

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
Novembre 2013

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. 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. 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
Toujours un temps d'avance

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

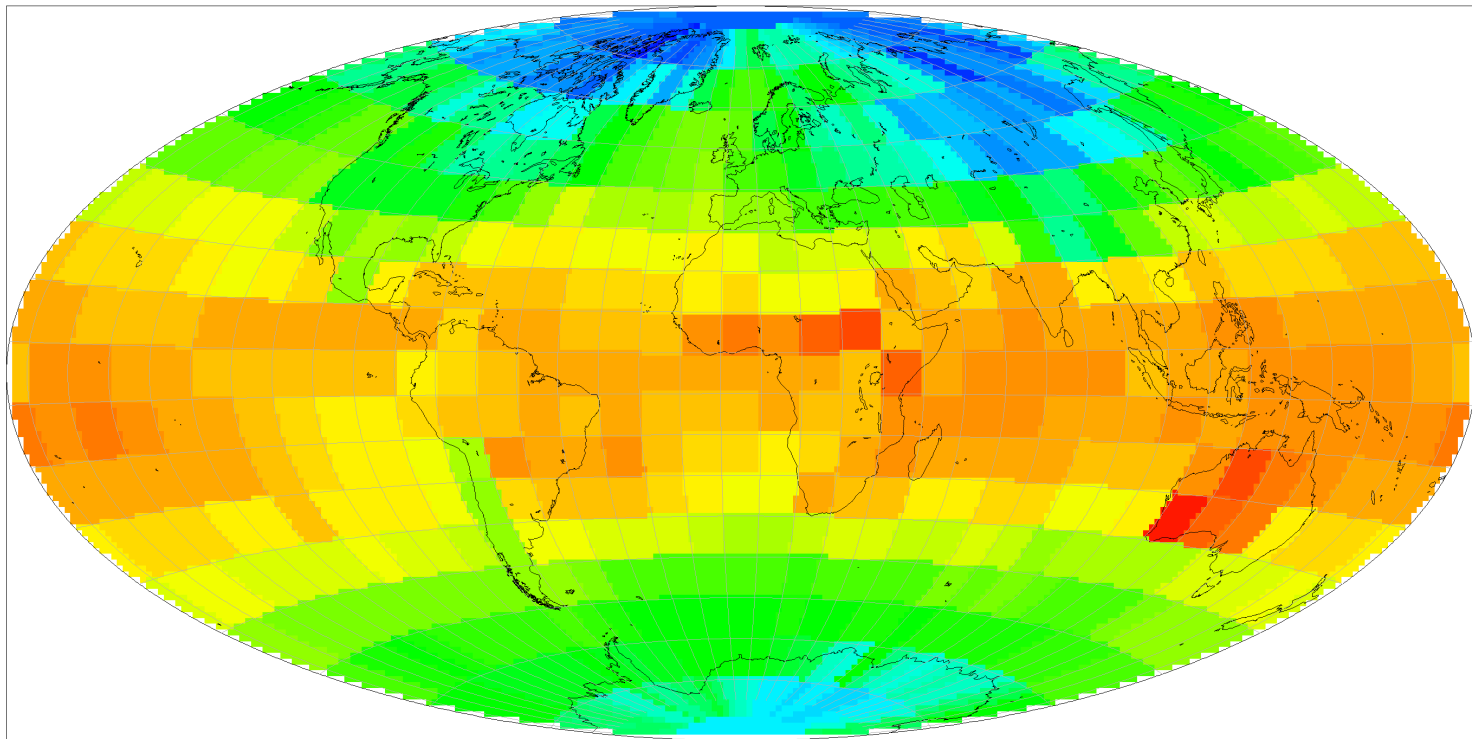
- La prévision numérique, c'est déterminer les valeurs futures des paramètres atmosphériques à partir de valeurs initiales, par le calcul numérique
= un problème aux conditions initiales
- Pour être manipulée par un ordinateur, l'atmosphère doit être discrétisée
- *Numerical prediction is to determine 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°

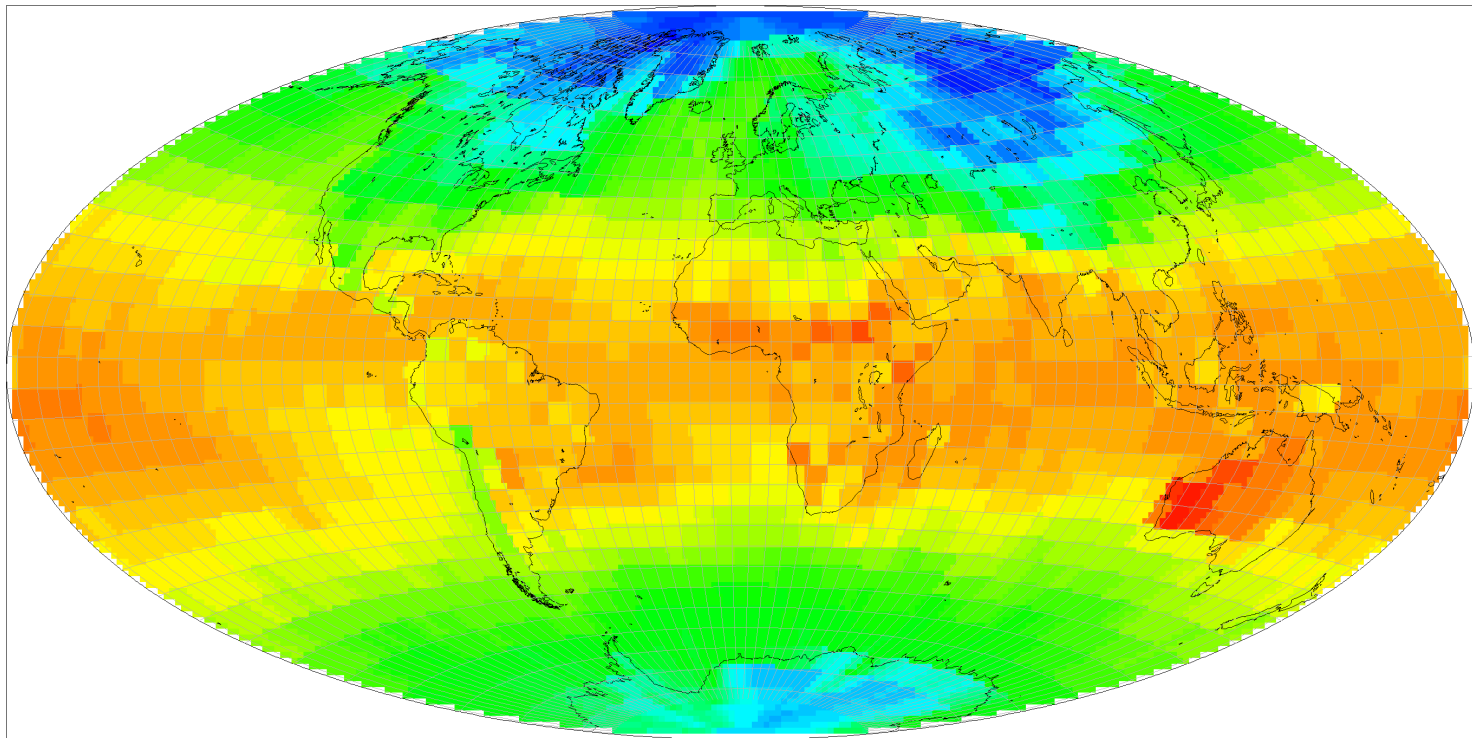


METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

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



resolution 5°



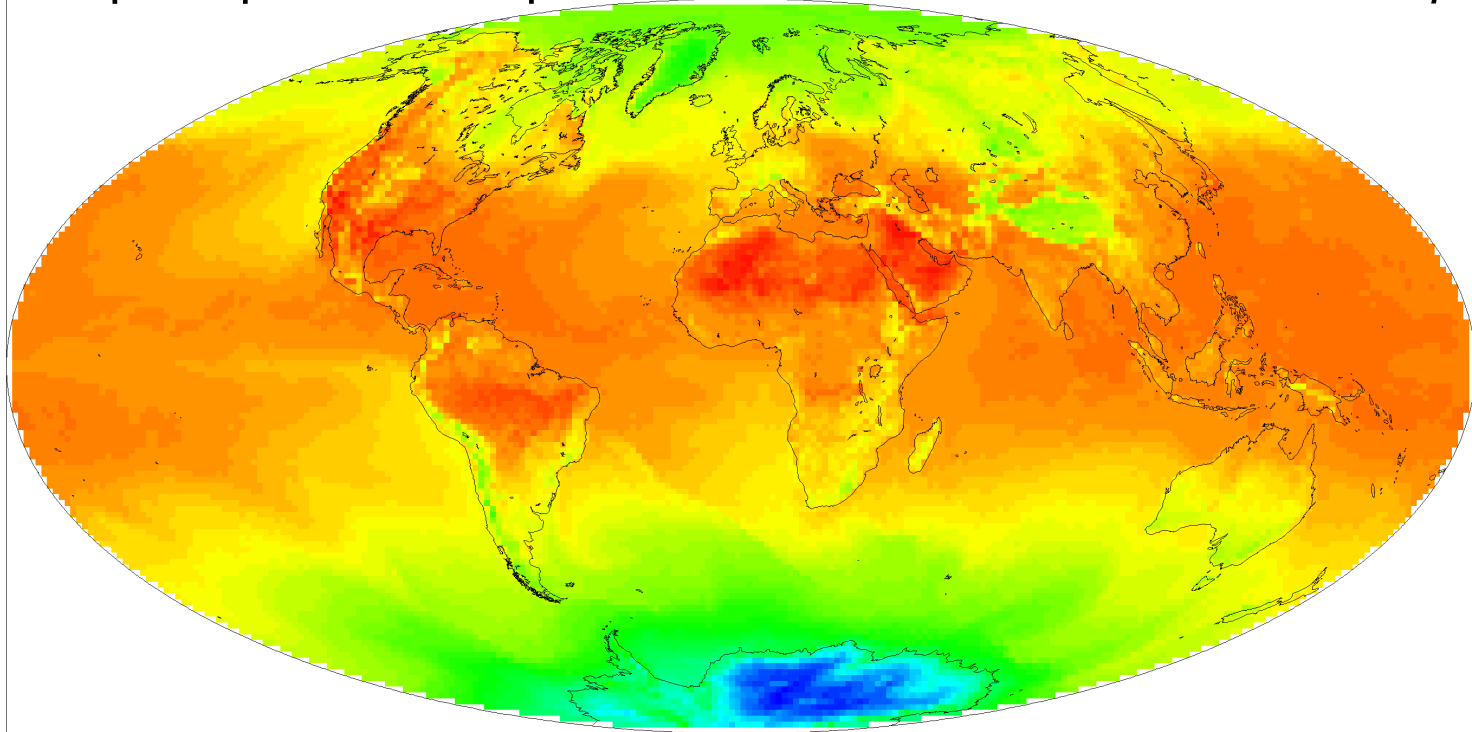
METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

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
Toujours un temps d'avance

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Les grilles des modèles actuels :
 - Modèle global du CEPMMT :
résolution 16 km, 90 niveaux verticaux
→ 72 000 000 points
 - Modèle ALADIN à aire limitée dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien :
résolution 8 km, 70 niveaux verticaux
→ 30 000 000 points
 - L'**état** de l'atmosphère à un instant est donné par les valeurs des paramètres météorologiques en ces points (= **vecteur d'état**)
- The grids of present-day models :
 - *Global model from ECMWF:*
16 km resolution, 90 vertical levels
→ 72 000 000 points
 - *Limited-area ALADIN model in the South-West Indian Ocean :*
8 km resolution, 70 vertical levels
→ 30 000 000 points
 - *The atmospheric **state** at an instant is given by the values of the meteorological parameters at these points (= **state vector**)*



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
Toujours un temps d'avance

1. Principes généraux / *General principles*

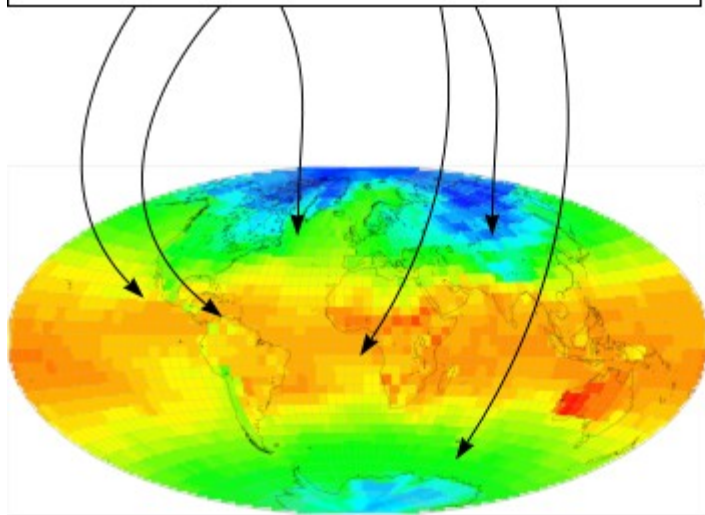
2 étapes pour la prévision
2 steps for the forecast

- 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



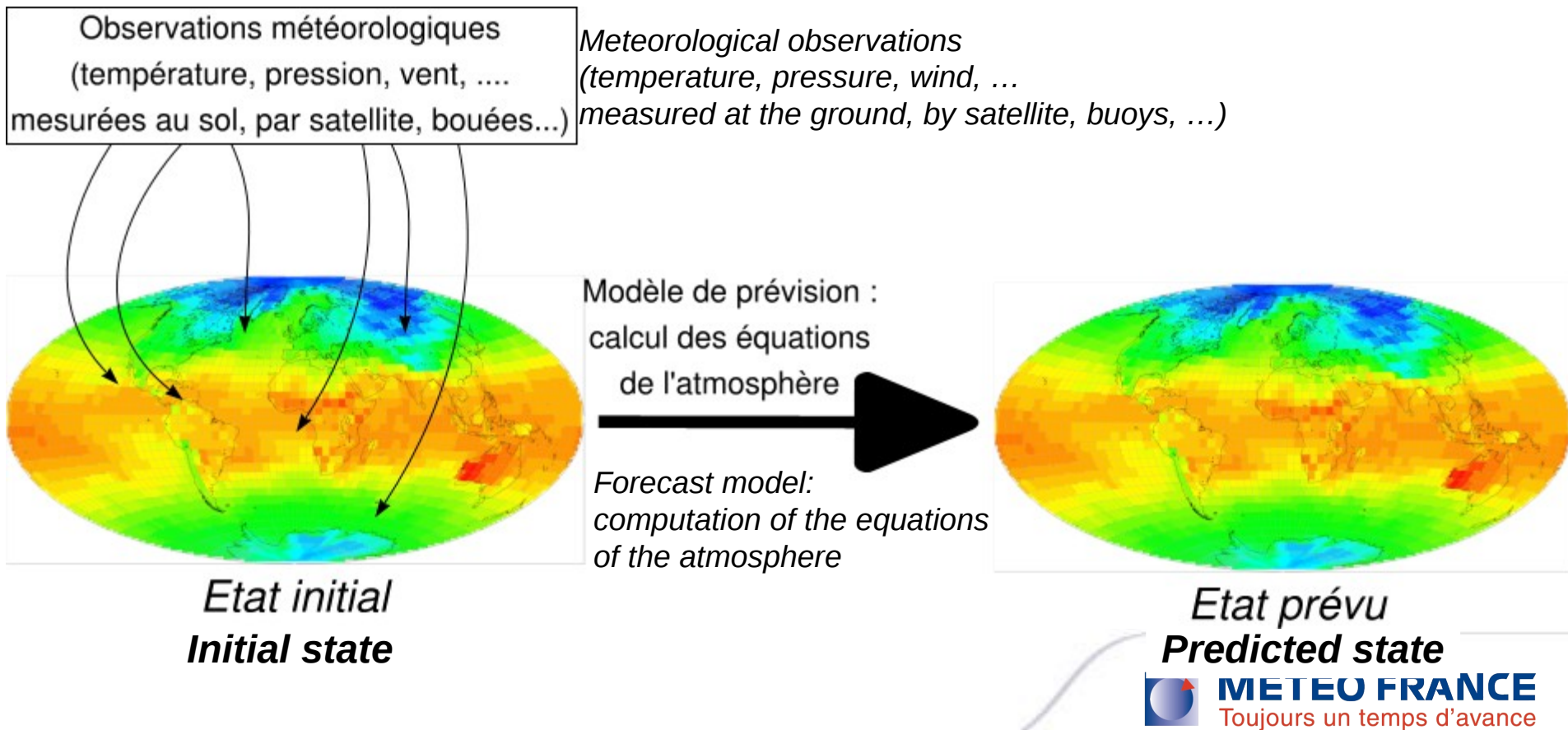
METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

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

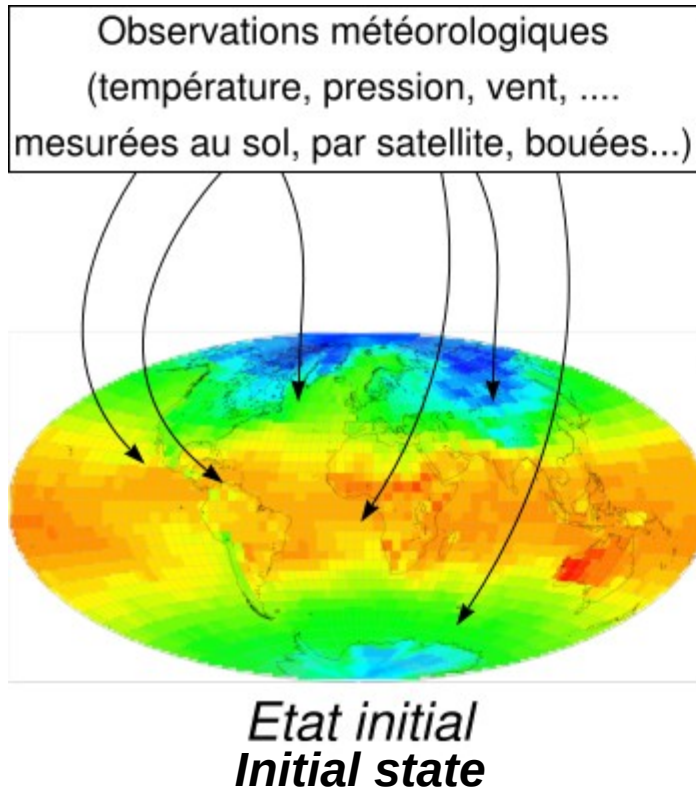
1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
 - Les observations météorologiques disponibles
 - Les algorithmes d'assimilation
 - Spécificités pour les cyclones
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Conclusions et perspectives

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. *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
Toujours un temps d'avance

2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

■ Types d'observations

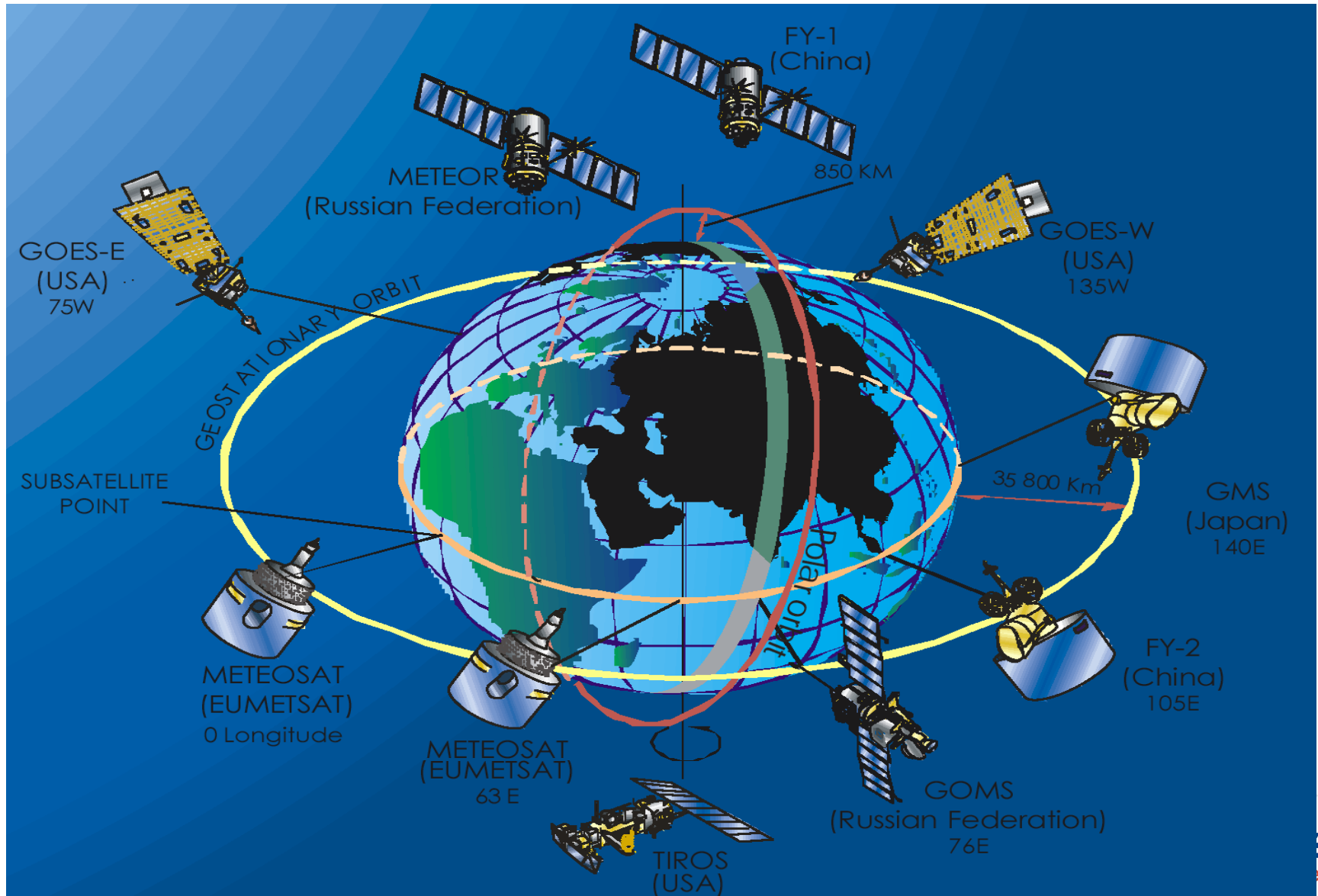
- Les stations de surface et les radiosondages du réseau synoptique fournissent des **mesures directes** de ces données aux **heures synoptiques** mais de façon très **inhomogène** dans l'espace.
- Les systèmes spatiaux fournissent des **mesures indirectes** (radiances, ondes réfléchies) à des **heures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

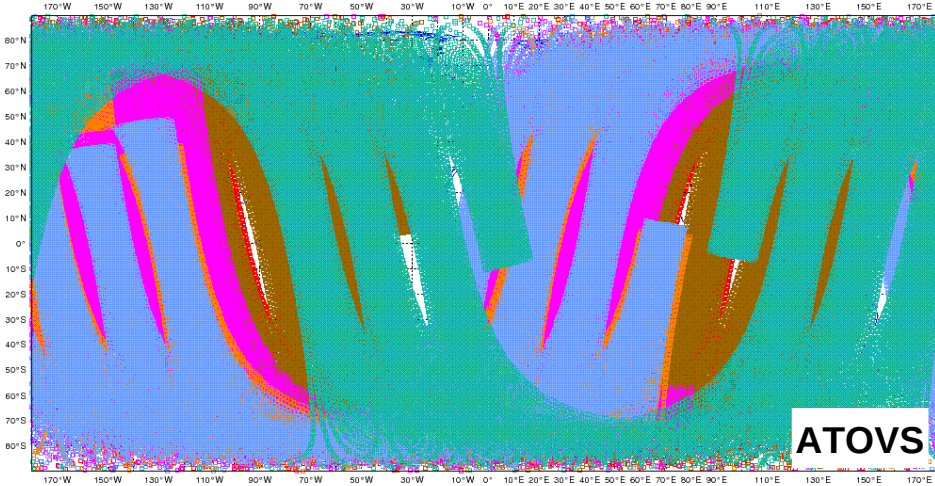


2. L'analyse / *The analysis*

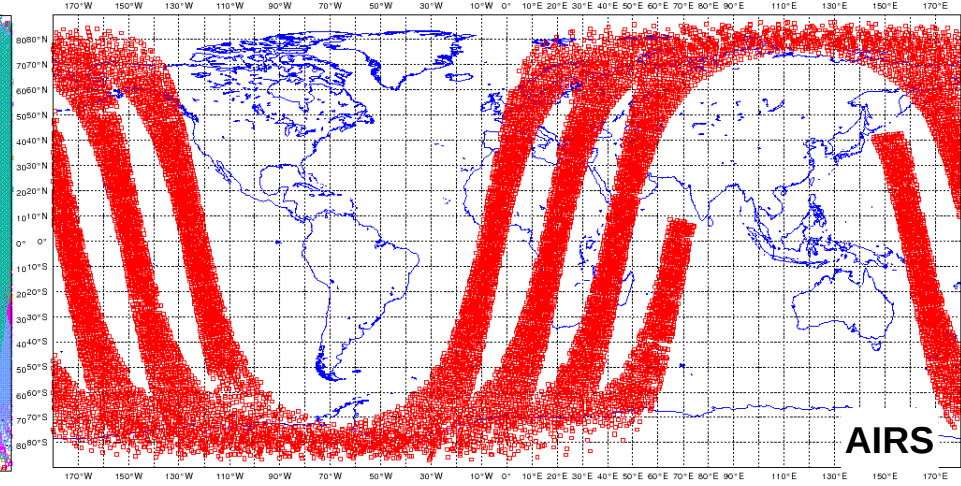


2. L'analyse / The analysis

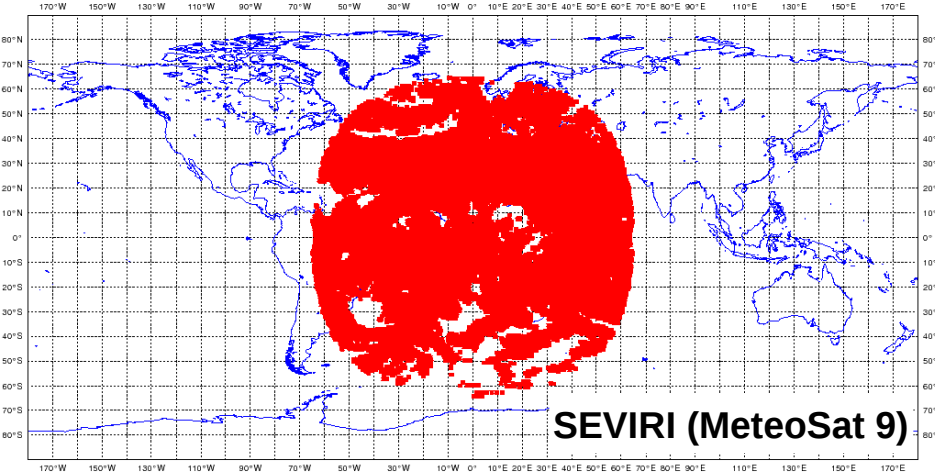
METEO-FRANCE couverture de donnees - ATOVS AMSU-A
 2010/10/05 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 221235
 41032 NOAA 15 41061 NOAA 16 0 NOAA 17
 41130 NOAA 18 18630 NOAA 19 39032 AQUA 40350 METOP A



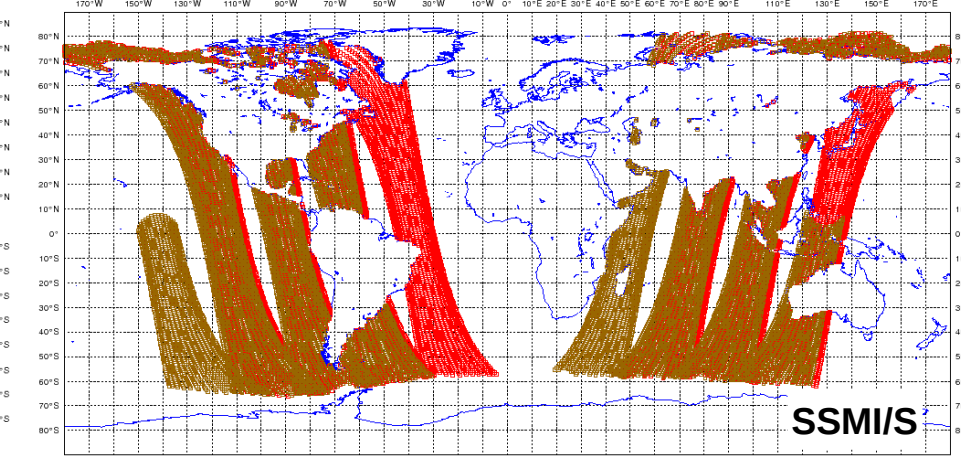
METEO-FRANCE couverture de donnees - AIRS
 2010/10/05 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 14723
 14723 AQUA



METEO-FRANCE couverture de donnees - SEVIRI
 2010/10/05 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 139083
 139083 METEOSAT 9



METEO-FRANCE couverture de donnees - SSMIS
 2010/10/05 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 24898
 12631 DMSP F16 12267 DMSP F17 0 DMSP F18



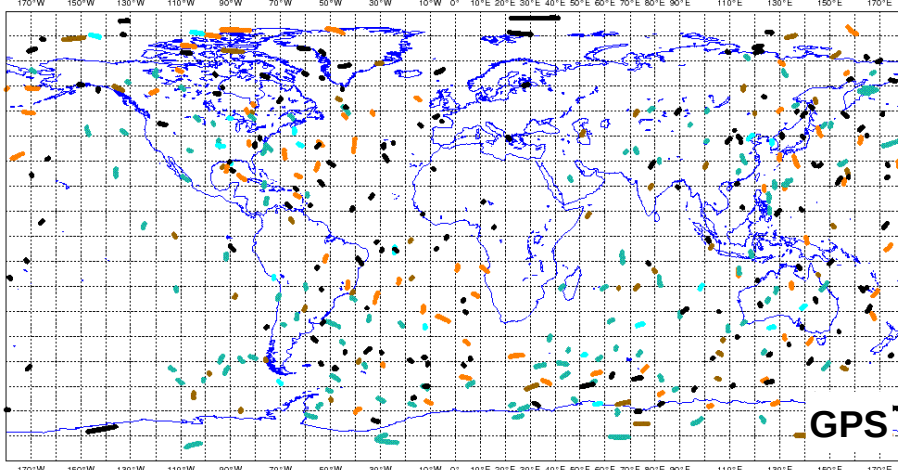
2. L'analyse / The analysis

METEO-FRANCE couverture de donnees - GPS satellite

2010/10/05 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 97281

0 CHAMP 7240 GRACE A 0 GRACE B 0 COSMIC 1 20359 COSMIC 2
0 COSMIC 3 33891 COSMIC 4 0 COSMIC 5 5693 COSMIC 6 30098 METOP A

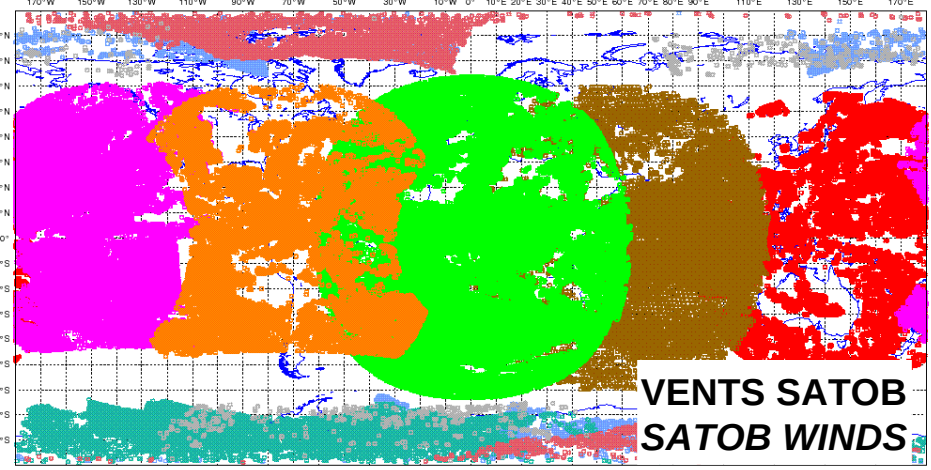


METEO-FRANCE couverture de donnees - SATOB

2010/10/05 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 284786

4867 TERRA 26979 MTSAT 2 32090 METEOSAT 7 115903 METEOSAT 9 55305 GOES 31979 GOES 18
767 NOAA 16 NESDIS 0 NOAA 17 NESDIS 0 NOAA 18 NESDIS 0 NOAA 19 NESDIS 0 NOAA 15 NESDIS

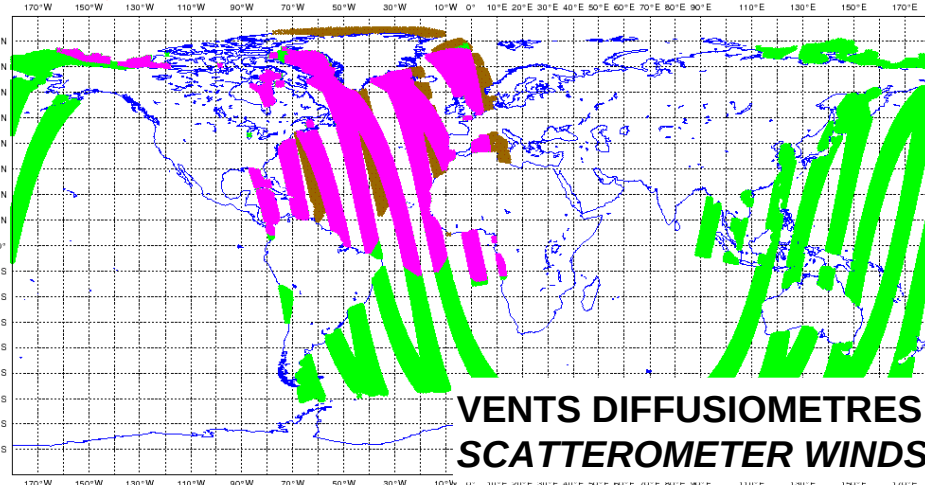


METEO-FRANCE couverture de donnees - SCATTEROMETER

2010/10/05 00H UTC cut-off long

Nombre total d'observations avant screening : 171310

0 QUIKSCAT 13054 ERS 2 121459 METOP A 36797 METOP A EARS

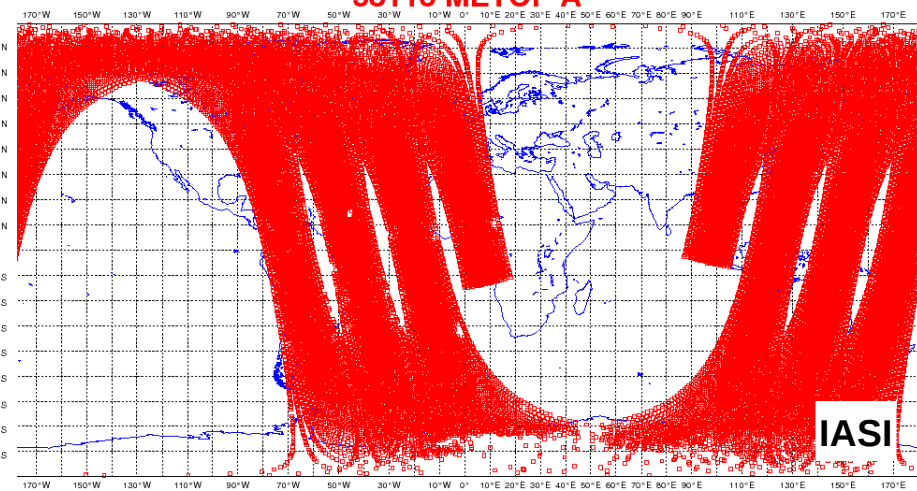


METEO-FRANCE couverture de donnees - IASI

2010/10/05 00H UTC cut-off long

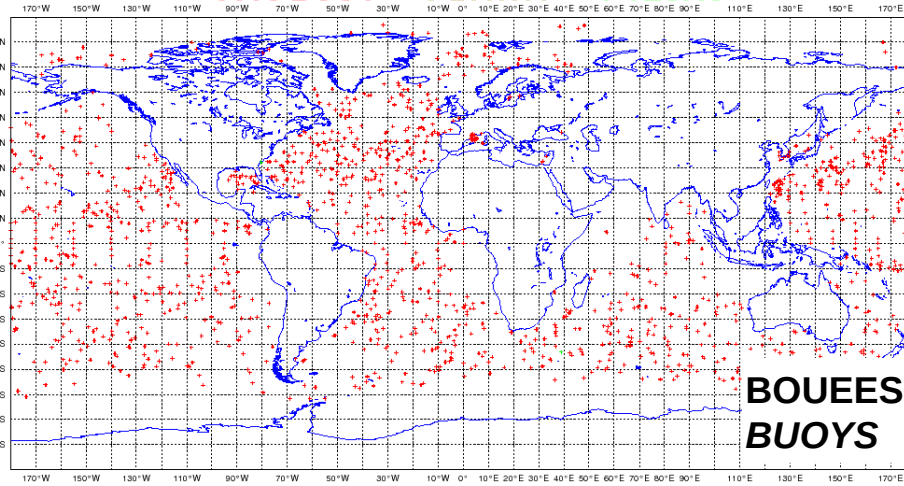
Nombre total d'observations avant screening : 38118

38118 METOP A

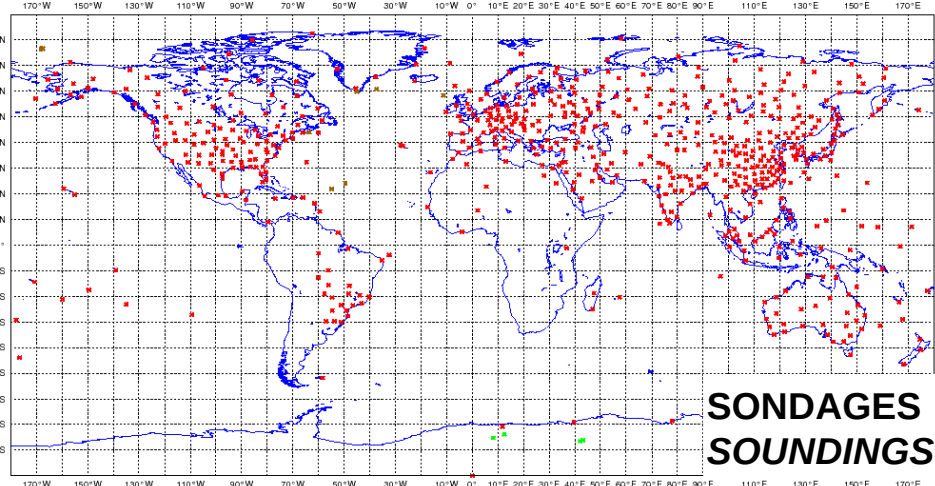


2. L'analyse / The analysis

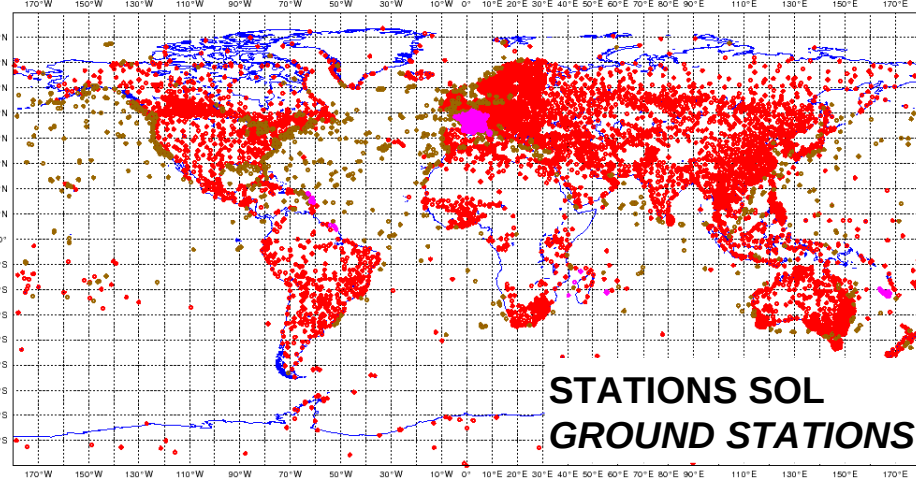
METEO-FRANCE couverture de donnees - BUOY
 2010/10/05 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 9014



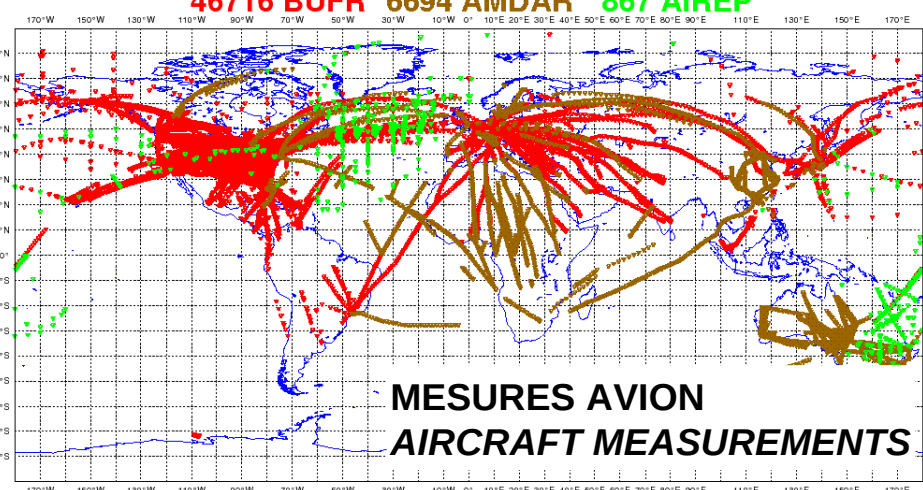
METEO-FRANCE couverture de donnees - TEMP
 2010/10/05 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 666



METEO-FRANCE couverture de donnees - SYNOP/SHIP
 2010/10/06 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 27641



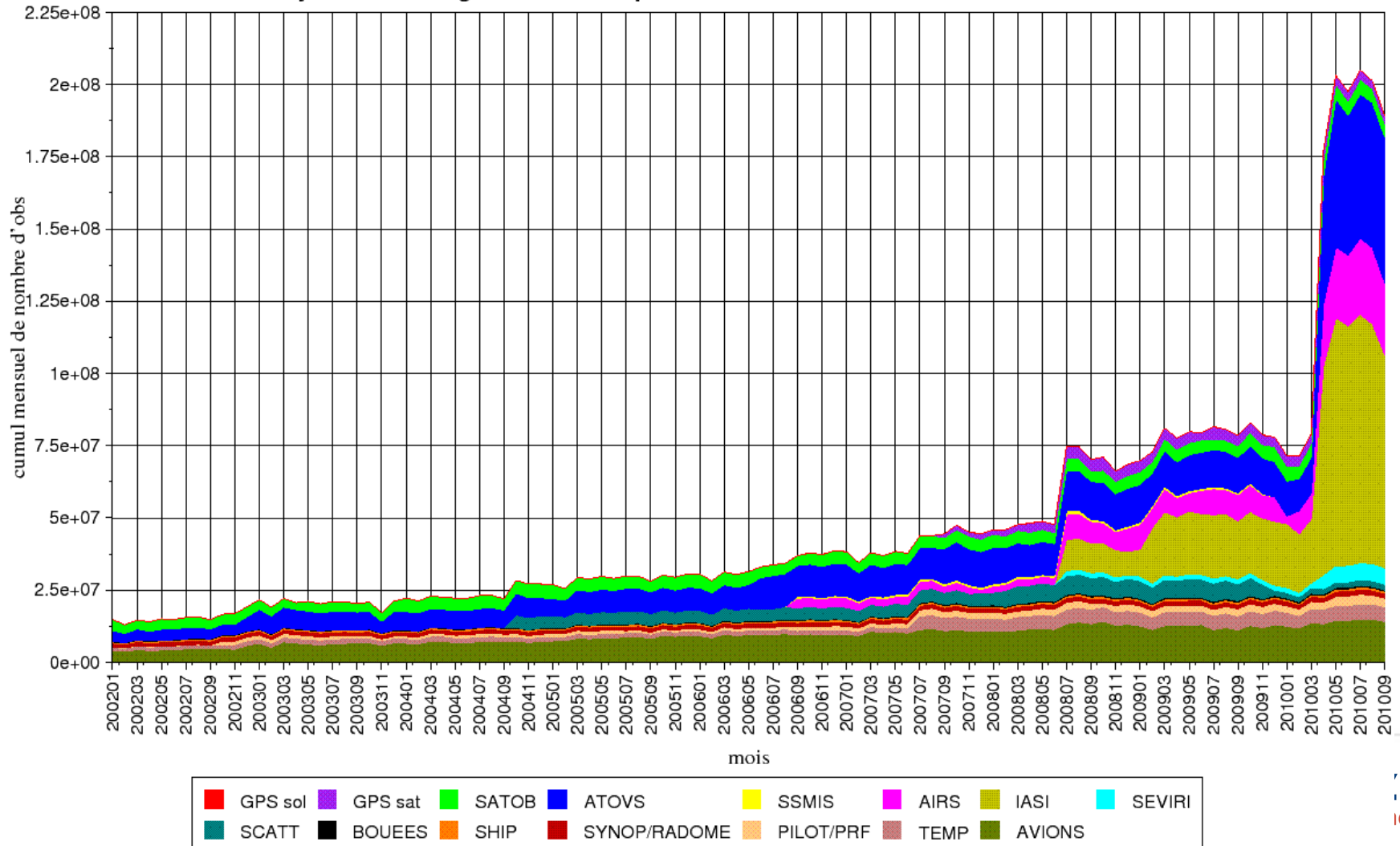
METEO-FRANCE couverture de donnees - AVIONS
 2010/10/06 00H UTC cut-off long
 Nombre total d'observations avant screening : 54277



2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

Evolution des cumuls mensuels de nombre d'observations utilisées par type d'obs
analyses cut-off long ARPEGE métropole - observations conventionnelles et satellites

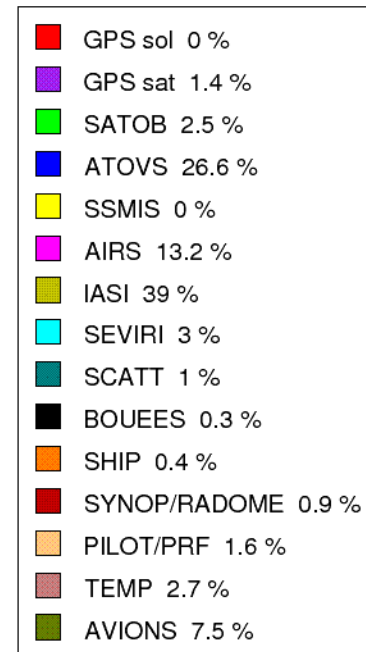
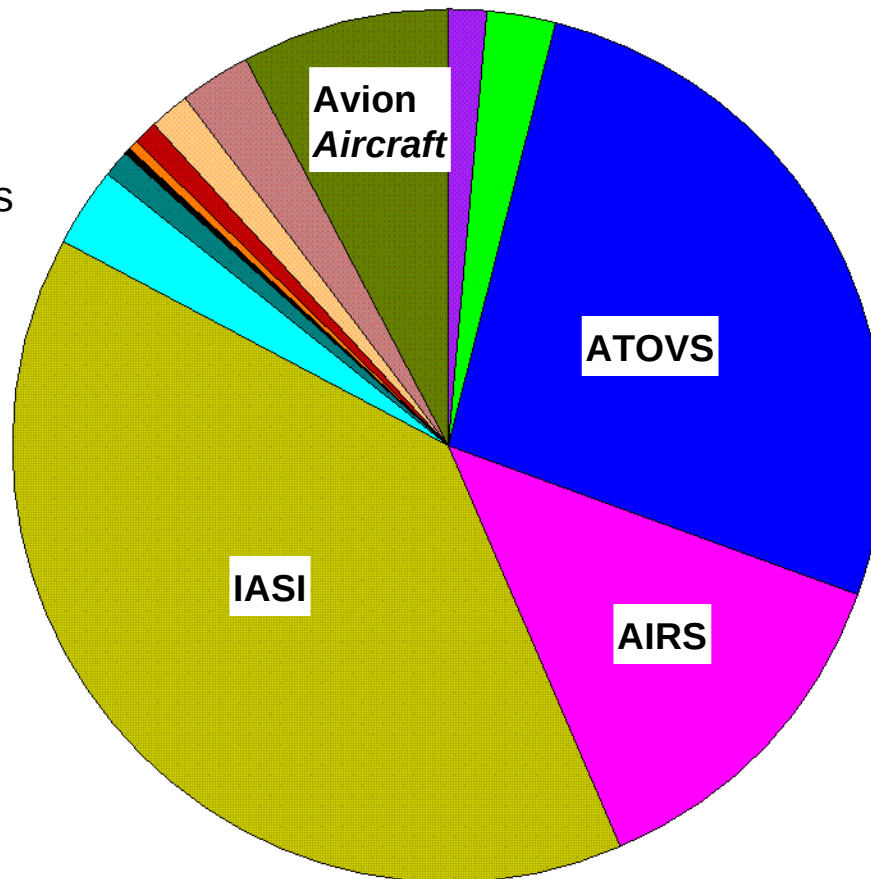


2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

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

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



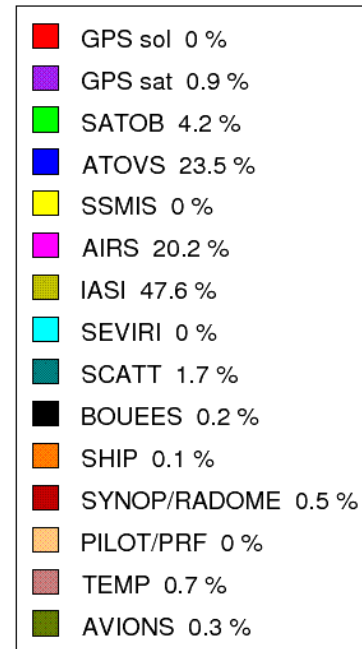
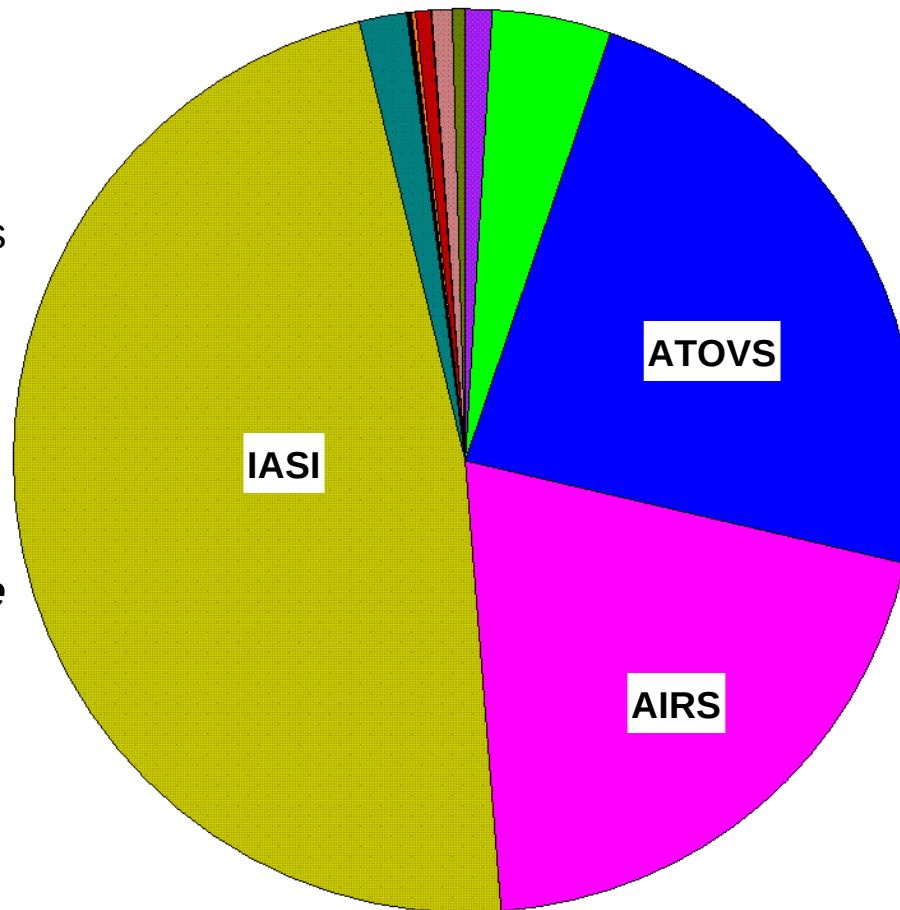
METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

2. L'analyse / *The analysis*

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**):*



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

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. Les spécificités pour les cyclones
5. Performances actuelles
6. Conclusions et perspectives

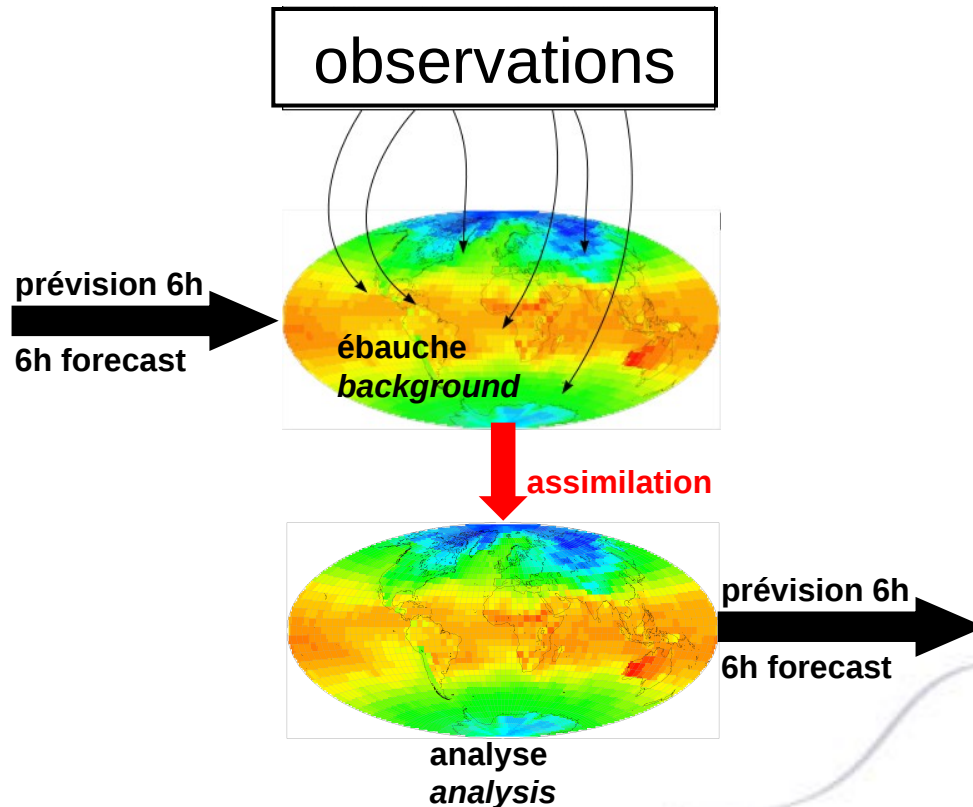
- 1. General principles*
- 2. The analysis (data assimilation)*
 - *The available meteorological observations*
 - *The algorithms of assimilation*
 - *Specificities for cyclone*
- 3. The forecast*
- 4. The specificities for cyclones*
- 5. Present skill*
- 6. Conclusions and prospects*



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***



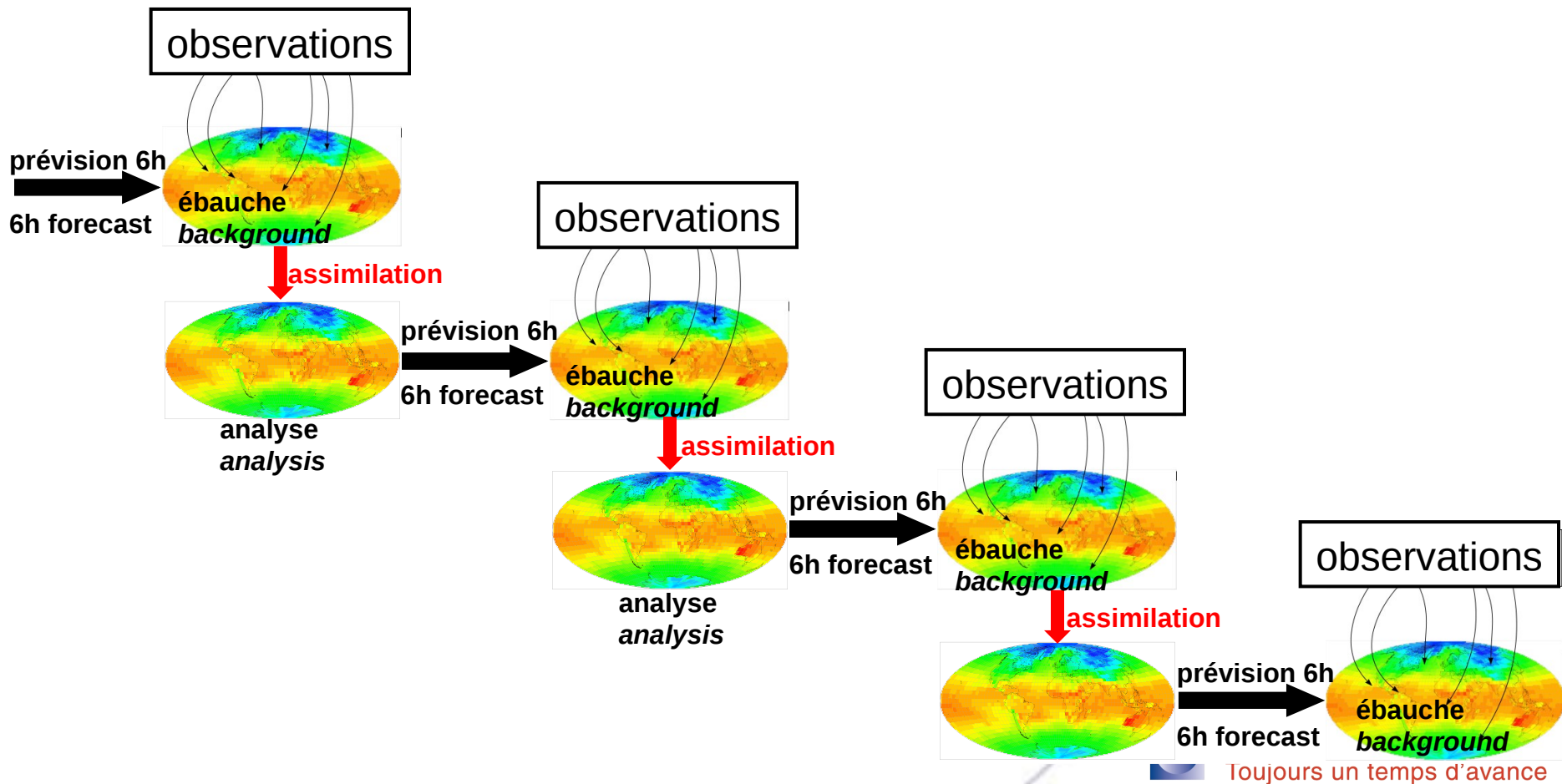
METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Le cycle d'assimilation :

- The assimilation cycle :*



2. L'analyse / The analysis

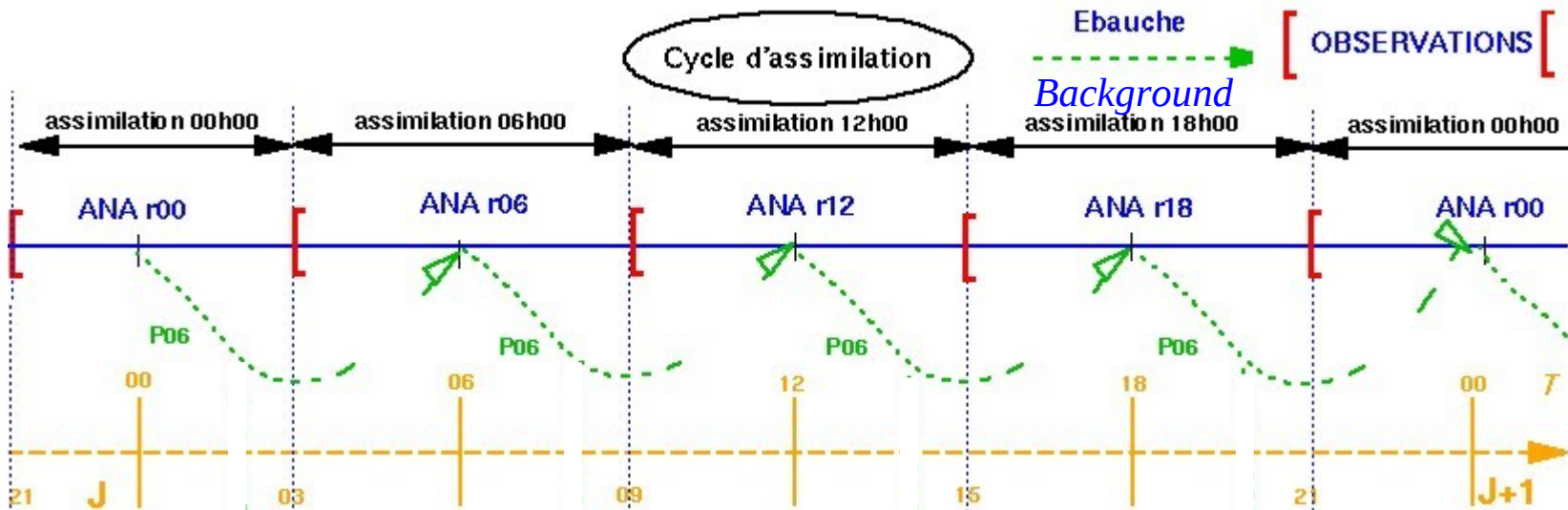
L'assimilation
The assimilation

- Le cycle d'assimilation :

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

- The assimilation cycle :

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

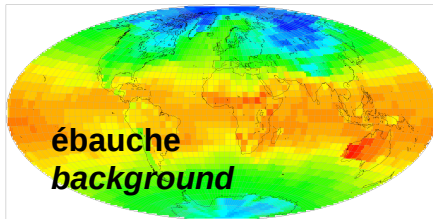


METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Assimilation des observations
par estimation par les moindres
carrés



: vecteur X_b vector

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

observations

: vecteur Y vector

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

H : opérateur d'observation
observation operator

$$X_a = X_b + \mathbf{K}[Y - \mathbf{H}X_b]$$

: la meilleure estimation qui minimise la
variance d'erreur

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

*the best estimator that minimizes the error
variance*

2. L'analyse / *The analysis*

Méthodes de calcul
Methods of computation

- Méthodes de calcul de cette estimation :
 - Interpolation optimale
 - L'assimilation variationnelle : 3D-VAR, 4D-VAR
 - Filtre de Kalman
- *Methods of computation of this estimation:*
 - *Optimal interpolation*
 - *Variational assimilation : 3D-VAR, 4D-VAR*
 - *Kalman Filter*



2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation variationnelle
The variational assimilation

- **Intérêt** de la méthode variationnelle par rapport aux autres méthodes :
 - Permet la prise en compte des **données dérivées** des variables de base du modèle (radiances satellitaires, module du vent,...).
 - **Sélection** de données **globale** plutôt que locale.
 - **Applicable** en **3D** (à un instant donné) ou en **4D** (sur une fenêtre temporelle).
- **Interest** of the variational method compared to the other methods :
 - Allows to take into account some **variables deduced** from model variables (brightness temperatures, wind velocity ...)
 - The observations **selection** is **global** and not local
 - The method **can be applied** in **3D** (at one time) or in **4D** (over a time period)

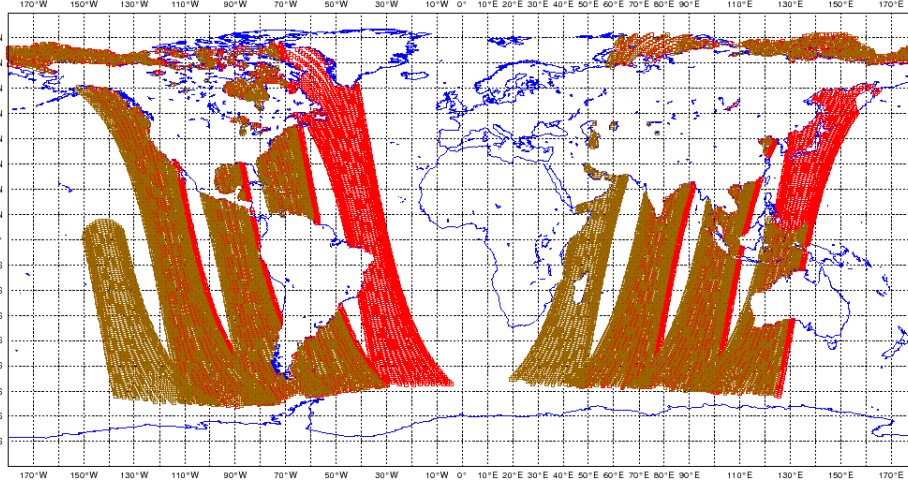


2. L'analyse / *The analysis*

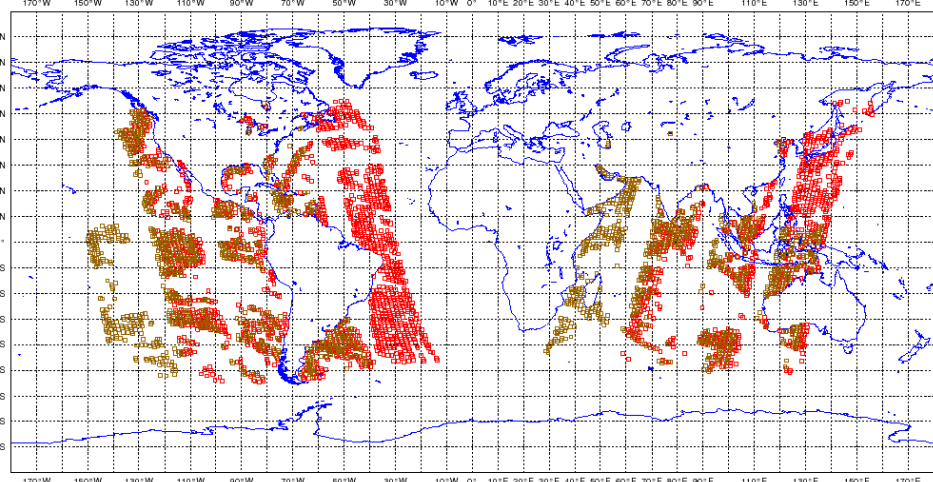
L'assimilation
L'assimilation

- 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
2010/10/05 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations avant screening : 24898



METEO-FRANCE couverture de donnees - SSMIS
2010/10/05 00H UTC cut-off long
Nombre total d'observations apres screening : 4154



Toujours un temps d'avance

Plan

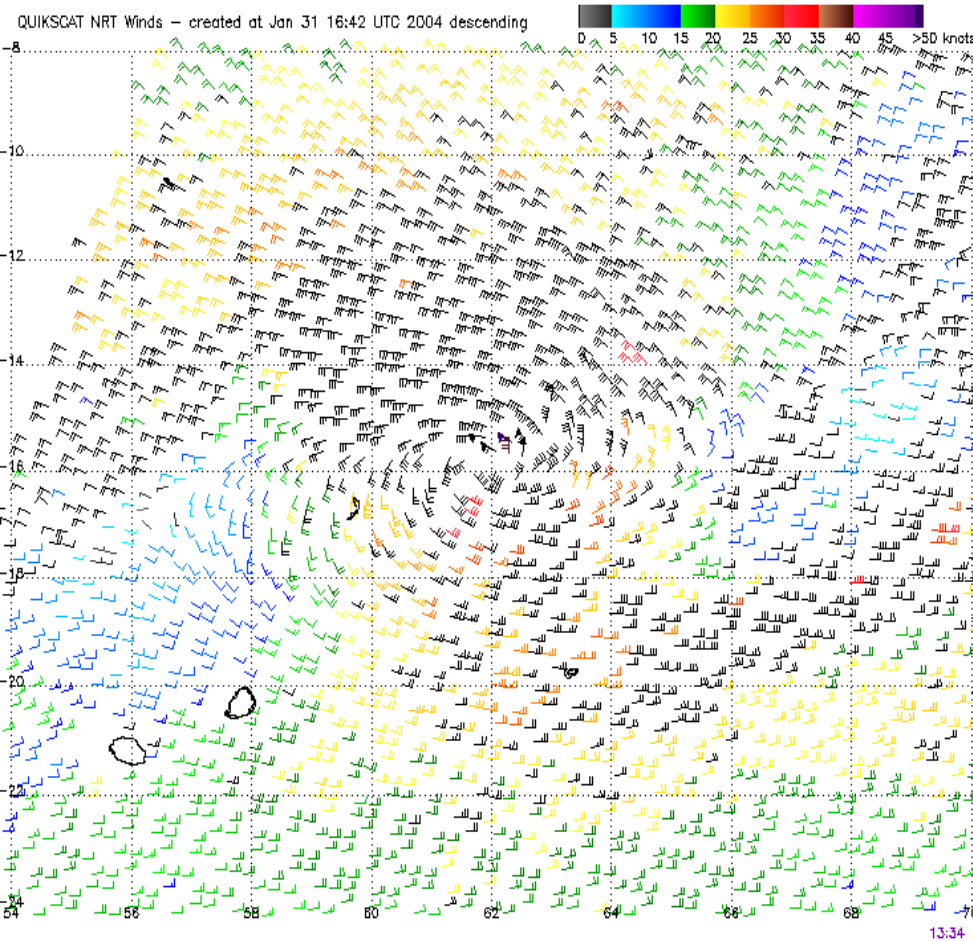
1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
 - Les observations météorologiques disponibles
 - Les algorithmes d'assimilation
 - Spécificités pour les cyclones
3. La prévision
4. Les spécificités pour les cyclones
5. Performances actuelles
6. Conclusions et perspectives

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

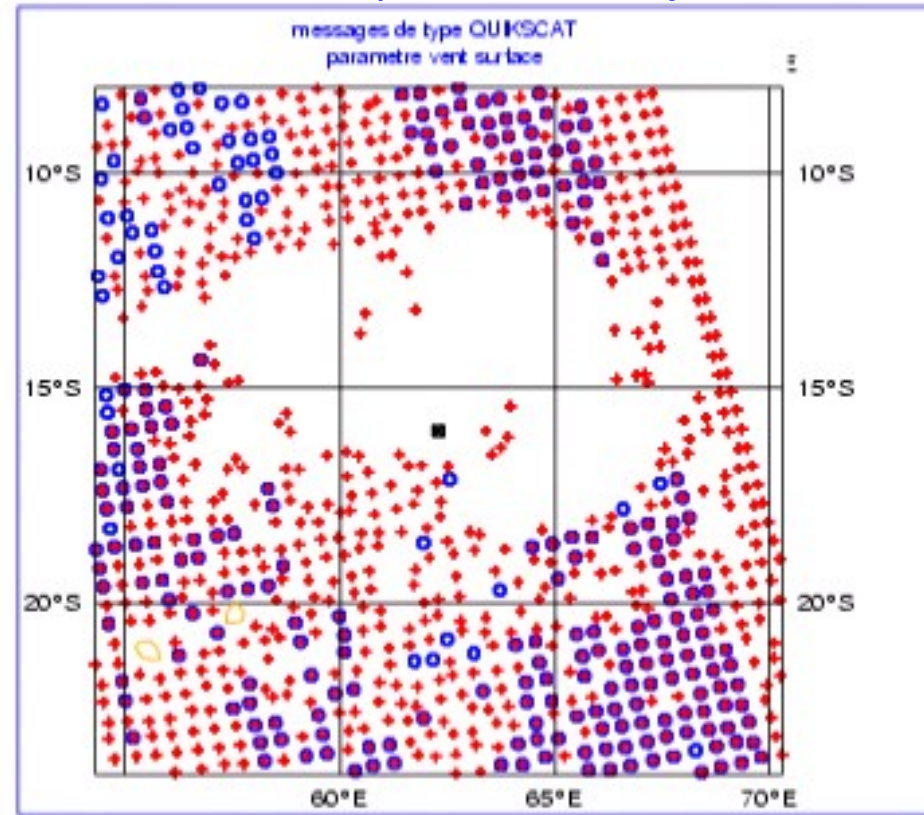


2. L'analyse / The analysis

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones



Observed QuikScat winds



Available QuikScat winds for the analysis :

+ not assimilated

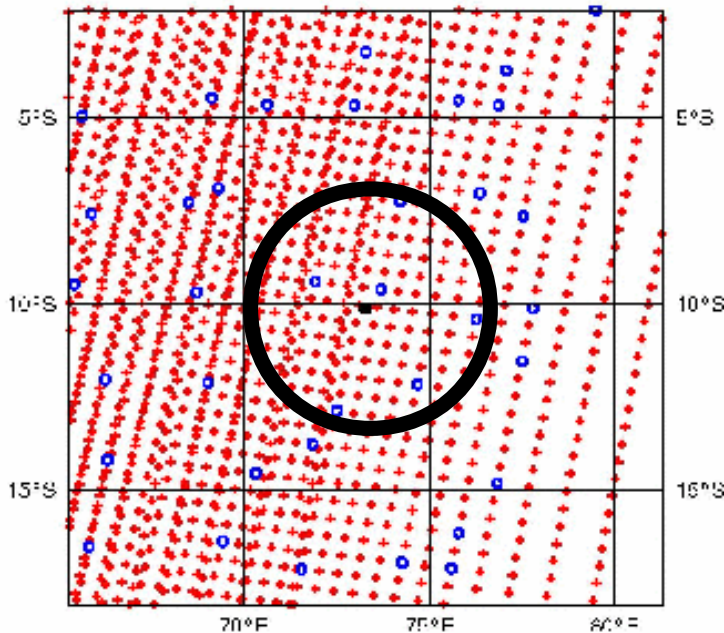
o assimilated



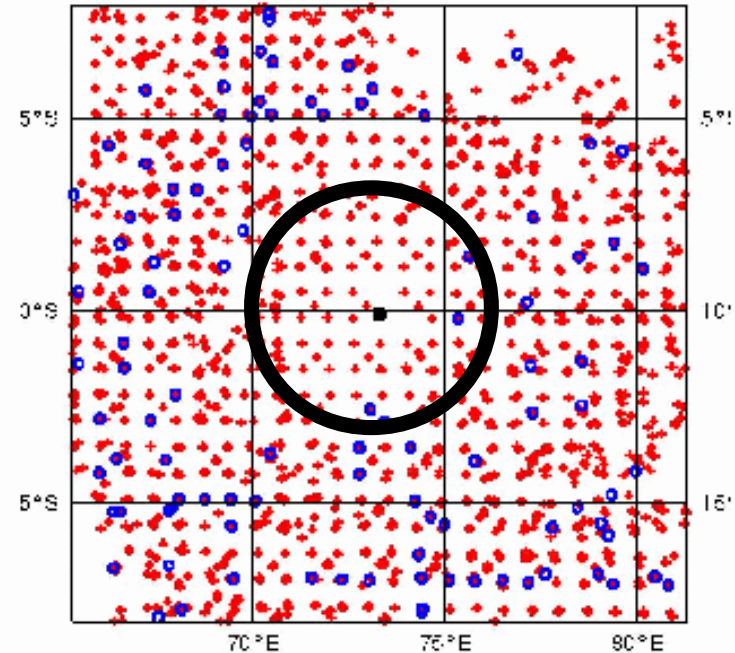
Toujours un temps d'avance

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
Toujours un temps d'avance

2. L'analyse / *The analysis*

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones

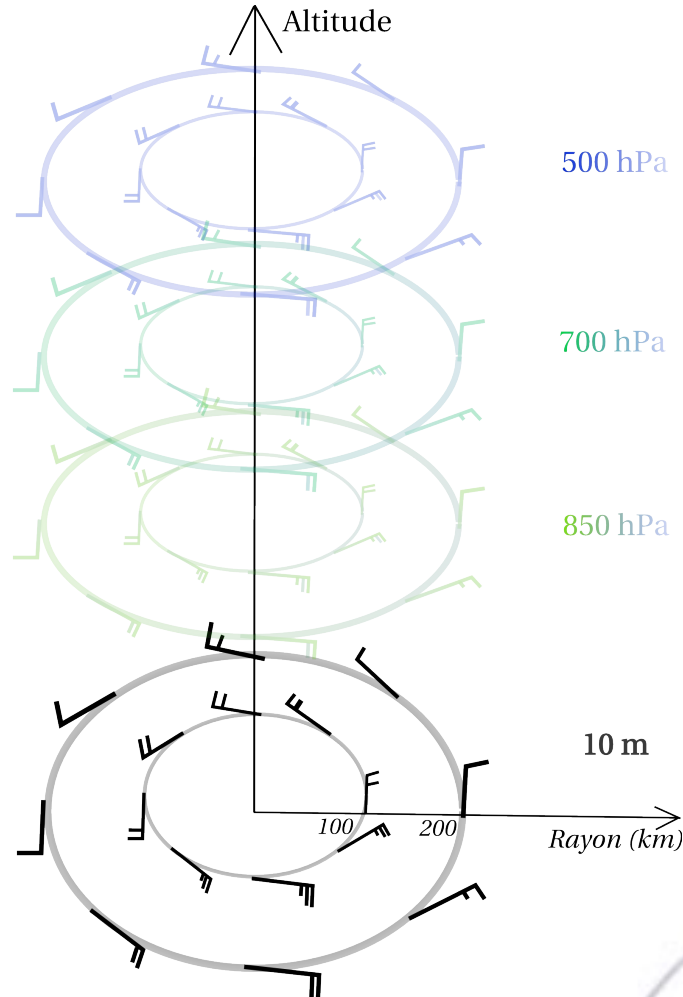
- Les CMRS responsables du suivi des cyclones tropicaux diffusent en temps réel des informations sur le SMT contenant les **caractéristiques des systèmes dépressionnaires tropicaux**
- Ces informations sont issues de l'analyse des prévisionnistes
- Ces pseudo-observations permettent de **pallier en partie le déficit d'information** au coeur du cyclone.
- *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*



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

2. L'analyse / *The analysis*

Bogus 3 D



- 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.*

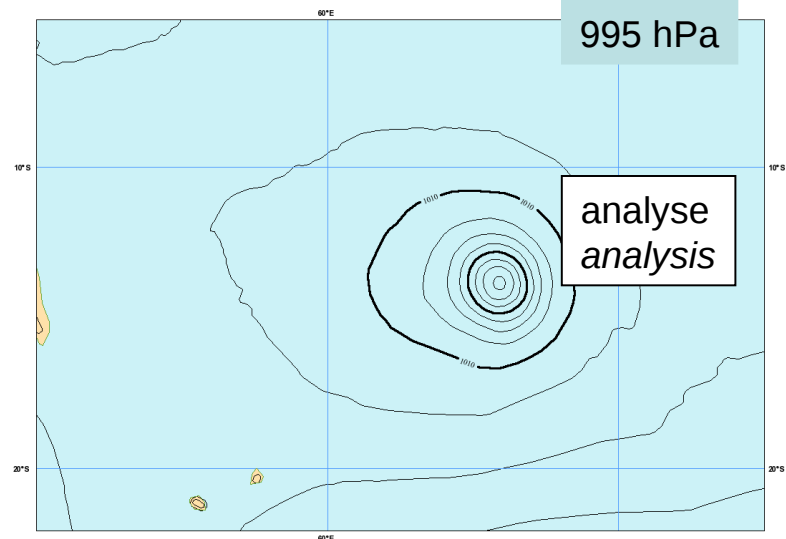
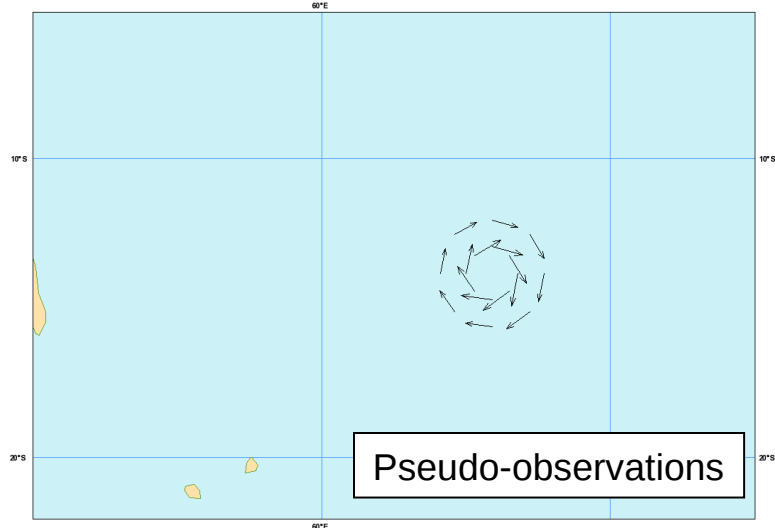
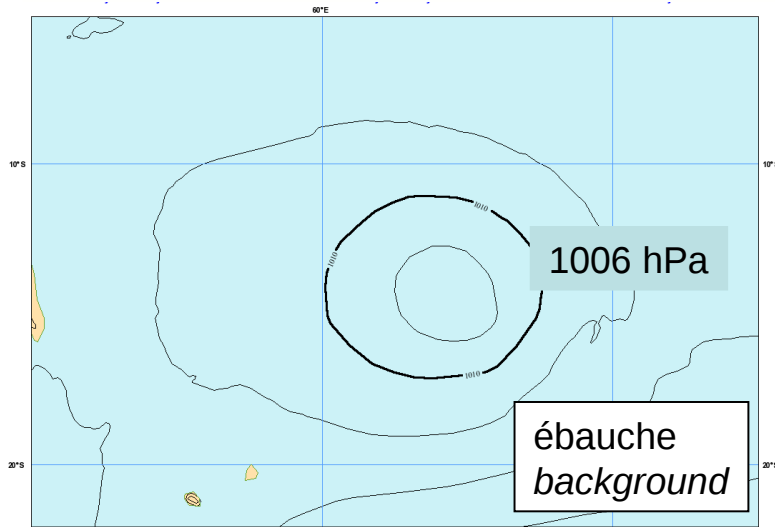


2. L'analyse / *The analysis*

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
Toujours un temps d'avance

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. 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. *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
Toujours un temps d'avance

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
Toujours un temps d'avance

3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- $\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad } p} - 2 \vec{\Omega} \wedge \vec{V} + \underline{\text{F}_f}$ 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
- $p = \rho R T$

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)



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

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 :

- le **vent horizontal** (deux composantes u et v),
- la **température** de l'air T ,
- l'**humidité spécifique**

$$q = M_{\text{eau}} / M_{\text{totale}},$$

- la **pression de surface** p_s

- On peut en déduire toutes les autres quantités :

géopotentiel, la vitesse verticale, le tourbillon, la divergence, le tourbillon potentiel

- *They are evolution equations for :*

- **horizontal** wind (zonal and meridian components),
- air **temperature** T ,
- **specific humidity**

$$q = M_{\text{water}} / M_{\text{total}},$$

- **surface** pressure p_s

- *All other quantities can be deduced from these variables :*

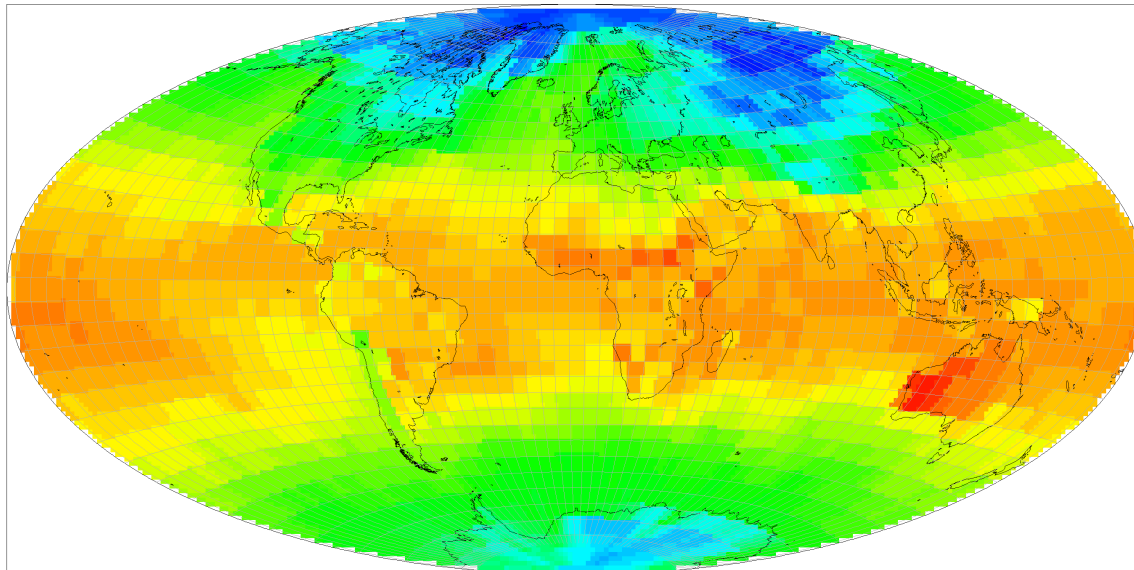
Geopotential height, vertical velocity, vorticity, divergence, potential vorticity ...



3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- Les équations d'évolution sont discrétisées dans l'espace
 - Projection sur des points de grille
 - Projection sur des fonctions spectrales
- *The equations of evolution are spatially discretized*
 - *Projection on gridpoints*
 - *Projection on spectral functions*



3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- Les équations sont calculées par un schéma d'avance temporelle
On doit résoudre un problème de la forme :

- *The equations are computed using a temporal advance scheme*
The problem to be solved is such :

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

Exemple de calcul avec projection sur une grille (différences finies) :

Example of computation for the case of gridpoint projection (finite difference):

$$\begin{aligned} Z(x, \Delta t) &= Z(x, 0) + \Delta t \cdot A[Z(x, 0)] \\ Z(x, t + \Delta t) &= Z(x, t - \Delta t) + 2\Delta t \cdot A[Z(x, t)] \end{aligned}$$

... mais il existe de nombreux schémas temporels plus ou moins efficaces

... but there are several temporal schemes, with different efficiency



Plan

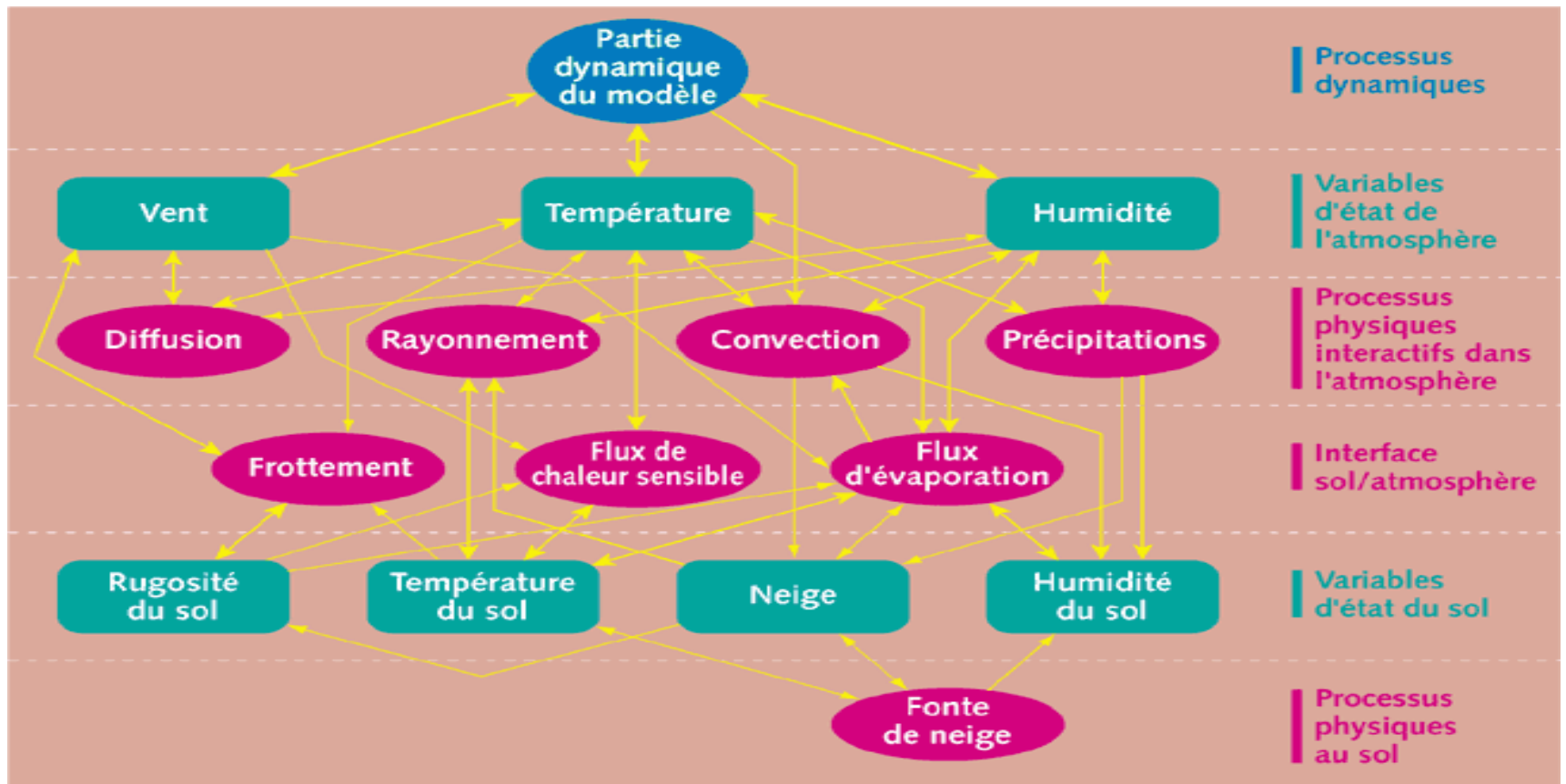
1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
 - Les équations d'évolution
 - Les paramétrisations physiques
 - Les conditions aux bords
4. Performances actuelles
5. Conclusions et perspectives

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. *Conclusions and prospects*



3. La prévision / *The forecast*

Les processus physiques
The physical processes



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

3. La prévision / *The forecast*

Les paramétrisations physiques
The physical parametrizations

- Les phénomènes physiques à paramétrer :
 - le rayonnement,
 - les échanges avec le sol 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

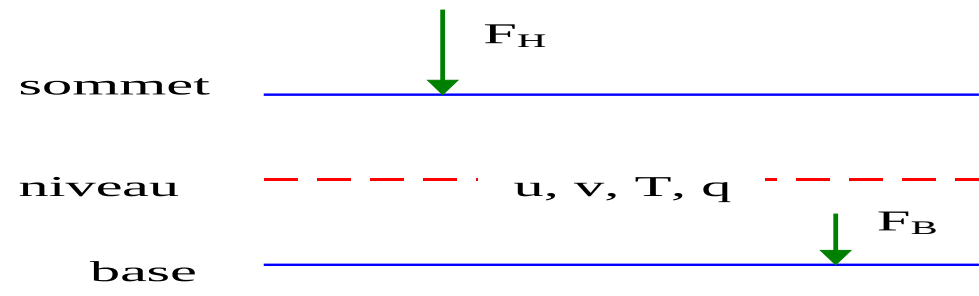
- On cherche à calculer **l'effet moyen** de ces processus sur les variables du modèle.
- On doit évaluer des **flux** (de quantité de mouvement, d'énergie et d'humidité) dus aux divers processus physiques à la base et au sommet de chaque couche du modèle.
- *It is the **mean effect** of these processes 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 two horizontal boundaries. The top boundary is labeled 'sommet' (top) and the bottom boundary is labeled 'base' (bottom). A green arrow labeled F_H points downwards from the top boundary. A green arrow labeled F_B points downwards from the bottom boundary. A dashed red line represents the layer, with the variables u, v, T, q written next to it.

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

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. Conclusions et perspectives

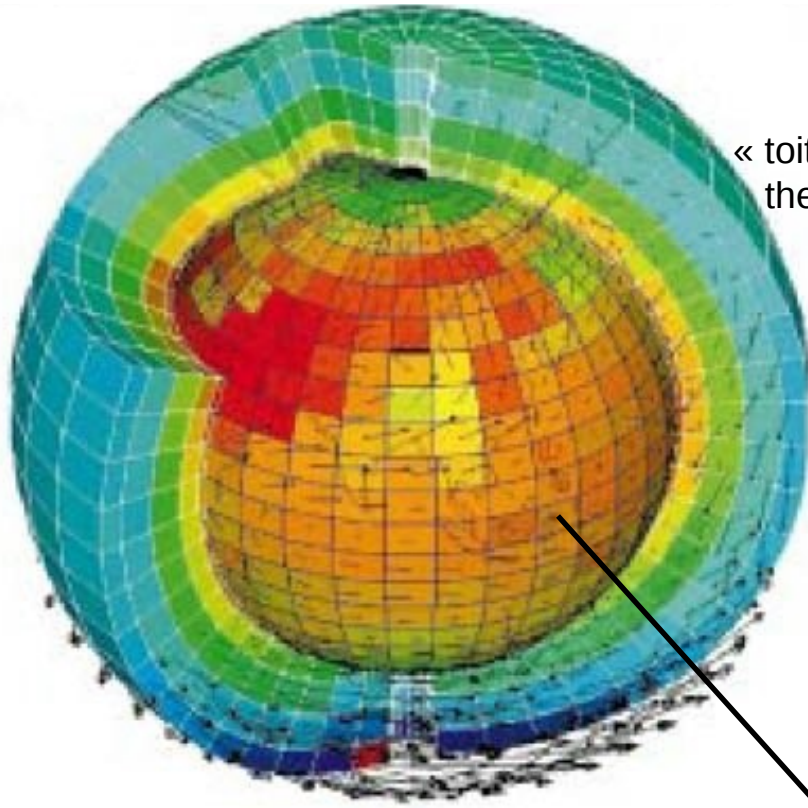
1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
 - *The equations of evolution*
 - *The physical parametrizations*
 - *The boundary conditions*
4. *Present skill*
5. *Conclusions and prospects*



3. La prévision / *The forecast*

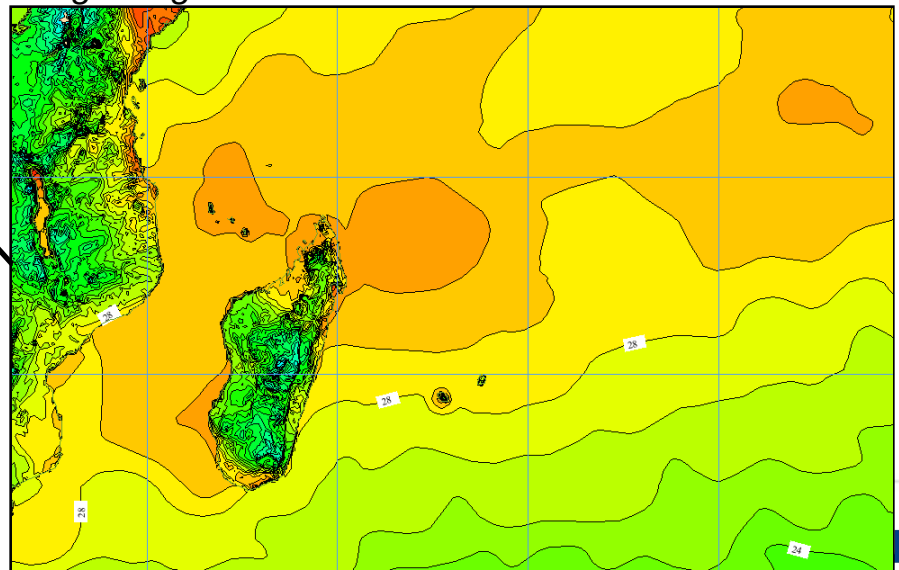
Les conditions aux bords
The boundary conditions

« toit » du modèle très haut (> 10.000 km)
the « top » of the model is very high (>10.000 km)



surface : paramètres météorologiques donnés à chaque début de prévision

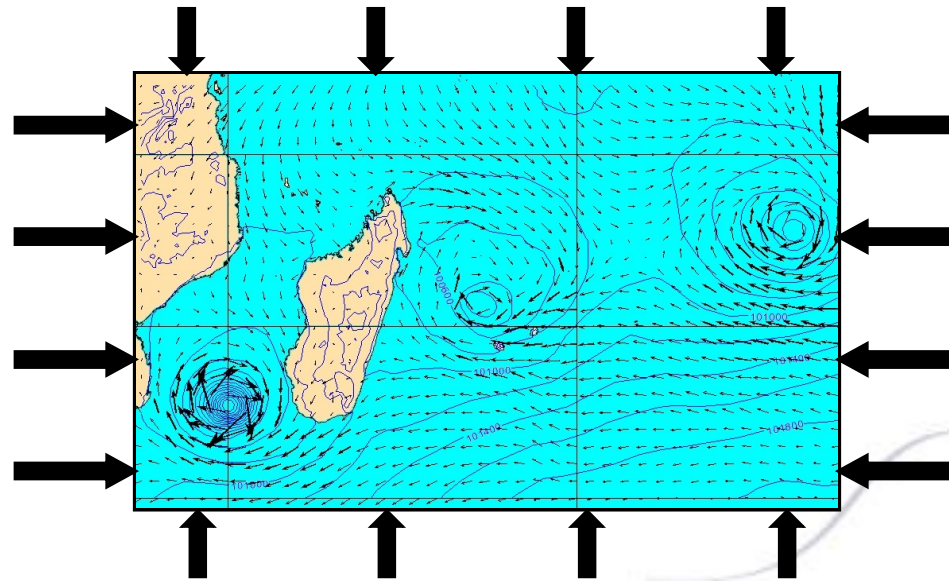
surface: meteorological parameters given at the beginning of each forecast



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
Toujours un temps d'avance

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 2011-2012
5. 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 2011-2012 season*
- 5. Conclusions and prospects*



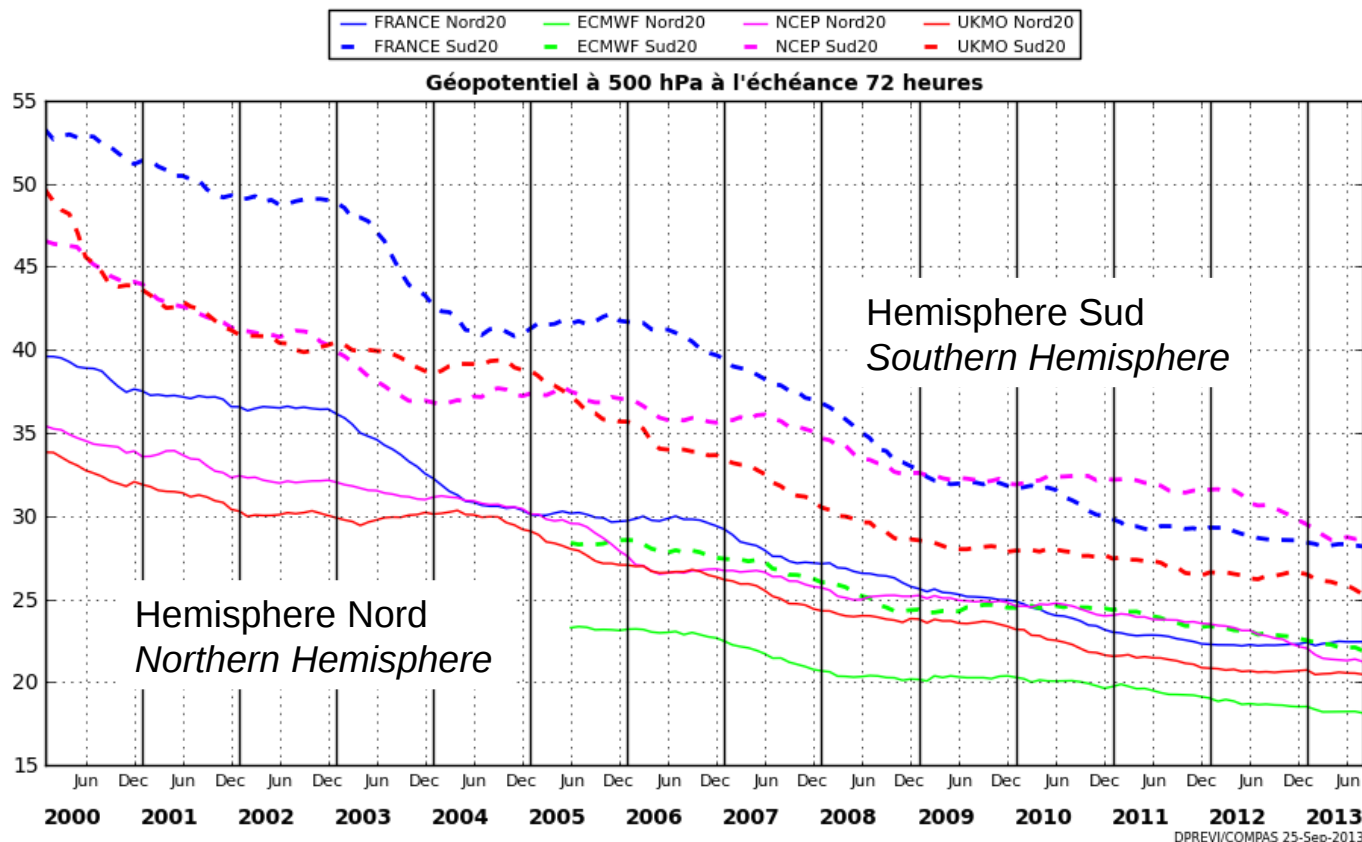
4. Performances actuelles

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) at 06 and 18UTC			Vmax form 12 to 72h (step 12h) 00, 06, 12 and 18UTC							Vmax de 12 à 120h (pas 12h) Réseaux 00, 06, 12 et 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 00UTC 72h at 06UTC 72h at 12UTC 60h at 18UTC	New physics	84h at 12UTC	New physics L46		T538C2.4L60 40 km		New physics (ECUME)		T798C2.4L70 30 km	New physics (Anti-Arpegéades)			
Aladin-Réunion						Beginnig of Aladin-Réunion Bourbon01 9.5km L46 54h at 00UTC 42h at 12UTC		L 6 0	Domain Extensi on 84h at 00UTC 84h at 12UTC	New physics (ECUME)		8km L70		New physics (Anti-Arpegéades)		
ECMWF	T511L60 40km 240h			Update earlier		T799L91 25km 240h				T1279L91 15km 240h						
UKMO	60km L30 144h at 00UTC 48h at 06UTC 144h at 12UTC 48h at 18UTC			4 D - v a r	New physics		40km L50 144h at 00UTC 48h at 06UTC 144h at 12UTC 48h at 18UTC		New physics		New physics		L70	25km L70 144h 00UTC 48h at 06UTC 144h 12UTC 48h at 18UTC	New physics (surface)	
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
-------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

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*

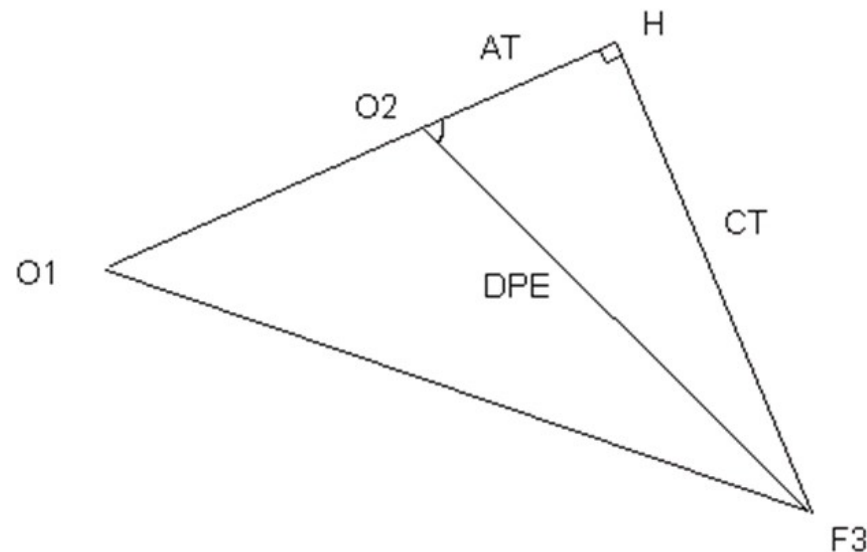


4. Performances actuelles

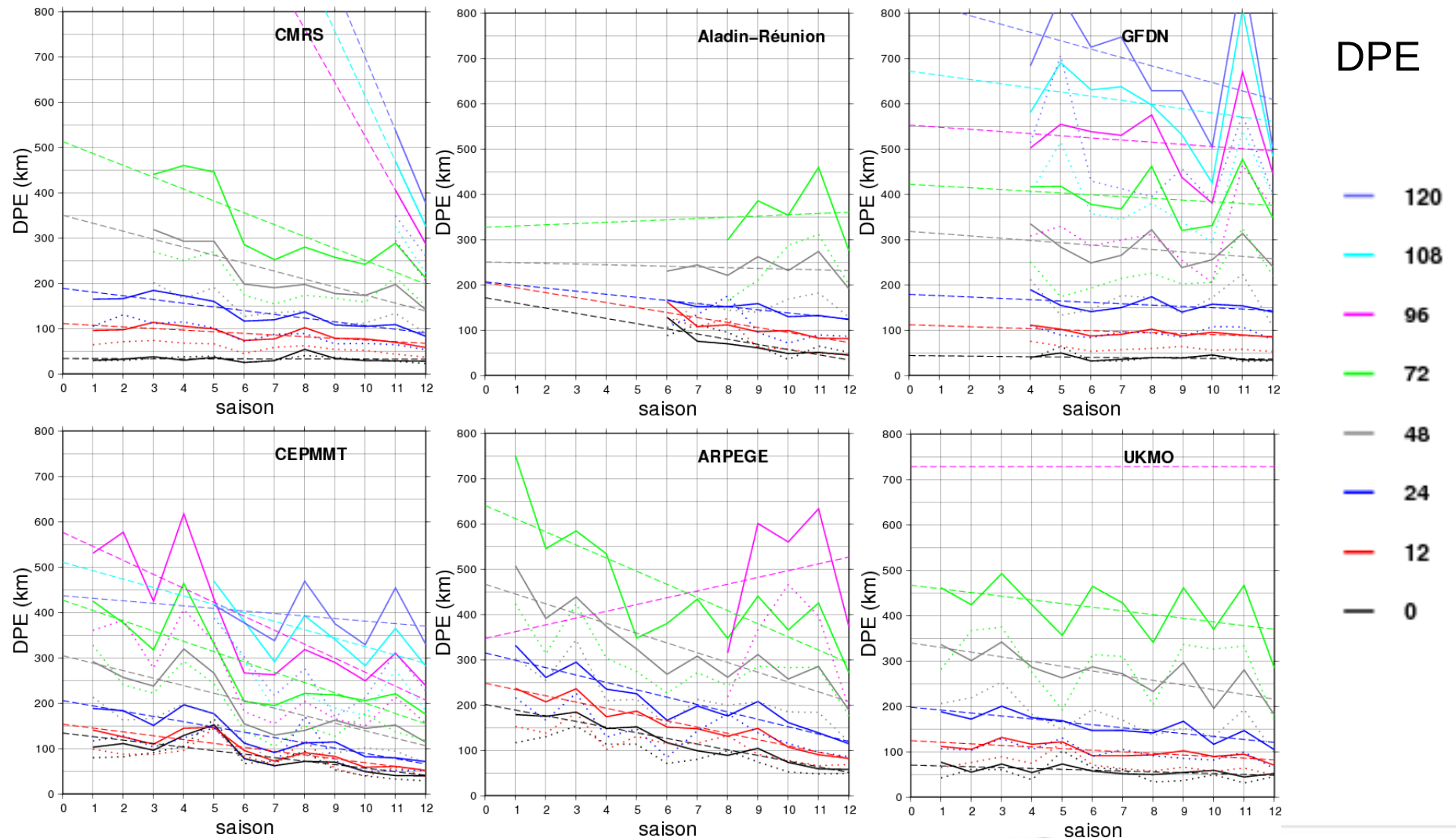
Present skill

Performances sur les trajectoires
Skill about tracks

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

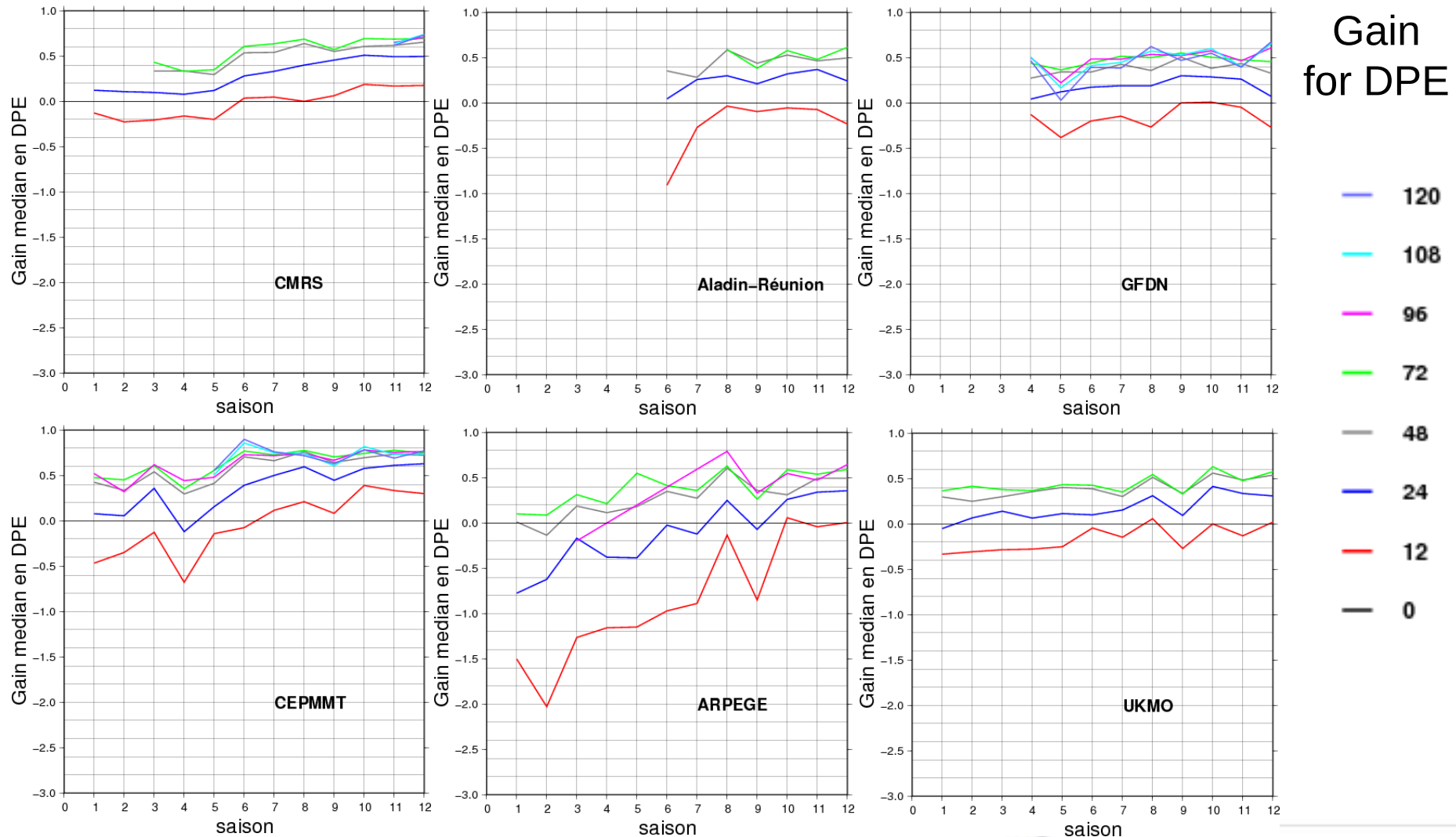


4. Performances actuelles (Bassin SOOI) *Present skill (Basin SWIO)*



4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)



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
 - ✓ À courte échéance, limité à l'exception du CEP
 - ✓ Plus net pour les modèles à résolution plus lâche
- *Improved model about track*
 - ✓ *Better for long forecast time*
 - ✓ *Limited but still possible*
 - ✓ *Small standard deviation*
- *Significance of assimilation / resolution*
 - ✓ *ECMWF is the best and more sensitive to long forecast time*
- *Gain*
 - ✓ *Limited for small forecast time, excluding ECMWF*
 - ✓ *More sensitive for coarser models*



4. Performances actuelles

Present skill

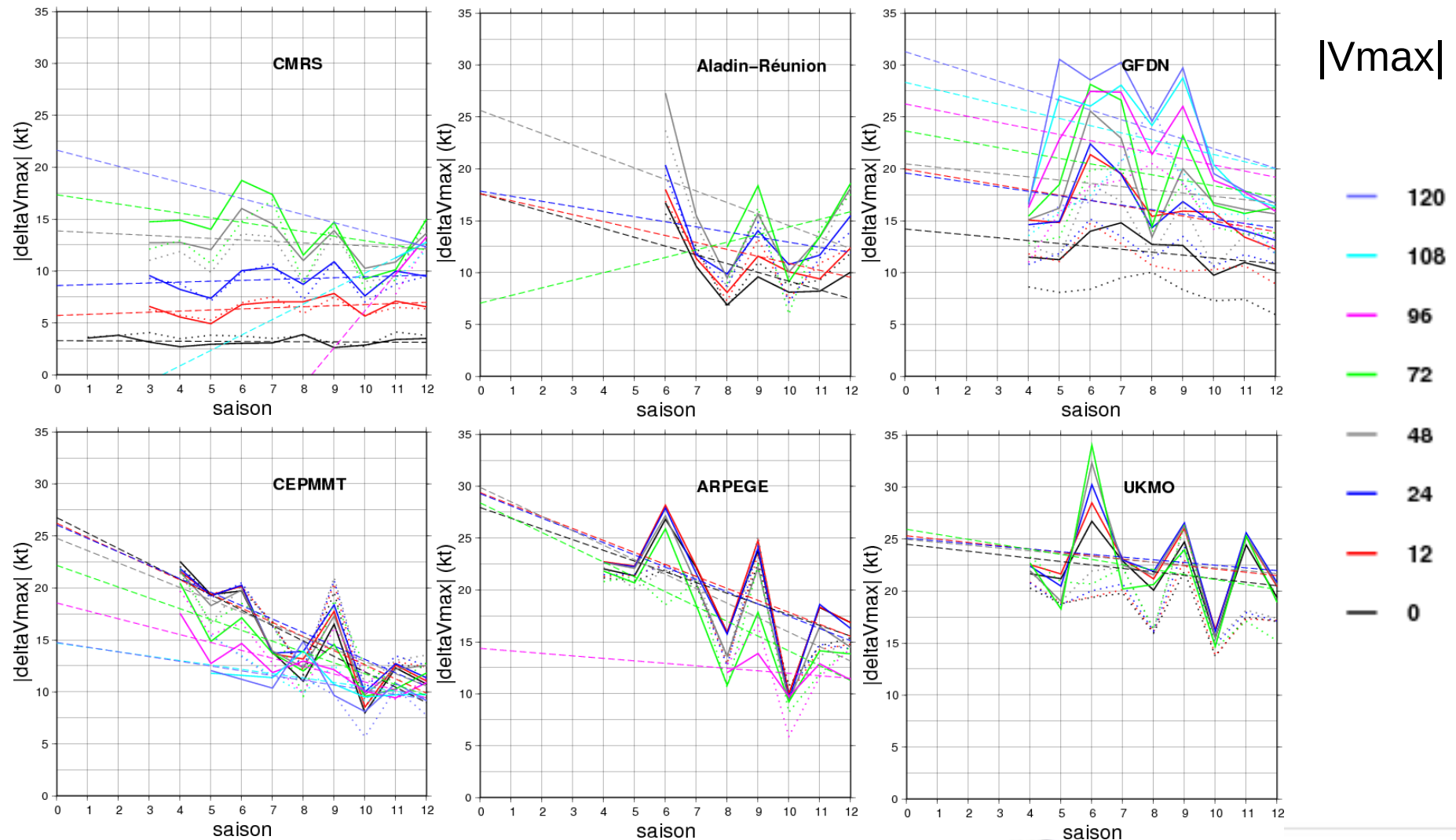
Performances sur les intensités
Skill about intensity

- $\Delta V_{\max} = V_{\max \text{ prévu}} - V_{\max \text{ obs}}$
 - ✓ 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*
 - $\text{Gain } V_{\max} = \frac{|RefError| - |ModelError|}{|RefError|}$



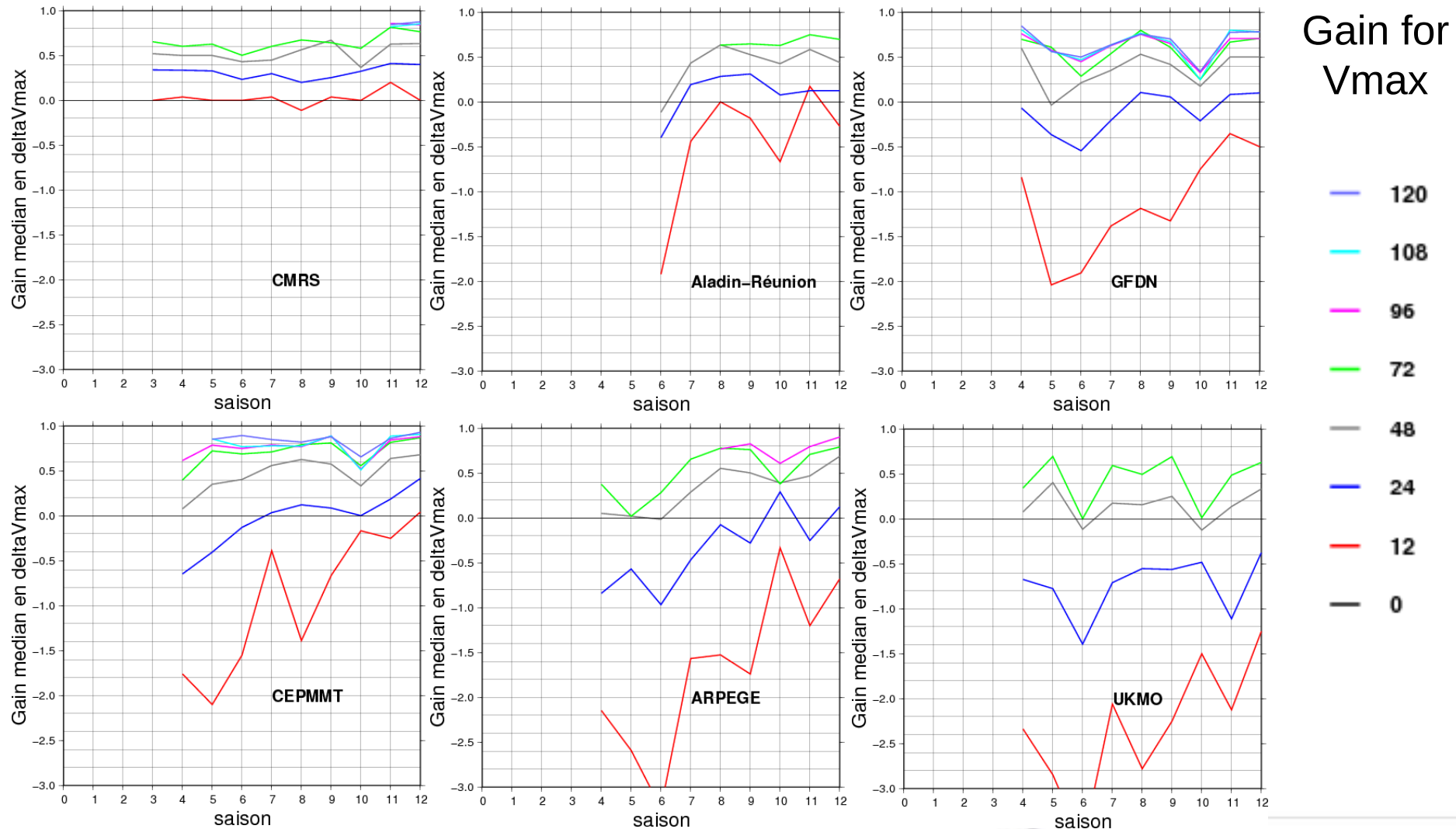
4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)



4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)

Performances sur les intensités
Skill about intensity

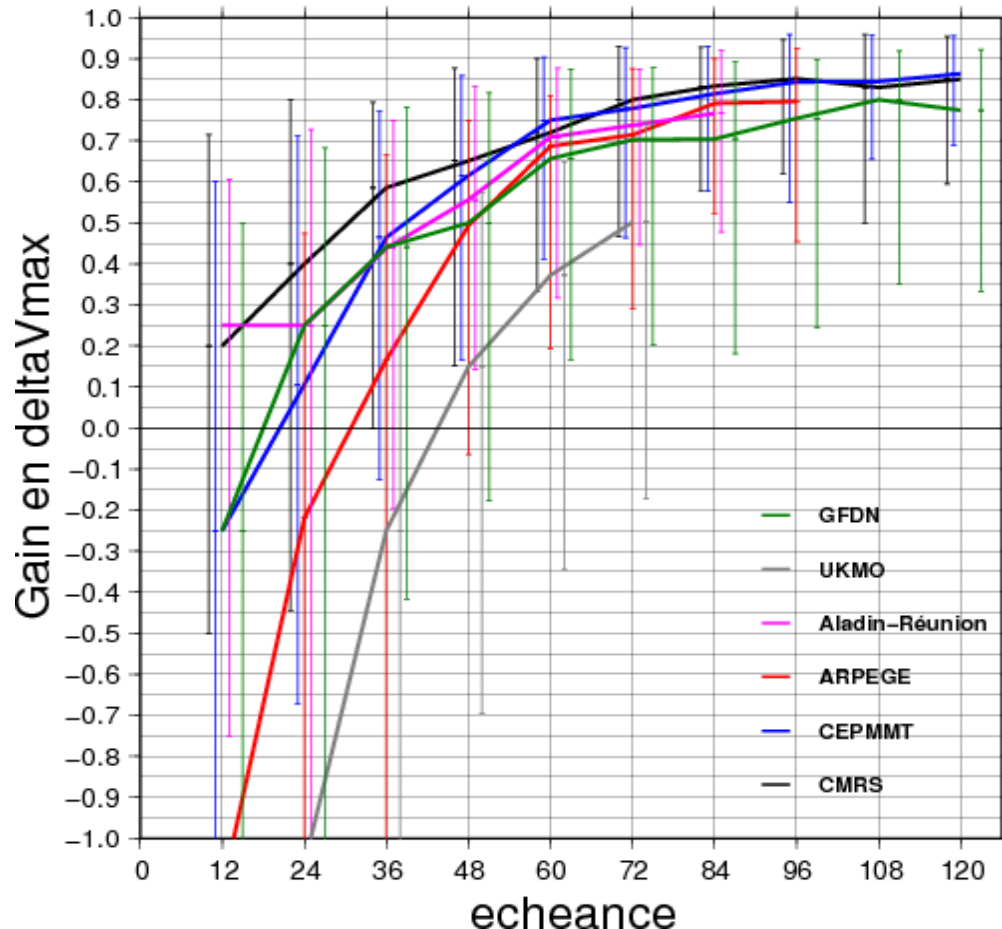
- CMRS : le meilleur mais peu d'évolution au fil des années
 - Meilleur modèle numérique :
 - ✓ CEP ... et continue à se bonifier!
 - ✓ Dégradation d'Aladin-Réunion en 2012-2013 suite aux modifications pour limiter les sur-intensifications
 - Principaux avantages :
 - ✓ Informatif dès 24h
 - ✓ Amélioration sensible au fil des saisons
 - Principal défaut : Attention aux écart-types importants
- *RSMC : the best but little change over the years*
 - *The best numerical model :*
 - ✓ *CEP ... and it continue to be better!*
 - ✓ *Worse results for Aladin-Réunion during 2012-2013 due to changes to limit over-intensification*
 - *Main advantages :*
 - ✓ *Informative from 24h*
 - ✓ *Better during seasons*
 - *Main default : Attention to important standard deviations*



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

Saison 2011-2012
Season 2011-2012

Gain médian, quantiles 25% et 75%
pour la saison 2011-2012



- Aladin-Réunion : meilleur modèle numérique jusqu'à 36h
- CMRS et CEP équivalents à partir de 60h
- Forte dispersion
- Sur ou sous-estimation?
- *Aladin-Réunion : best numerical model until 36h*
- *CMRS and CEP : same gain from 60h*
- *High dispersion*
- *Over or under-estimation*



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

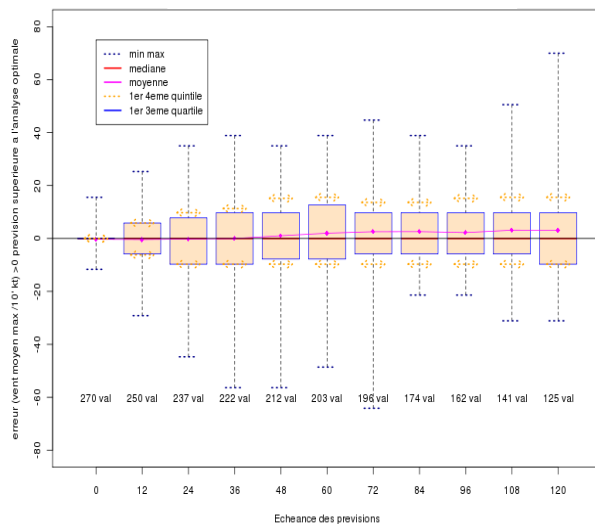
4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)

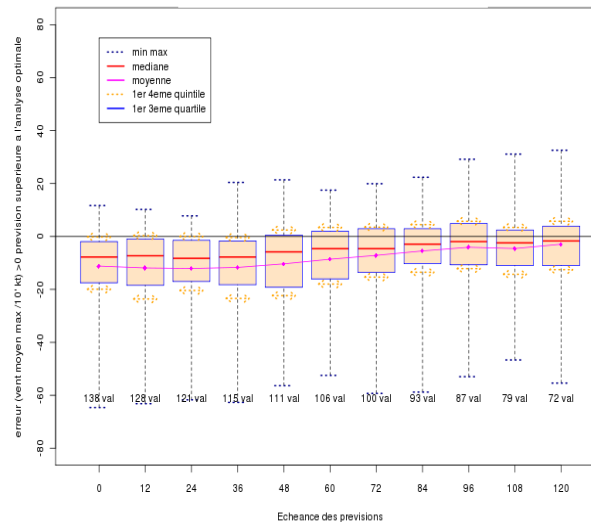
Saison 2011-2012
Season 2011-2012

- CMRS : biais le plus faible (et médiane parfaite!) avec tendance à la sur-estimation
- CEP : biais diminue avec les échéances
- Aladin-Réunion :
 - ✓ Caractère trop intense a disparu
 - ✓ Mais dispersion maximale importante à l'analyse
- Mais gros défaut : dispersion reste importante pour CMRS et modèles
- RSMC : lowest bias (and perfect median!) with tendency to over-estimate
- CEP : bias decreases during forecast time
- Aladin-Réunion :
 - ✓ Too intense feature no longer exists
 - ✓ But significant standard deviation at analysis
- But significant defect : significant standard deviation for RSMC and models

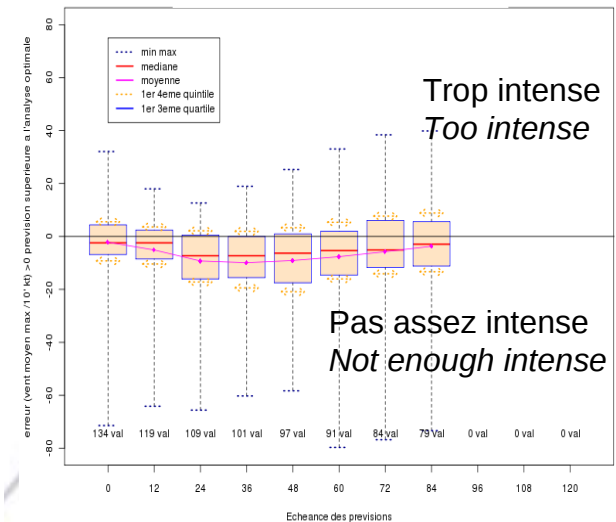
CMRS / RSMC



CEP / ECMWF



Aladin-Réunion



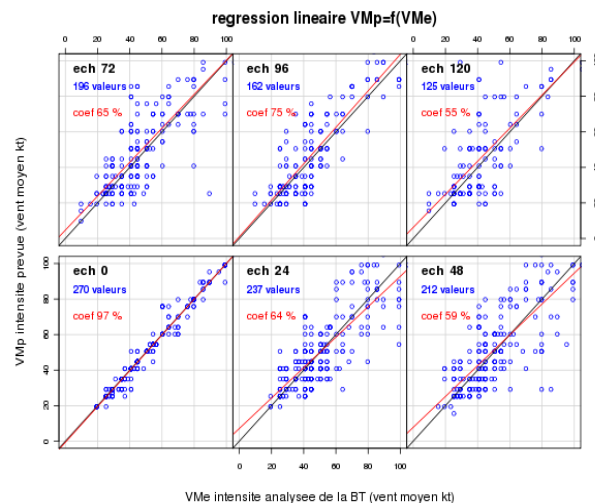
4. Performances actuelles (Bassin SOOI)

Present skill (Basin SWIO)

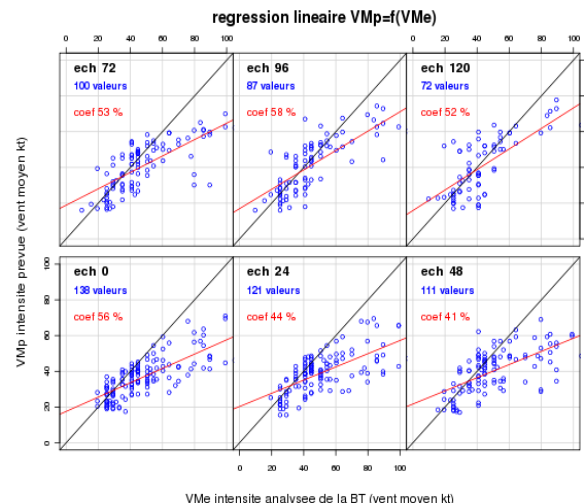
Saison 2011-2012
Season 2011-2012

- CMRS : biais faible qq soit les valeurs de vent mais dispersion dégrade les prévisions
- CEP : Pas assez intense surtout aux courtes échéances mais pas de surintensification pour les cas très intenses
- Aladin-Réunion :
 - ✓ Dispersion importante à l'analyse pour les fortes valeurs
 - ✓ Pas assez intense pour les fortes valeurs mais des cas de sur-intensification persistent pour Ech>48h
- RSMC : low bias regardless wind values but standard deviation degrades forecasts
- CEP : Not enough intense especially for short forecast time but not over-estimate for intense cases
- Aladin-Réunion :
 - ✓ Significant deviation at analysis for high values
 - ✓ Not enough intense for high values but some over-estimated cases exist for forecast time >48h

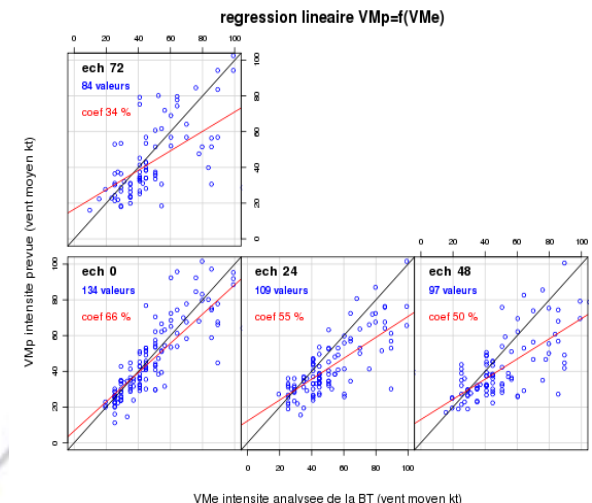
CMRS / RSMC



CEP / ECMWF



Aladin-Réunion



Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. Performances actuelles
5. Conclusions et perspectives

1. *General principles*
2. *The analysis (data assimilation)*
3. *The forecast*
4. *Present skill*
5. *Conclusions and prospects*



5. 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**



5. Conclusions et perspectives

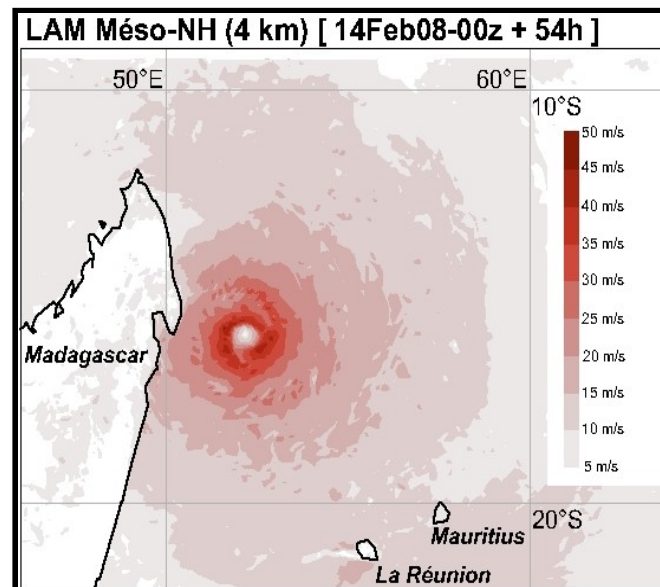
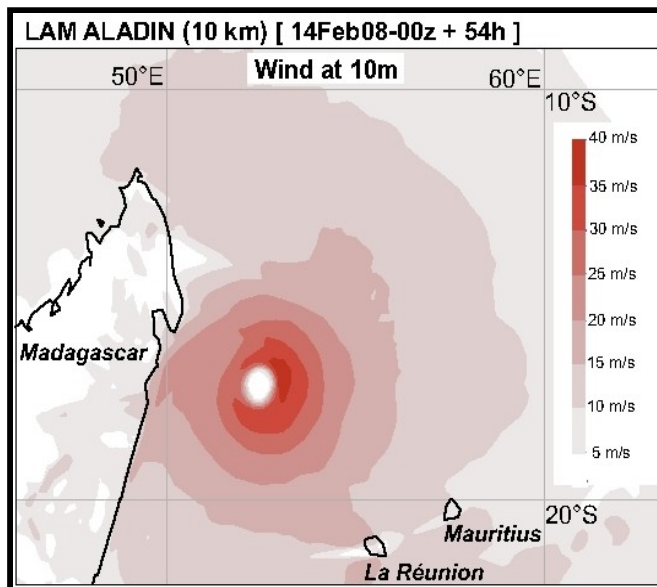
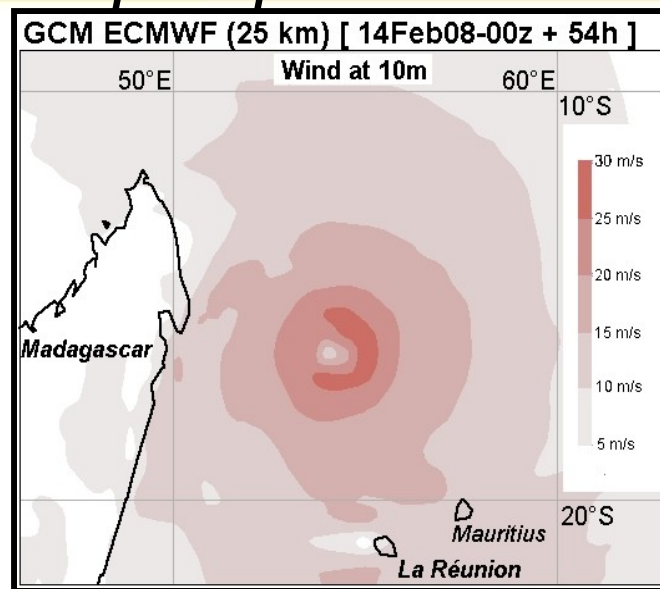
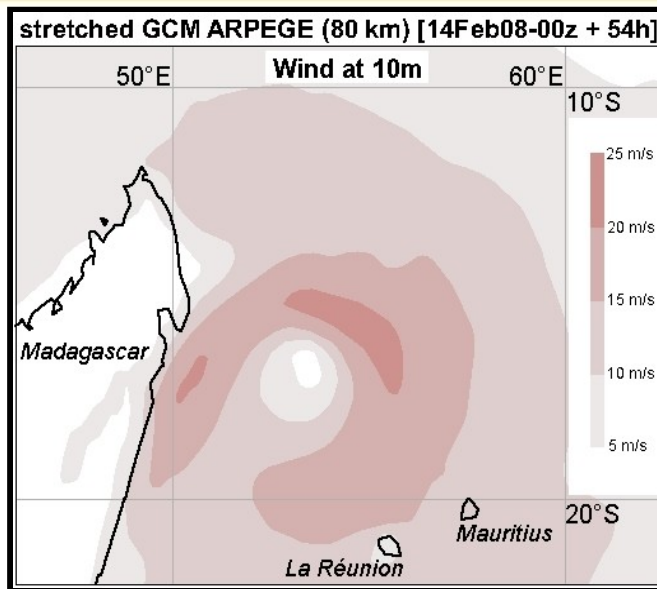
Conclusions and prospects

- 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
- 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)
- *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*
- *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)*



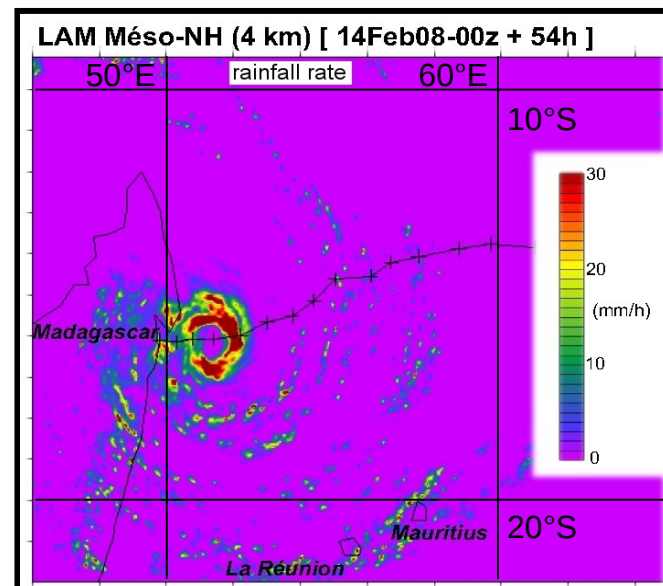
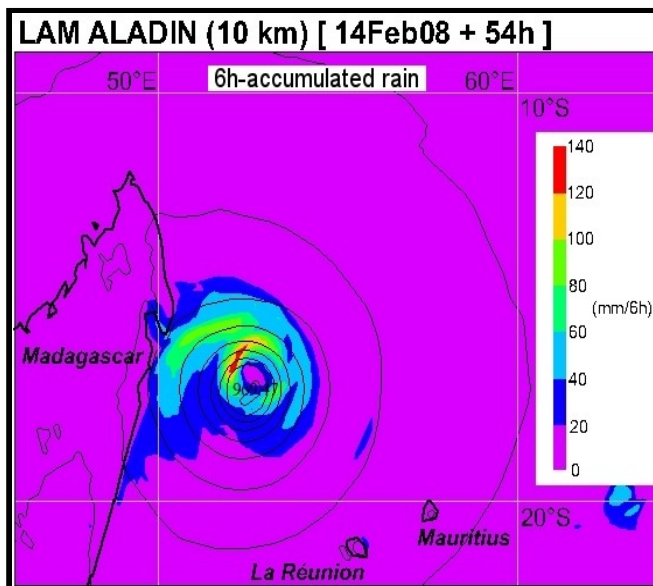
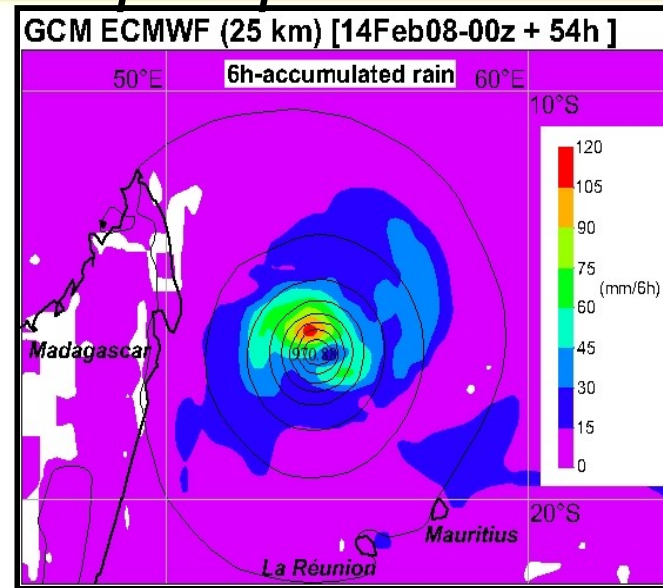
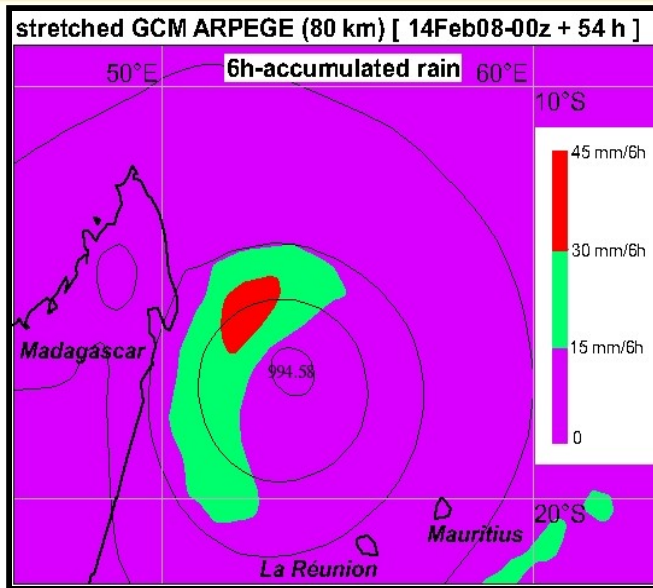
5. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects



5. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

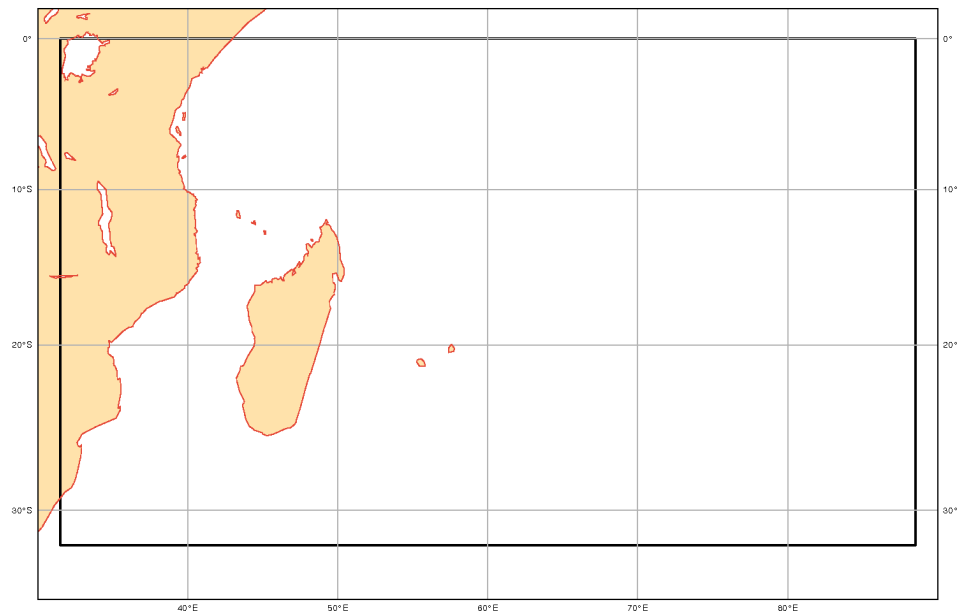


5. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

- Aladin-Réunion depuis 2006 jusqu'en 2016
- Principales caractéristiques
 - 8km de résolution horizontale / 70 niveaux verticaux
 - Assimilation 3D-Var + bogus
 - 84h à 00 et 12UTC
- *Aladin-Réunion since 2006 until 2016*
- *Main features*
 - *8km horizontal resolution / 70 vertical levels*
 - *3D-Var assimilation + bogus*
 - *84h leadtime forecasts at 00 and 12UTC*

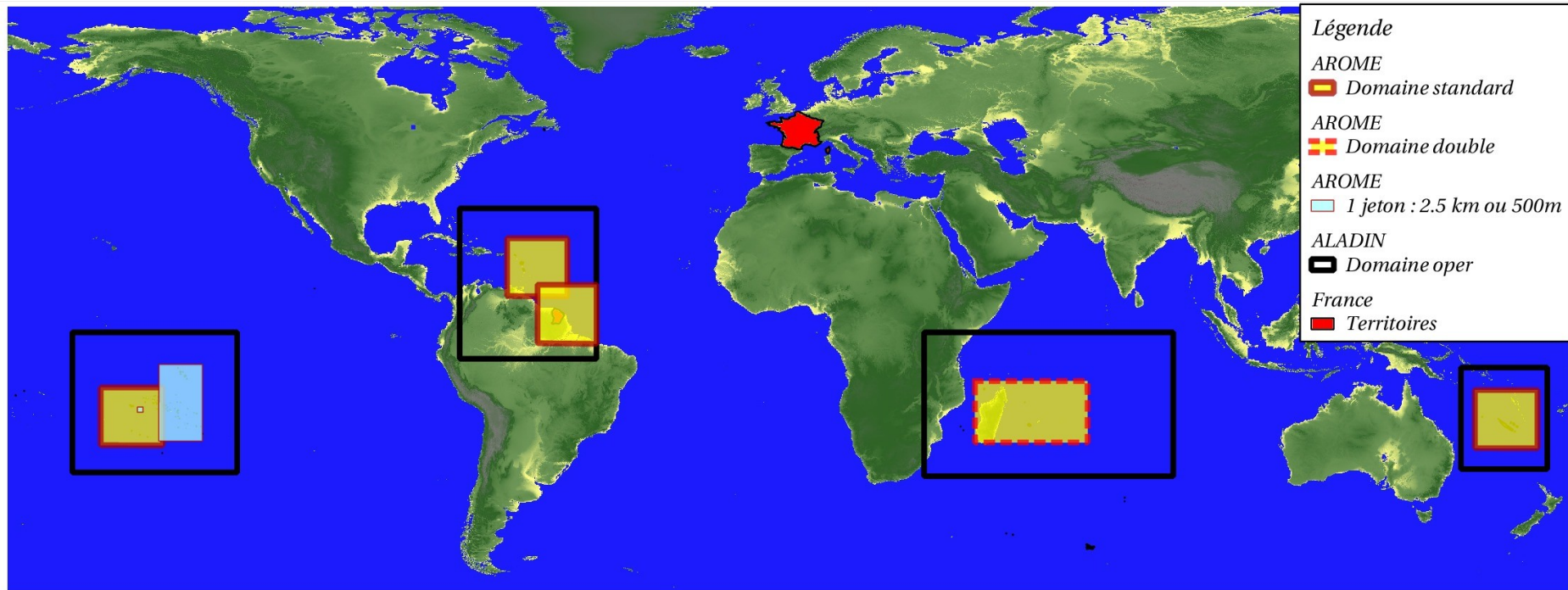
ALADIN-REUNION DOMAIN



5. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

- En 2016, Météo-France déploiera un ensemble de 4 modèles de méso-échelle en remplacement des Aladins-OM
- In 2016, Météo-France will start deploying an ensemble of 4 mesoscale operational NWP systems to replace current overseas Aladin operational models



5. Conclusions et perspectives

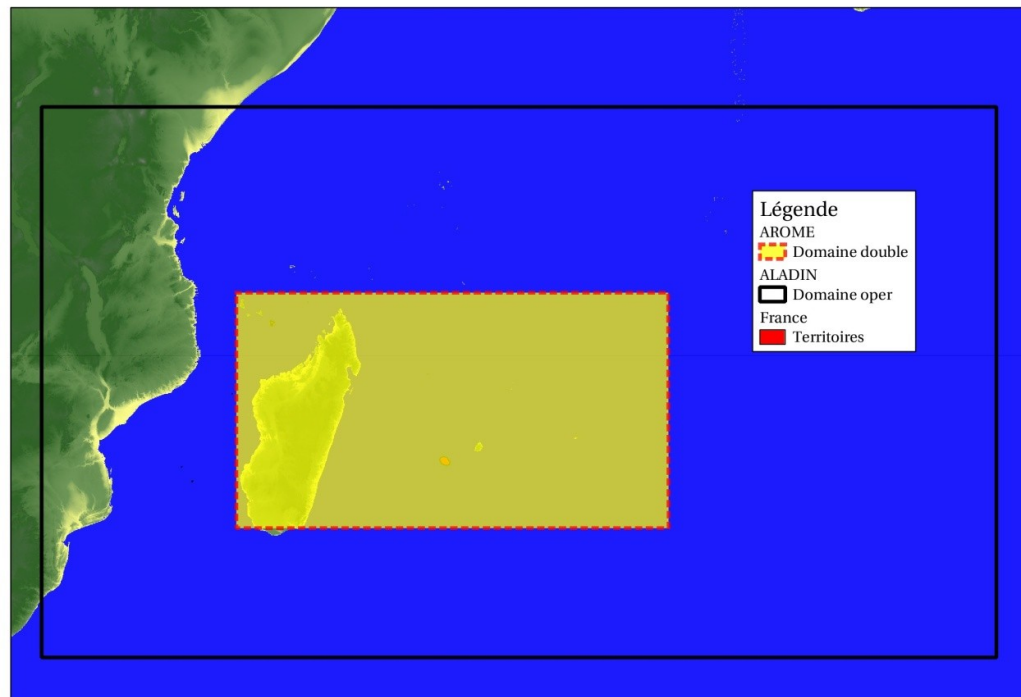
Conclusions and prospects

■ Arome-Réunion

- 2km5 / 90 niveaux verticaux
- Initialisé par CEP
- 36h à 00, 06, 12 et 18 UTC ou 72h à 00 et 12UTC
- Convection profonde résolue explicitement
- Assimilation 3D-Var de méso-échelle (radar)

■ Arome-Réunion

- 2km5 / 90 vertical levels
- Initialized by ECMWF
- 36h at 00, 06, 12 and 18 UTC or 72h at 00 and 12UTC
- Explicit resolution of the deep convection
- Mesoscale 3D-Var assimilation scheme



5. Conclusions et perspectives

Conclusions and prospects

- Et le couplage océanique?
 - Permet de limiter les intensités
 - Peut expliquer certaines intensifications rapides dans le canal du Mozambique
- And what about ocean coupling?
 - To limit the intensity
 - Can explain some rapid intensification in Mozambique Channel





METEO FRANCE

Toujours un temps d'avance