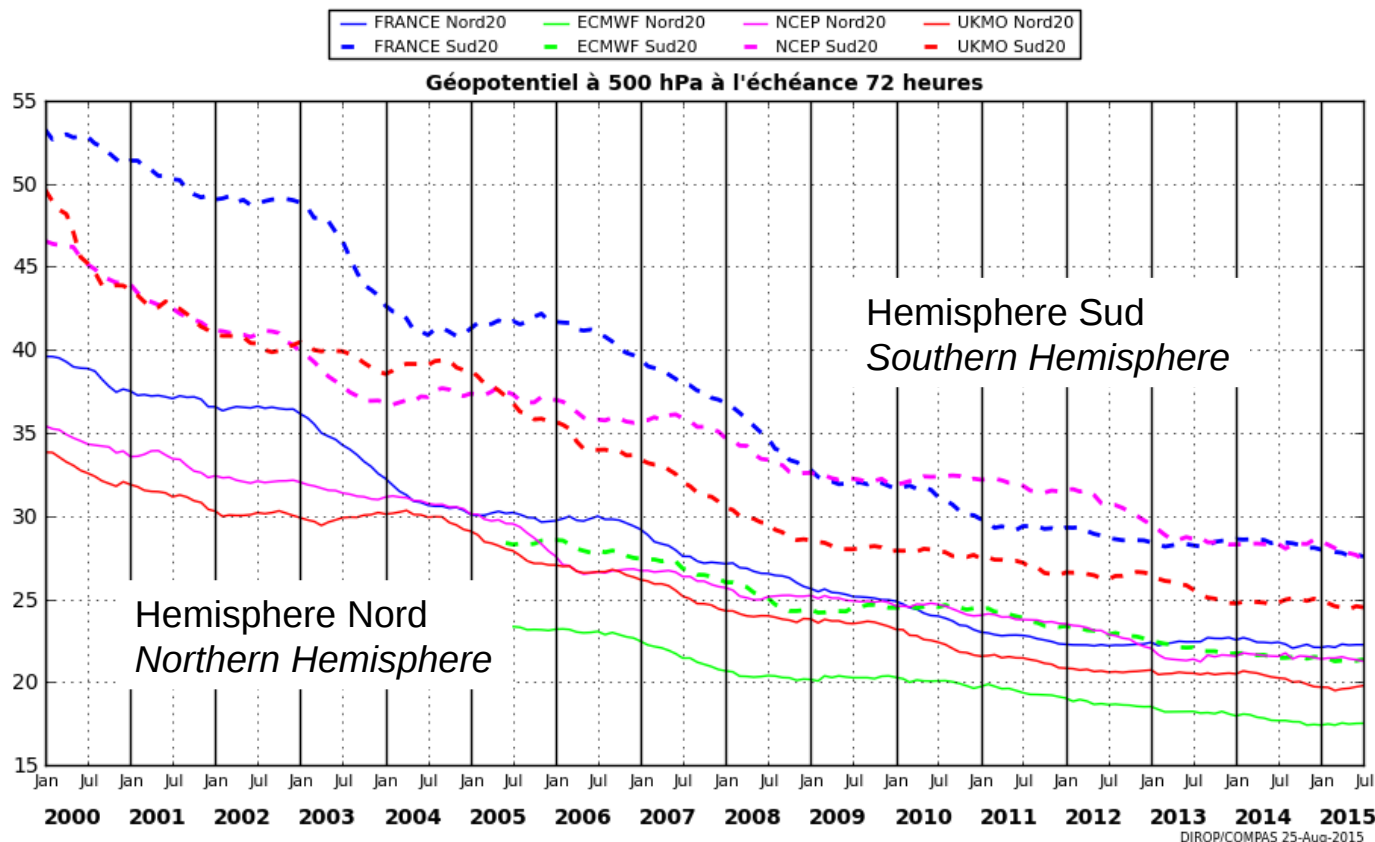
4. Performances actuelles

Present skill

- Evolution des scores des principaux modèles globaux : EQM Z500

- *Evolution of the scores of the principle global models : STD Z500*

Evolution des EQM (en mètres) par rapport aux analyses de différents modèles sur les domaines NORD20 et SUD20



4. Performances actuelles

Present skill

Quelques modèles
Some models

RSMC	CI from 12 to 48h (step 12h) 06 and 18UTC		Vmax from 12 to 72h (step 12h) 00, 06, 12 and 18UTC								Vmax from 12 to 120h (step 12h) 00, 06, 12 and 18UTC					
ARPEGE	T298C3 5L31 80km 72h at 00UTC 72h at 12UTC	T298C3 5L41 80 km 96h at 00UTC 72h at 12UTC	T358C2 4L41 60 km 102h at 00UTC 72h at 06UTC 72h at 12UTC 60h at 18UTC	New physics	84h at 12UTC	New physics L46	T538C2 4 L60 40 km		New physics (ECUME)	T798C2 4L70 30 km	New physics (Anti-Arpégeades)	4Dvar For short assimilation	More satellite Observations	More plane Observations	T1198C2 2 L105 20km	
															102h at 00UTC 72h at 06UTC 114h at 12UTC 60h at 18UTC	
Aladin-Réunion						Beginnig of Aladin-Réunion Bourbon01 9.5km L46 54h at 00UTC 42h at 12UTC	L60	Domain Extension 84h at 00UTC 84h at 12UTC	New physics (ECUME)	8km L70	New physics (Anti-Arpégeades)	More satellite observations				
IFS	T511L60 40km 240h		Update earlier		T799L91 25km 240h at 00 and 12UTC				T1279L91 15km 240h at 00 and 12UTC			T1279 L137	New convection		New micro-physique	
GFDN	110 and 18km L18 84h at 00 and 12UTC	55 and 18 km	L42 New physics (convection)	126h at 00, 06, 12 and 18UTC	55, 18 And 9 km	New physics (fluxes and microphysics)		Ocean-1D coupling		New physics (deep convection)		New physics (shallow convection) Ocean-3D Coupling				
Years	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	



METEO FRANCE

4. Performances actuelles

Present skill

Performances sur les cyclones
Skill about cyclones

- Evolution au fil des saisons → évolution globale des modèles
- Mais attention à la variabilité des saisons pour définir des tendances
 - Lissage sur 5 ans ou droite de tendance
 - Référence : persistance de la tendance sur 12h par rapport à la Best-Track
 - $\text{Gain} = \frac{|ErreurRef| - |ErreurModele|}{|ErreurRef|}$
 - erreur faible et gain faible : saison facile
 - erreur faible et gain fort : bonne prévision sur cas difficiles
- *Evolution over the years → evolution of numerical models*
- *But beware about the seasonal variability to define trends*
 - *Smoothing over 5 years or trendline*
 - *Reference = persistence of the trend on 12h compared to Best-Track*
 - $\text{Gain} = \frac{|RefError| - |ModelError|}{|RefError|}$
 - *small error and small gain : season easy to predict*
 - *small error and strong gain : good forecast on difficult cases*



4. Performances actuelles

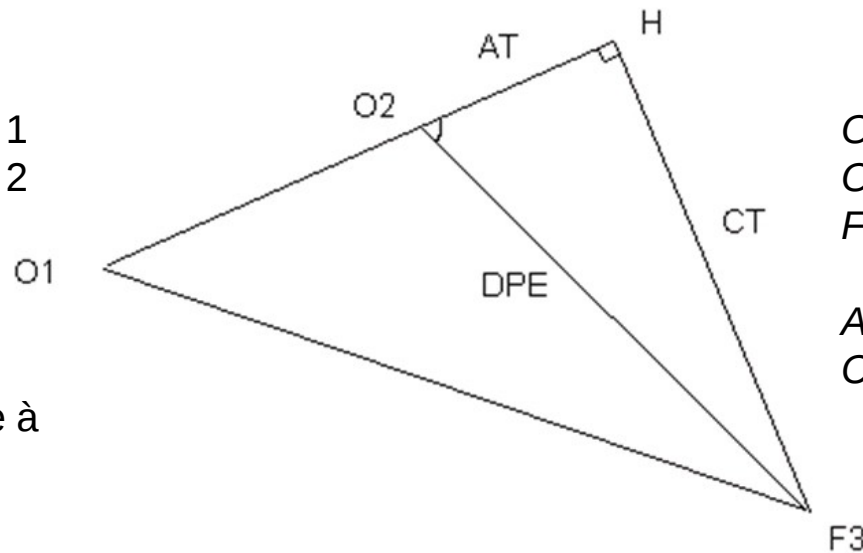
Present skill

Performances sur les trajectoires
Skill about tracks

- $DPE = \text{erreur directe de position} > 0$
- $\text{Gain DPE} = \frac{|ErreurRef| - |ErreurModele|}{|ErreurRef|}$
- $DPE = \text{Direct Position Error} > 0$
- $\text{Gain DPE} = \frac{|RefError| - |ModelError|}{|RefError|}$

O1 : observation à l'instant 1
O2 : observation à l'instant 2
F3 : Prévision de O2

AT : Erreur le long de la
trajectoire
CT : Erreur perpendiculaire à
la trajectoire



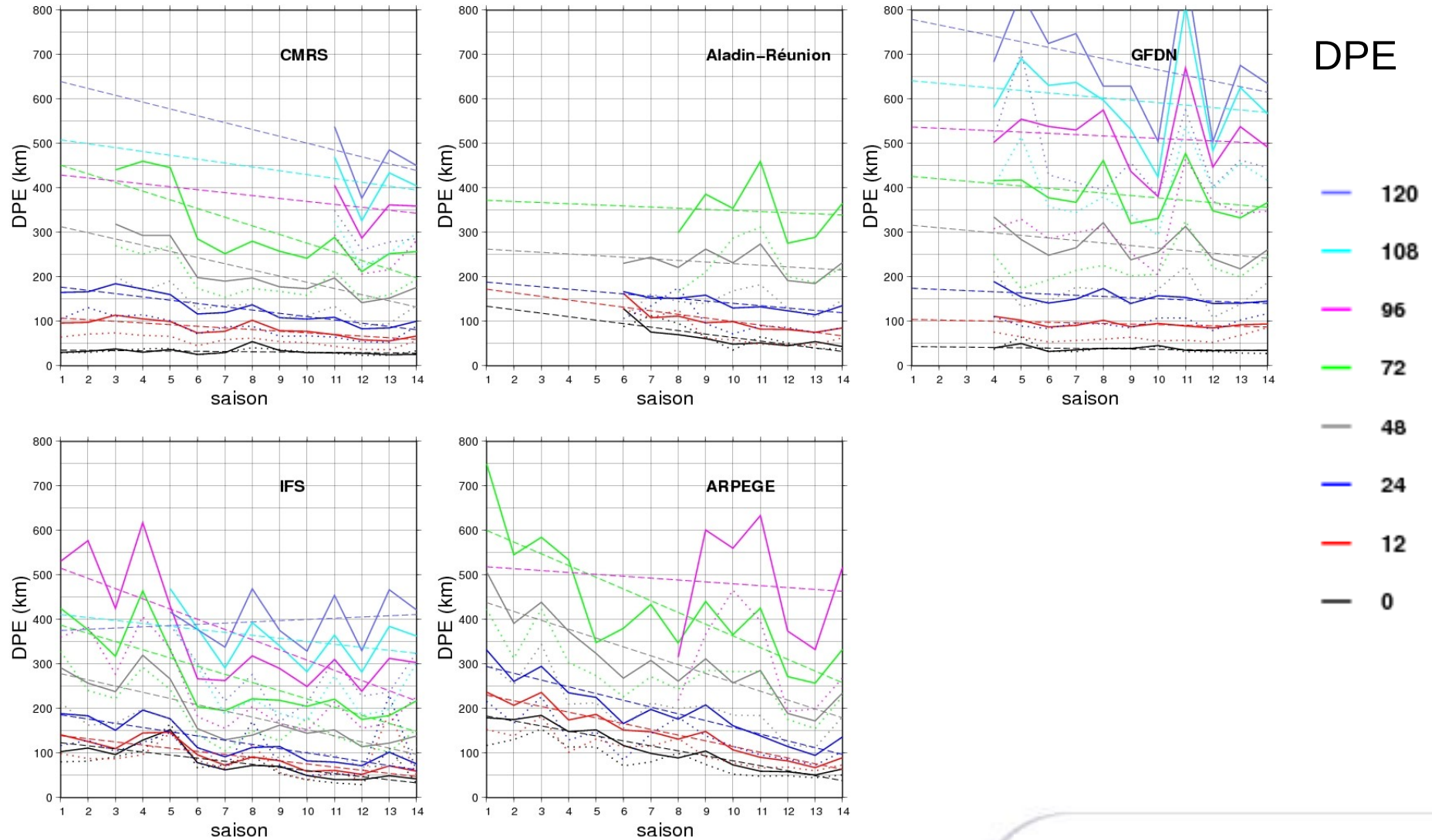
O1 : observation at time 1
O2 : observation at time 2
F3 : forecast of O2

AT : Along Track Error
CT : Cross Track Error



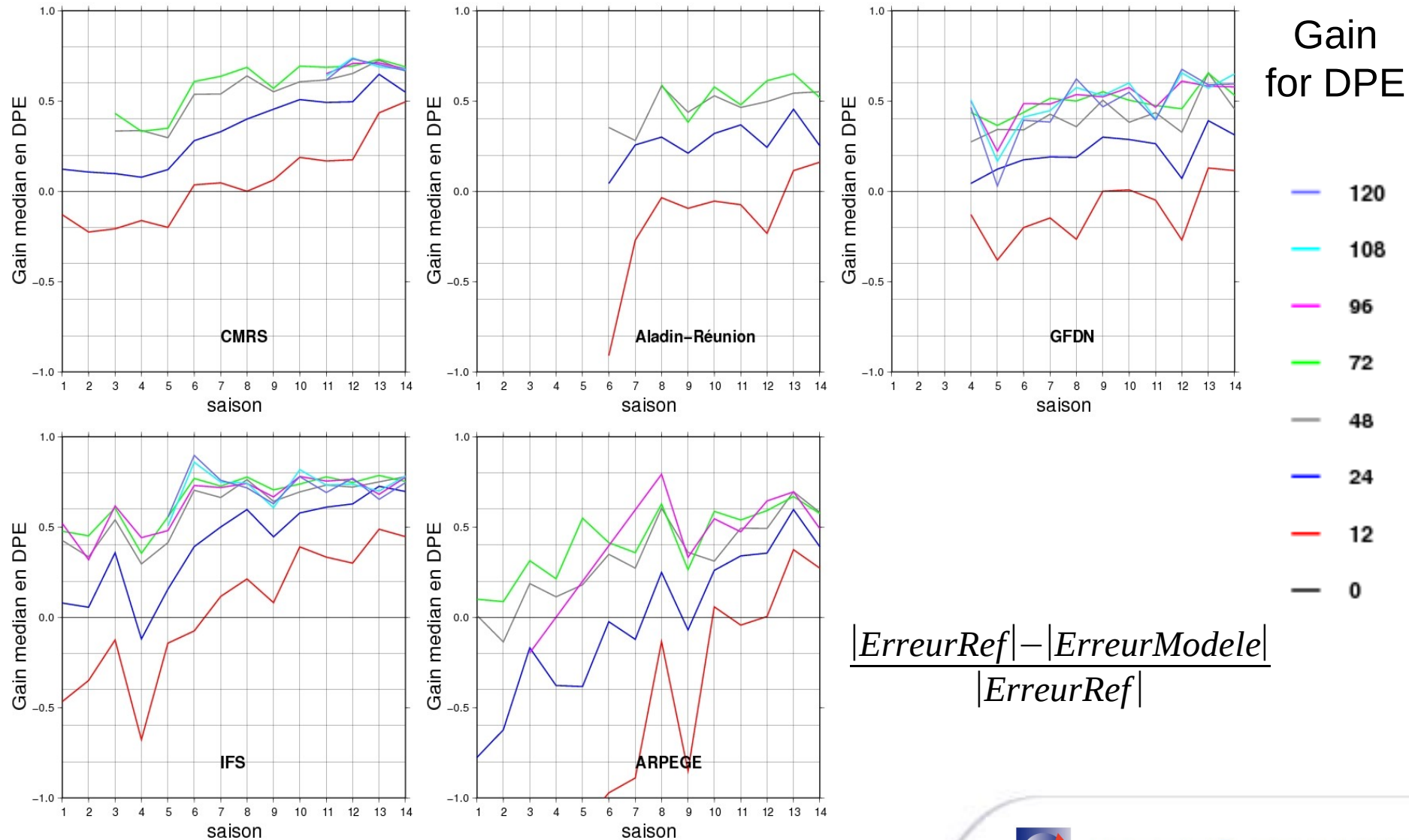
METEO FRANCE

4. Performances actuelles (Bassin SOOI) *Present skill (Basin SWIO)*



4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)



$$\frac{|ErreurRef| - |ErreurModele|}{|ErreurRef|}$$



METEO FRANCE

4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)

Performances sur les trajectoires
Skill about tracks

- Amélioration des modèles en trajectoire
 - ✓ Plus nette aux longues échéances
 - ✓ Limitée mais encore possible
 - ✓ Dispersion restreinte
- Importance de l'assimilation / résolution
 - ✓ CEP est le meilleur et plus net aux longues échéances
- Gain par rapport à la persistance
 - ✓ Limité pour courtes échéances (à l'exception de IFS)
 - ✓ La résolution n'est pas déterminante mais plutôt la qualité de l'assimilation
- *Improved model about track*
 - ✓ *Better for long forecast time*
 - ✓ *Limited but still possible*
 - ✓ *Small standard deviation*
- *Significance of assimilation / resolution*
 - ✓ *IFS is the best and more sensitive to long leadtime forecast*
- *Gain*
 - ✓ *Limited for small leadtime forecasts, excluding IFS*
 - ✓ *Assimilation is more sensitive than resolution*



Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. Performances actuelles
 - Evolution globale des modèles
 - Les modèles pour la prévision des cyclones et méthodes
 - Evolution des performances en trajectoires
 - Evolution des performances en intensité
 - Performances sur la saison 2014-2015
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
4. *Present skill*
 - *Overall improvement of models*
 - *Several models for cyclone forecast and methods*
 - *Evolution of scores about track*
 - *Evolution of scores about intensity*
 - *Scores for the 2014-2015 season*
5. *Next step : Arome-OM*
6. *Conclusions and prospects*



4. Performances actuelles

Present skill

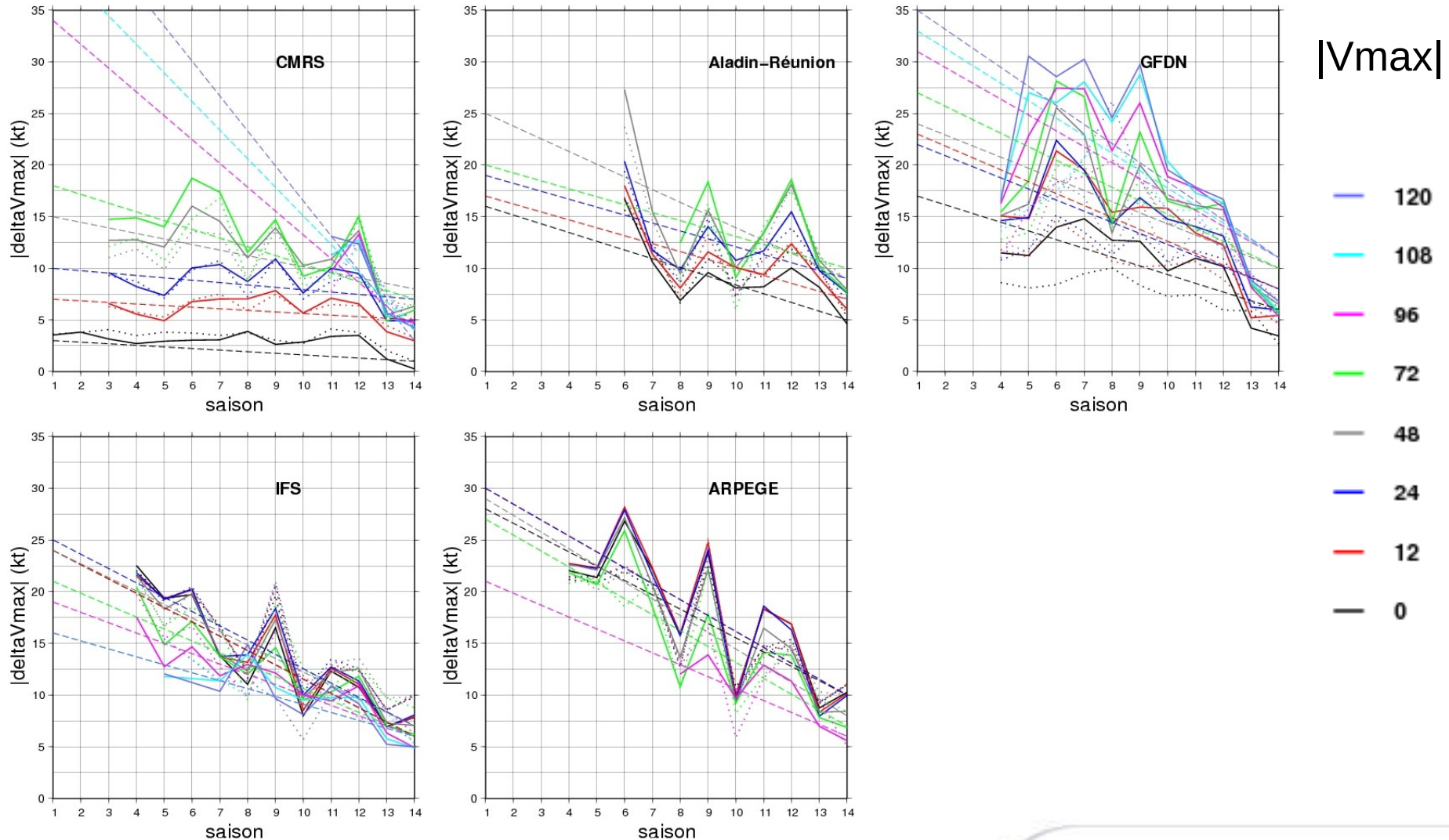
Performances sur les intensités
Skill about intensity

- $\Delta V_{\max} = V_{\max}^{\text{prévu}} - V_{\max}^{\text{obs}}$
 - ✓ Donne les sur ou sous-estimations
 - ✓ Interprétation du biais difficile car compensation
 - $|\Delta V_{\max}|$
 - ✓ Comparaison des biais possibles
 - ✓ Perte de l'information de sur ou sous-estimation
 - $\text{Gain } V_{\max} = \frac{|ErreurRef| - |ErreurModele|}{|ErreurRef|}$
- $\Delta V_{\max} = V_{\max}^{\text{forecast}} - V_{\max}^{\text{obs}}$
 - ✓ *Information about over or under estimation*
 - ✓ *Difficult to interpret the average because of offset*
 - $|\Delta V_{\max}|$
 - ✓ *Average comparaison possible*
 - ✓ *Loss of information about over or under estimation*
 - $\text{Gain } V_{\max} = \frac{|RefError| - |ModelError|}{|RefError|}$



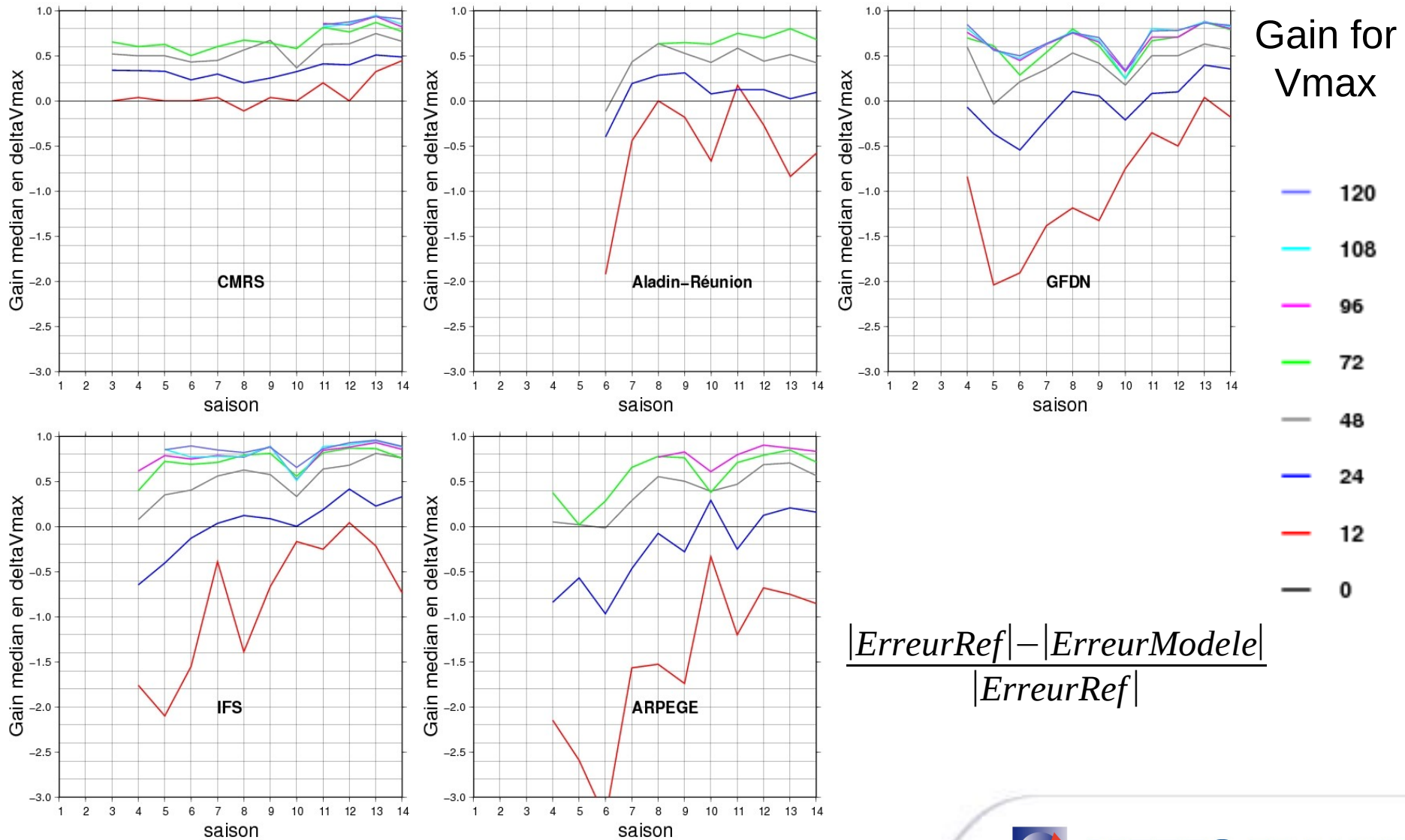
4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)



4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)



$$\frac{|ErreurRef| - |ErreurModele|}{|ErreurRef|}$$



METEO FRANCE

4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)

Performances sur les intensités
Skill about intensity

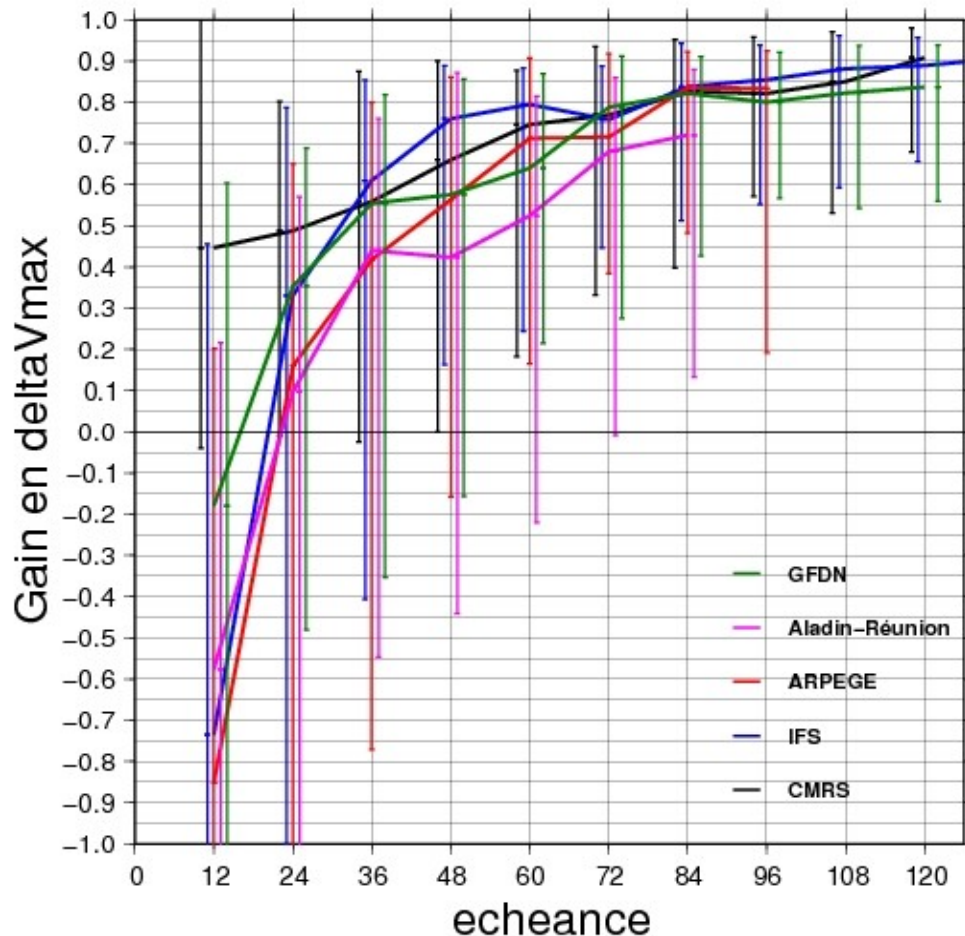
- CMRS : le meilleur mais IFS très bon pour les longues échéances
 - Faits notables :
 - ✓ Importance de la résolution et du bogus aux courtes échéances
 - ✓ Meilleurs résultats aux longues échéances pour les modèles à résolution lâche
 - Principaux avantages :
 - ✓ Gain informatif dès 24h
 - ✓ Amélioration sensible au fil des saisons
 - Principal défaut : Attention aux écart-types importants
- *RSMC : the best but good scores for IFS at long leadtime forecasts*
 - *Notable facts :*
 - ✓ *Importance of high resolution and bogus at short leadtime forecasts*
 - ✓ *Best results at long leadtime forecasts for coarse models*
 - *Main advantages :*
 - ✓ *Informative from 24h compare to persistence*
 - ✓ *Better during seasons*
 - *Main default : Attention to important standard deviations*



4. Performances actuelles (Bassin SOOI) *Present skill (Basin SWIO)*

Saison 2014-2015
Season 2014-2015

Gain médian, quantiles 25% et 75%
pour la saison 2014-2015



- CMRS et IFS équivalents à partir de 36h
- Forte dispersion
- *RSMC and IFS : same gain from 36h*
- *High dispersion*

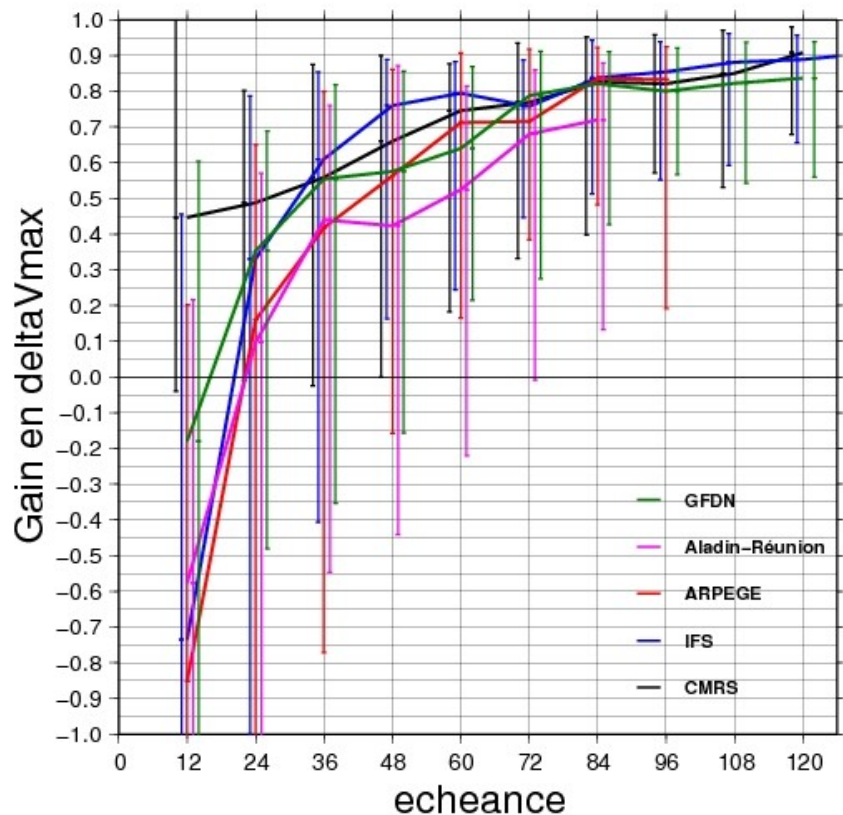


METEO FRANCE

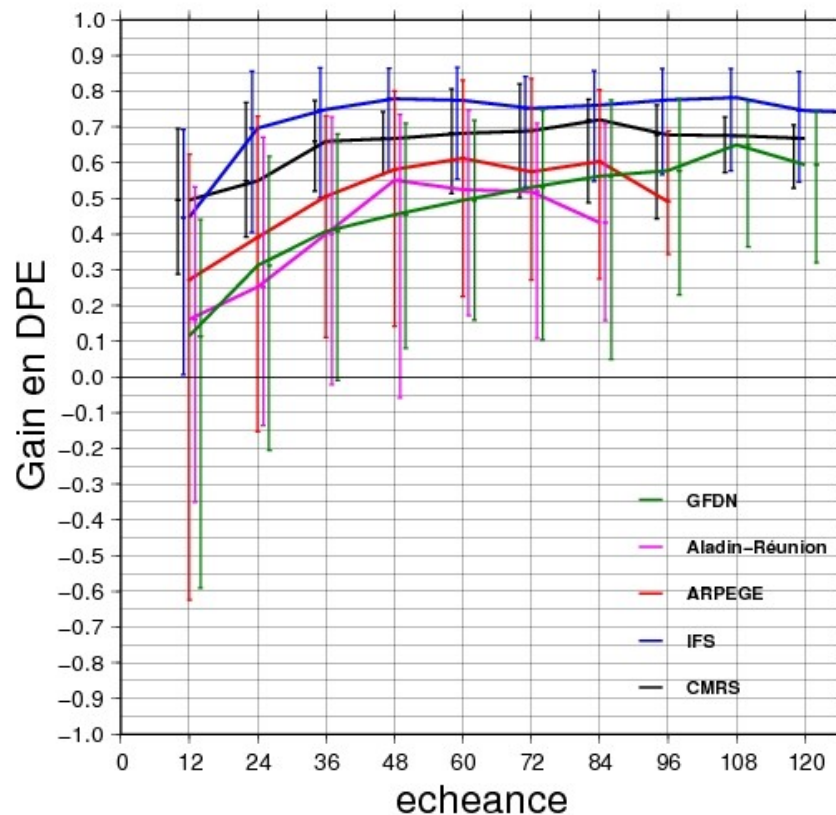
4. Performances actuelles (Bassin SOOI) *Present skill (Basin SWIO)*

Saison 2014-2015
Season 2014-2015

Gain médian, quantiles 25% et 75%
pour la saison 2014-2015



Gain médian, quantiles 25% et 75%
pour la saison 2014-2015



METEO FRANCE

4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

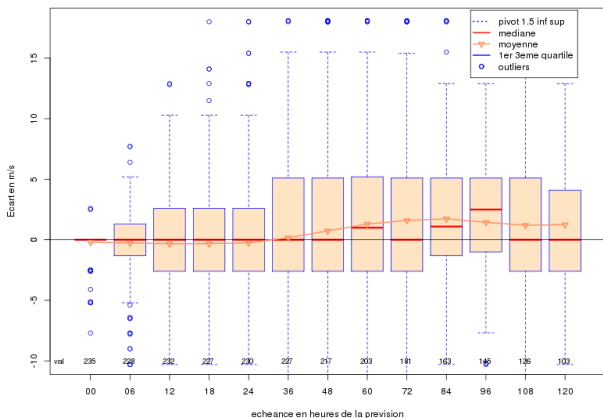
Present skill (Basin SWIO)

Saison 2014-2015
Season 2014-2015

- CMRS : biais et médiane les plus faibles avec tendance à une faible sur-estimation
- IFS : biais diminue avec les échéances mais médiane constante
- Aladin-Réunion : effet du bogus aux courtes échéances
- Mais gros défaut : dispersion reste importante pour CMRS et modèles
- *RSMC : lowest bias and median with tendency to little over-estimate*
- *IFS : bias decreases during leadtime forecasts but constant median*
- *Aladin-Réunion : Effect of bogus during short leadtime forecasts*
- *But significant defect : significant standard deviation for RSMC and models*

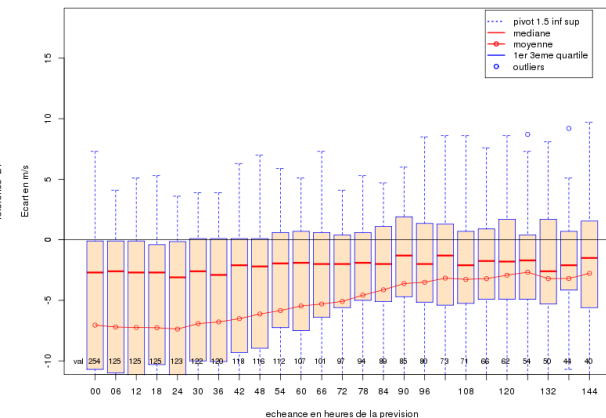
CMRS/RSMC

Distribution des erreurs de vent max pour Ensemble des Systemes modele CMRSprevi



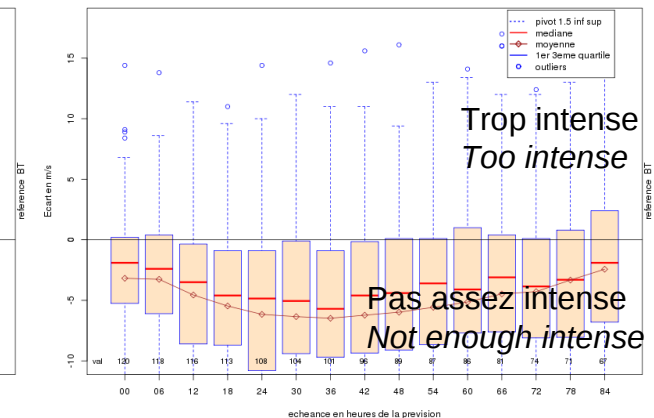
IFS

Distribution des erreurs de vent max pour Ensemble des Systemes modele CEP



Aladin-Réunion

Distribution des erreurs de vent max pour Ensemble des Systemes modele Aladin



METEO FRANCE

Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

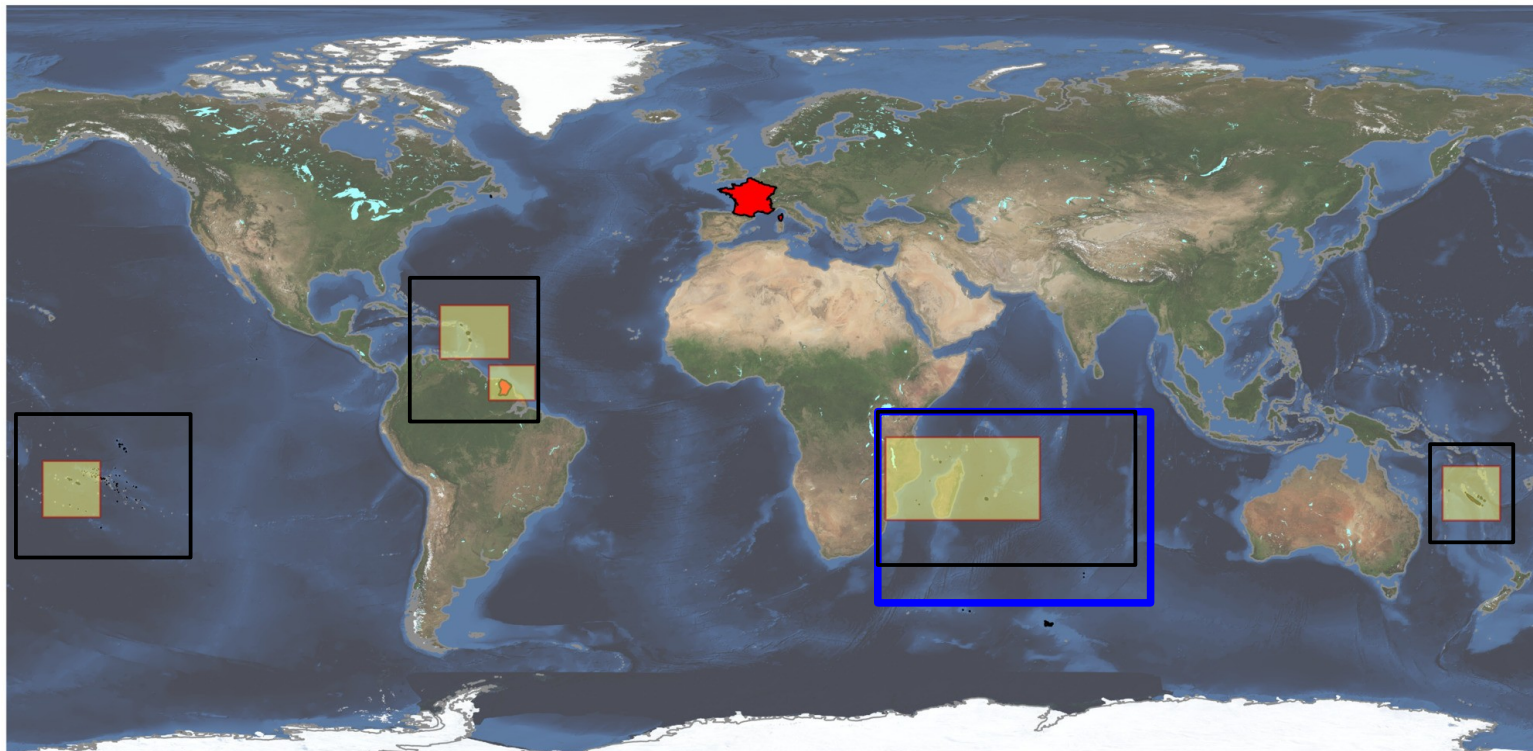
- 1. General principles*
- 2. The analysis (data assimilation)*
- 3. The forecast*
- 4. Present skill*
- 5. Next step : Arome-OM*
- 6. Conclusions and prospects*



5. Prochaine étape : Arome-OM

Next step : Arome-OM

- Aladin-OM : de 2006 à 2016
 - 8km de résolution horizontale / 70 niveaux verticaux
 - Assimilation 3D-Var + bogus
 - 84h à 00 et 12UTC
 - 5 modèles de méso-échelle en remplacement
- *Aladin-OM since 2006 until 2016*
 - *8km horizontal resolution / 70 vertical levels*
 - *3D-Var assimilation + bogus*
 - *84h leadtime forecasts at 00 and 12UTC*
 - *Substituted by 5 mesoscale models*



Aladin
area

RSMC
Area

RANCE

5. Prochaine étape : Arome-OM

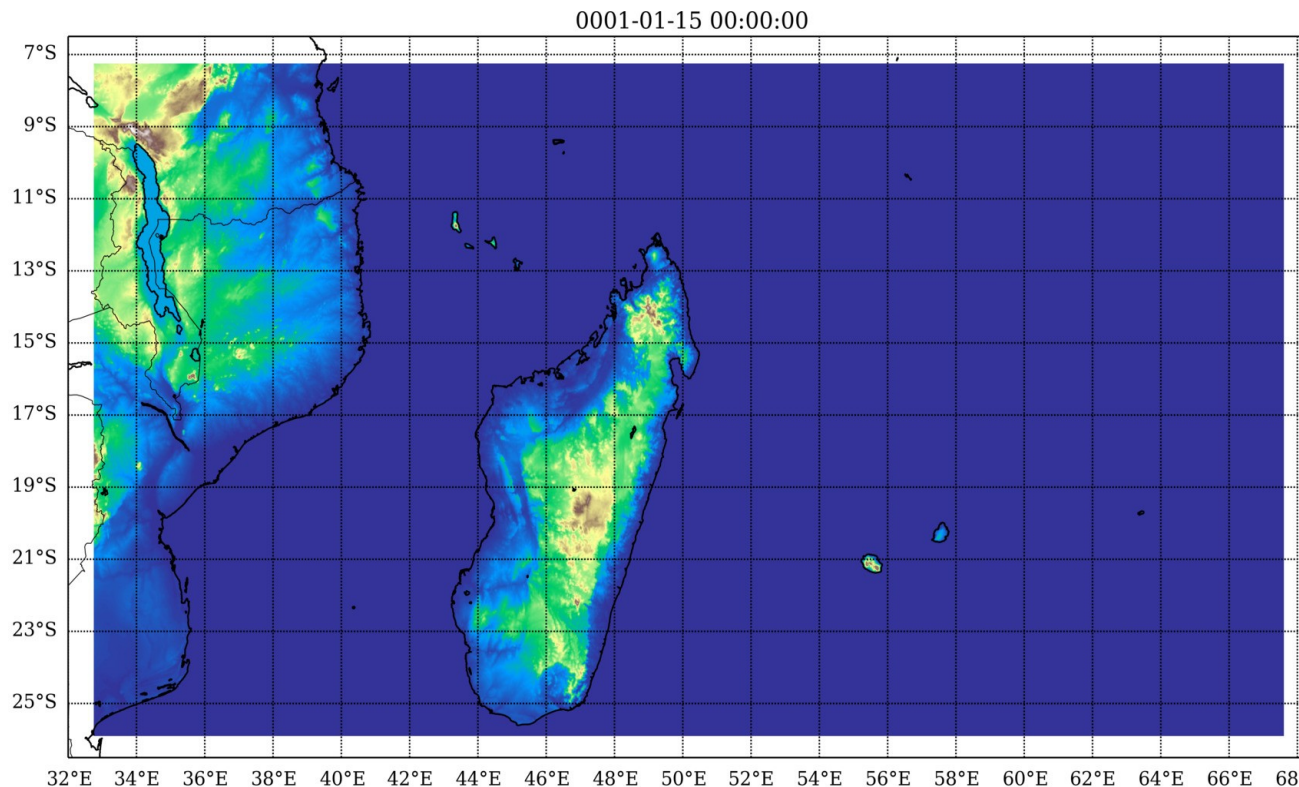
Next step : Arome-OM

■ Arome-Indien

- 2km5 / 90 niveaux verticaux
- Adaptation dynamique et initialisé par IFS
- 36h à 00, 06, 12 et 18 UTC
- Convection profonde résolue explicitement

■ Arome-Indian

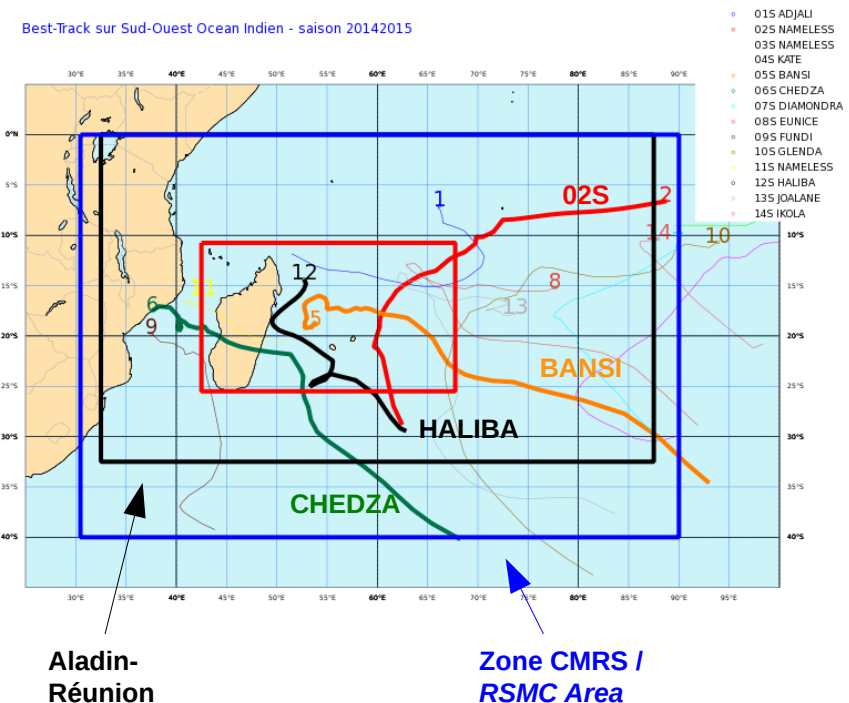
- 2km5 / 90 vertical levels
- No assimilation and initialized by IFS
- 36h leadtime forecasts at 00, 06, 12, 18 UTC
- Explicit resolution of deep convection



5. Premier Bilan d'Arome-Indien

First assessment of Arome-Indian

- Expérience « temps réel »
 - Prévisions de 42h à 00UTC du 13/11/2014 au 31/03/2015
 - Couplage océanique CMO1D (initialisé par PSY4 mercator)
 - 4 systèmes : 02S/Bansi/Chedza/Haliba
- « Realtime » experiment
 - Forecast 42h at 00UTC from 13/11/2014 to 31/03/2015
 - Coupled with oceanic mixed layer 1D (initialized by operational oceanic model PSY4 mercator)
 - 4 tropical systems : 02S/Bansi/Chedza/Haliba



5. Premier Bilan d'Arome-Indien

First assessment of Arome-Indian

■ Trajectoire

- Proche de IFS

■ Vmax

- Net apport de Arome-Indien
- Tendance à sur-intensifier
- Attention à la dispersion

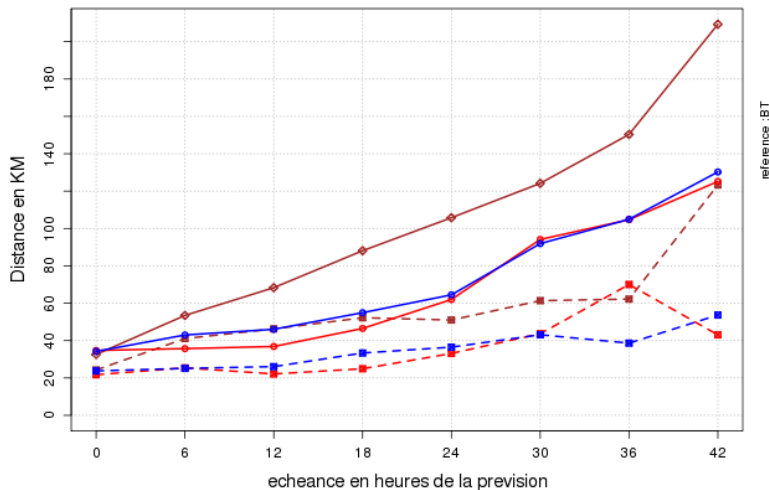
■ Track

- Close to model IFS

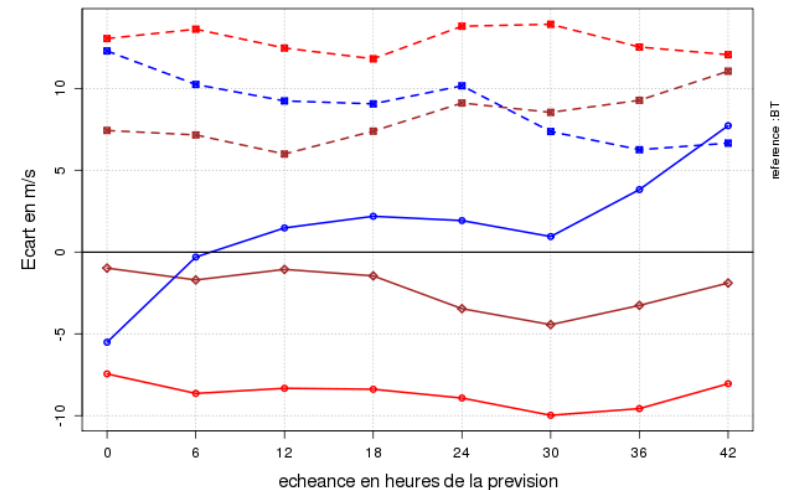
■ Max Wind

- Arome-Indian is better
- Tend to over-intensify
- Be careful of deviation

Erreur de position / position error



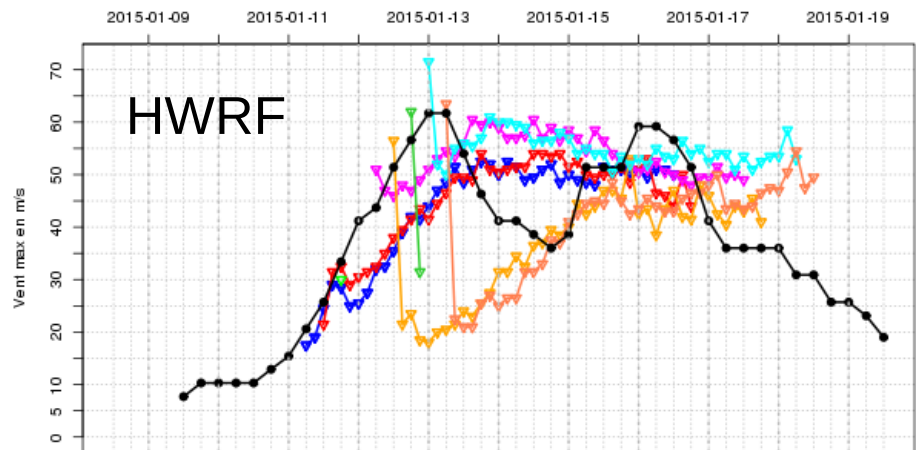
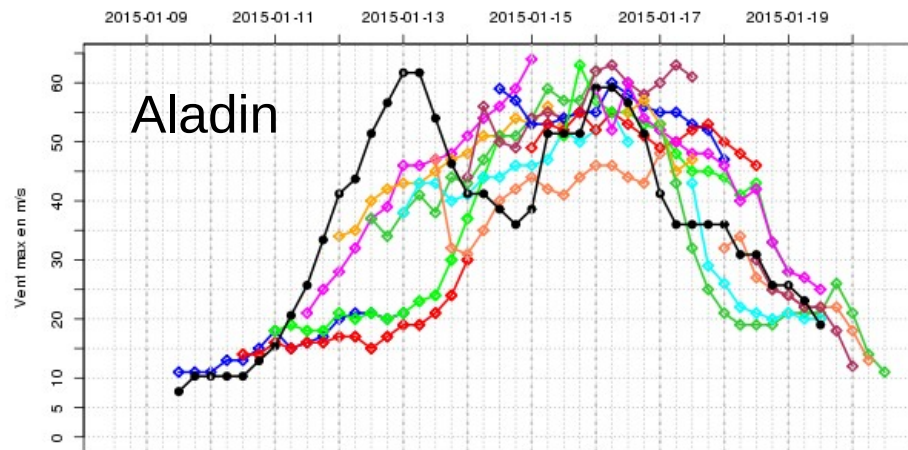
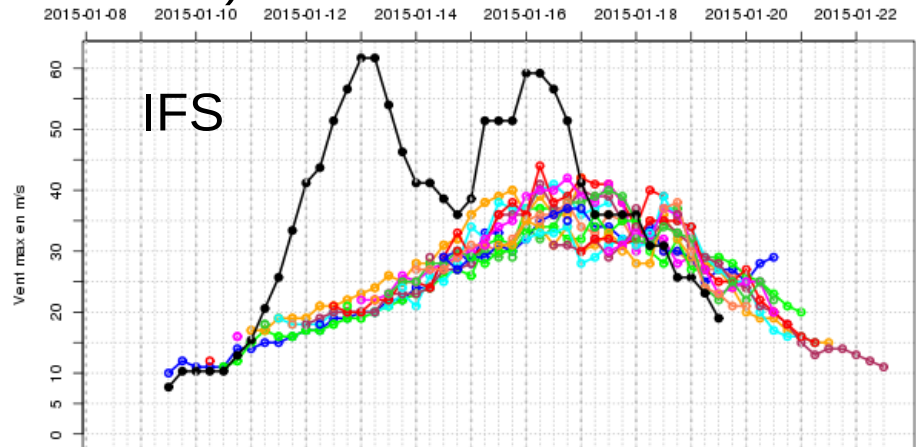
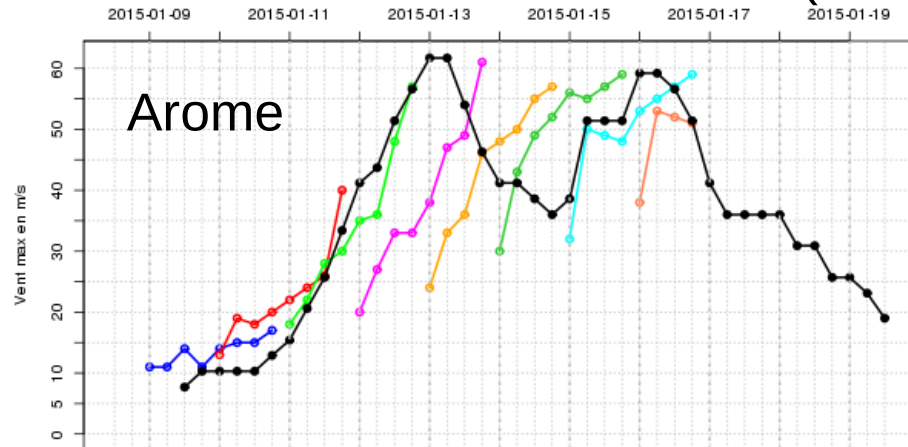
Erreur de vent max / max wind error



5. Premier Bilan d'Arome-Indien

First assessment of Arome-Indian

Bansi (08-19/01/2015)



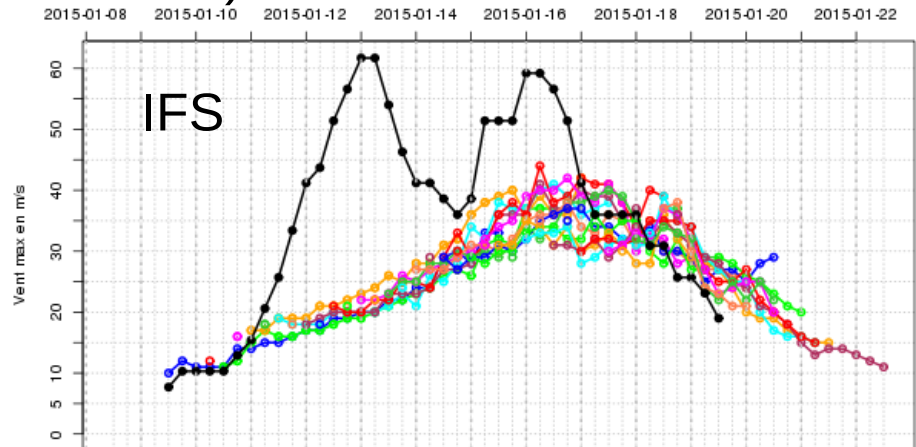
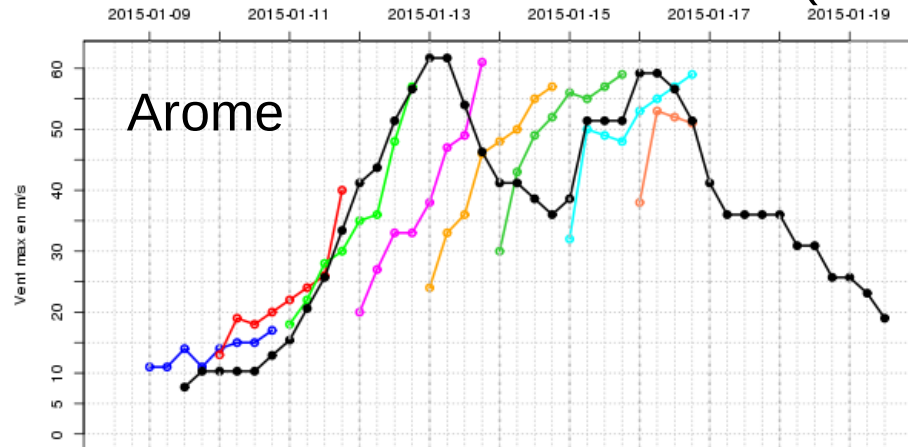
- Arome : Capable de prévoir les intensifications et plus réactif

- *Arome : Can forecast intensification and more responsive*

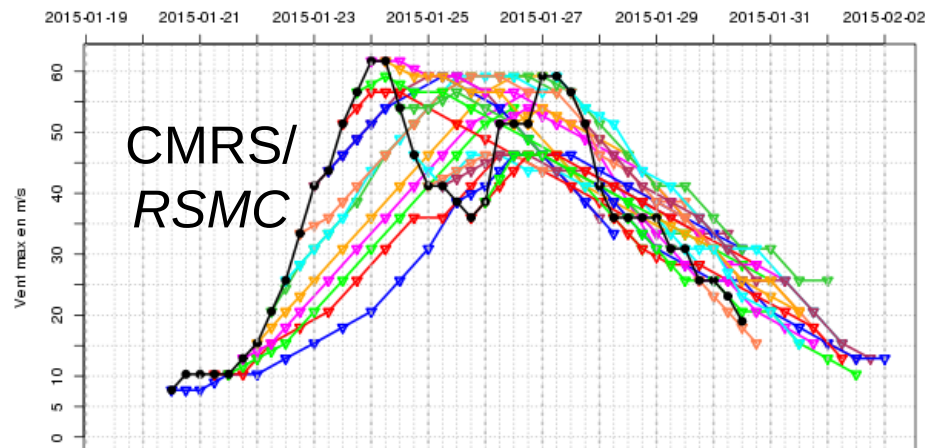
5. Premier Bilan d'Arome-Indien

First assessment of Arome-Indian

Bansi (08-19/01/2015)



- Intensifications rapides prévisibles
⇒ Intérêt pour la prévision CMRS
- *Predictable rapid intensification* ⇒
Interest for RSMC forecast



METEO FRANCE

Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Prochaine étape : Arome-OM
6. Conclusions et perspectives

- 1. General principles*
- 2. The analysis (data assimilation)*
- 3. The forecast*
- 4. Present skill*
- 5. Next step : Arome-OM*
- 6. Conclusions and prospects*



6. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

- **Modèle numérique = 2 étapes**
 - Assimilation = utilisation des observations + bogus (spécificités pour les cyclones)
 - Prévision = équations avec approximations en fonction de la résolution
- **Différents modèles → différentes performances**
 - Importance du type d'observations et de la méthode d'assimilation
 - Importance des paramétrisations et de la résolution
- **Moyens de calcul importants nécessaires**
- **Numerical model = 2 steps**
 - Assimilation = used of observations + bogus (specificities for cyclones)
 - Forecast = equations with approximations according resolution
- **Several models → different skills**
 - Importance of such observations and assimilation method
 - Importance of parametrizations and resolution
- **Need of significant computing power**



6. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

- Les prévisions de trajectoires ont progressé régulièrement depuis 20 ans
- Gain significatif par rapport à la persistance de tendance sur 12h
 - Bonne prévision du CMRS
 - Capacité des modèles à prévoir l'intensité
- Réduire la dispersion = une nécessité
- *The track forecasts have been improving for 20 years*
- *Significant gain relative to the 12h tendency persistence*
 - *Good forecasts for RSMC*
 - *Model ability to forecast intensity*
- *Reduce standard deviation = a needed*



6. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

- L'avenir : des modèles à haute résolution ($< 3\text{km}$) résolvant la convection pour mieux prévoir
 - l'intensité et la structure des cyclones
 - leurs impacts sur les territoires (vent, pluies)
- Assimilation à méso-échelle
 - Amélioration des structures cycloniques
 - Amélioration des précipitations
 - Apport des données radar
- Couplage océanique
 - Permet de limiter les intensités
 - Peut expliquer certaines intensifications rapides dans le canal du Mozambique
- *The future : high-resolution models ($< 3\text{km}$) resolving convection to better forecast*
 - *the intensity and the structure of cyclones*
 - *their impacts over territories (wind, rain)*
- *Mesoscale assimilation*
 - *Improve forecasted structure of cyclones*
 - *Improve forecasted pattern of rain*
 - *Use of radar data*
- And what about ocean coupling?
 - To limit the intensity
 - Can explain some rapid intensification in Mozambique Channel

