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, septembre 2017

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. La prévision d'ensemble
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. Ensemble prediction

5. Conclusions and prospects

METEO FRANCE

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)*

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*

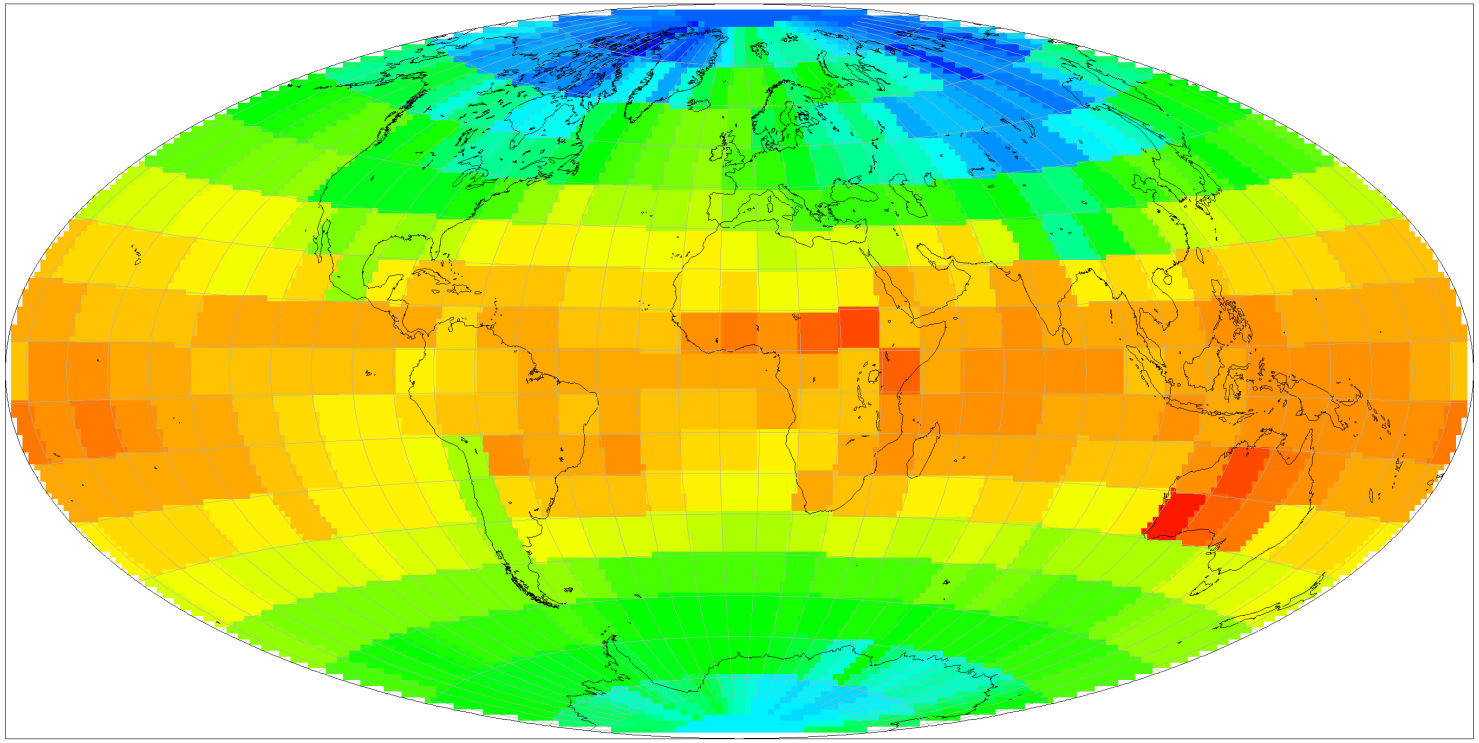
  = an initial-value problem

- *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*

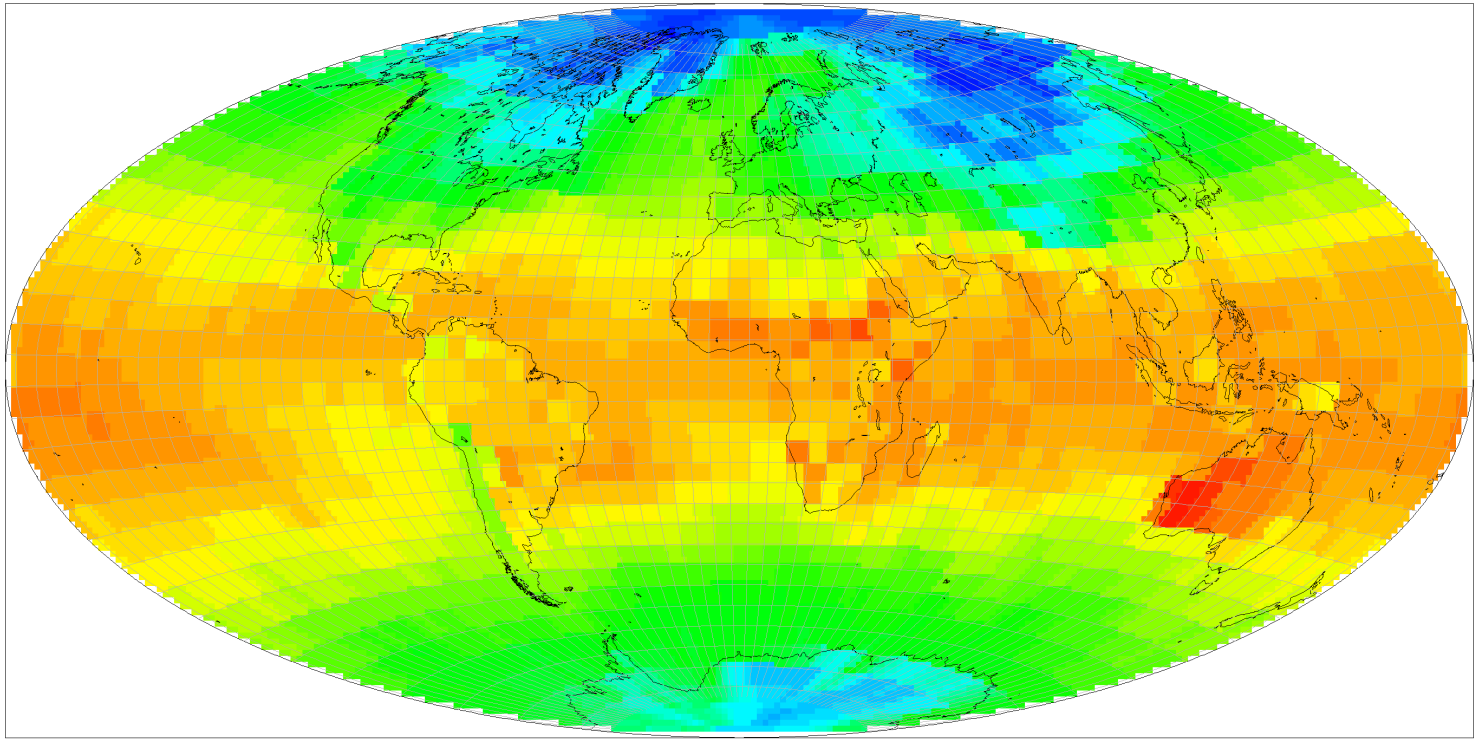


resolution 10°

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

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



resolution 5°

1. Principes généraux / *General principles*

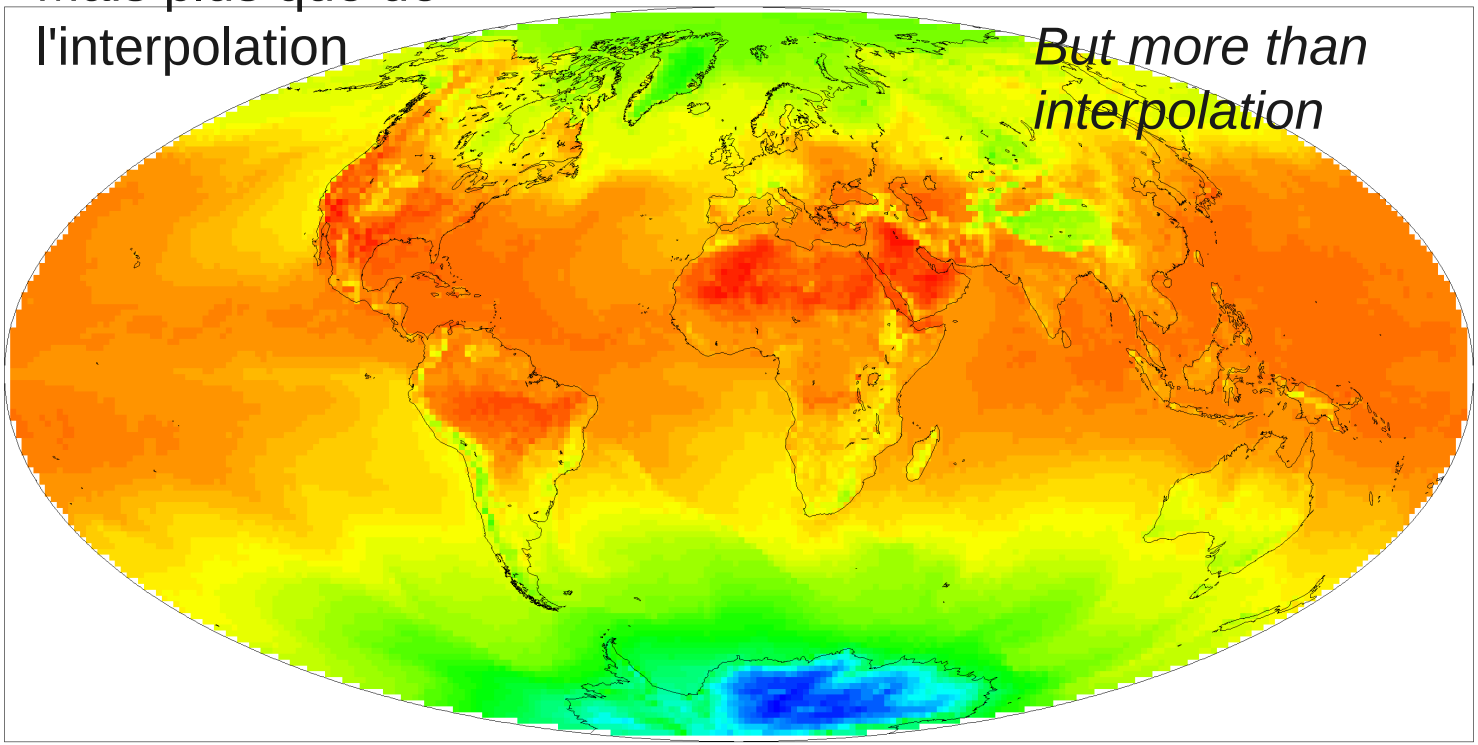
Le modèle numérique
The numerical model

- Discrétisation horizontale de l'atmosphère

  Mais plus que de l'interpolation

- *The horizontal discretization of the atmosphere*

  But more than interpolation



resolution 1° (≈ 100 km)

1. Principes généraux / *General principles*

Le modèle numérique
The numerical model

- Les grilles des modèles actuels :
  - Modèle global du CEPMMT : résolution 9 km, 137 niveaux verticaux
    → 200 000 000 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
- 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:*
    9 km resolution, 137 vertical levels
    → 200 000 000 points
  - *Limited-area AROME-Indian model in the South-West Indian Ocean :*
    2.5km resolution, 90 vertical levels
    → 130 000 000 points
- *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

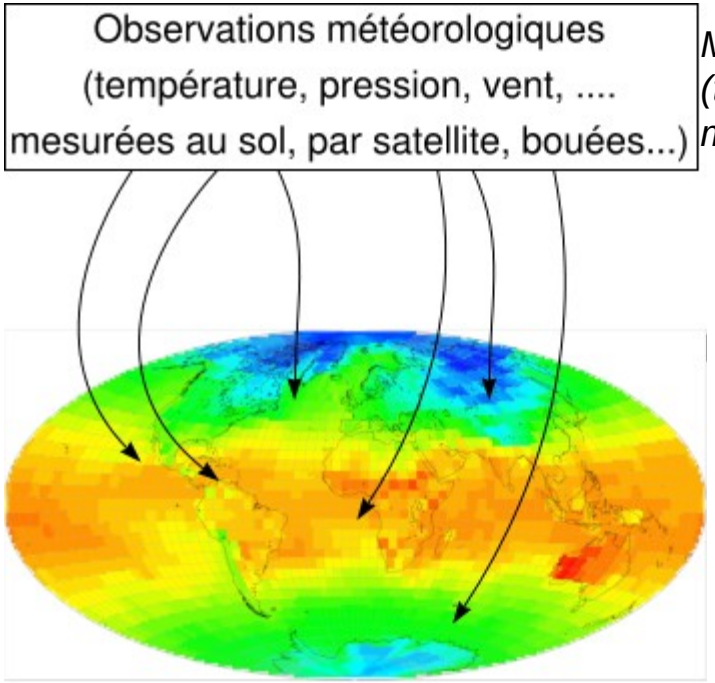
- *The forecast quality depends on the three above points.*

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*



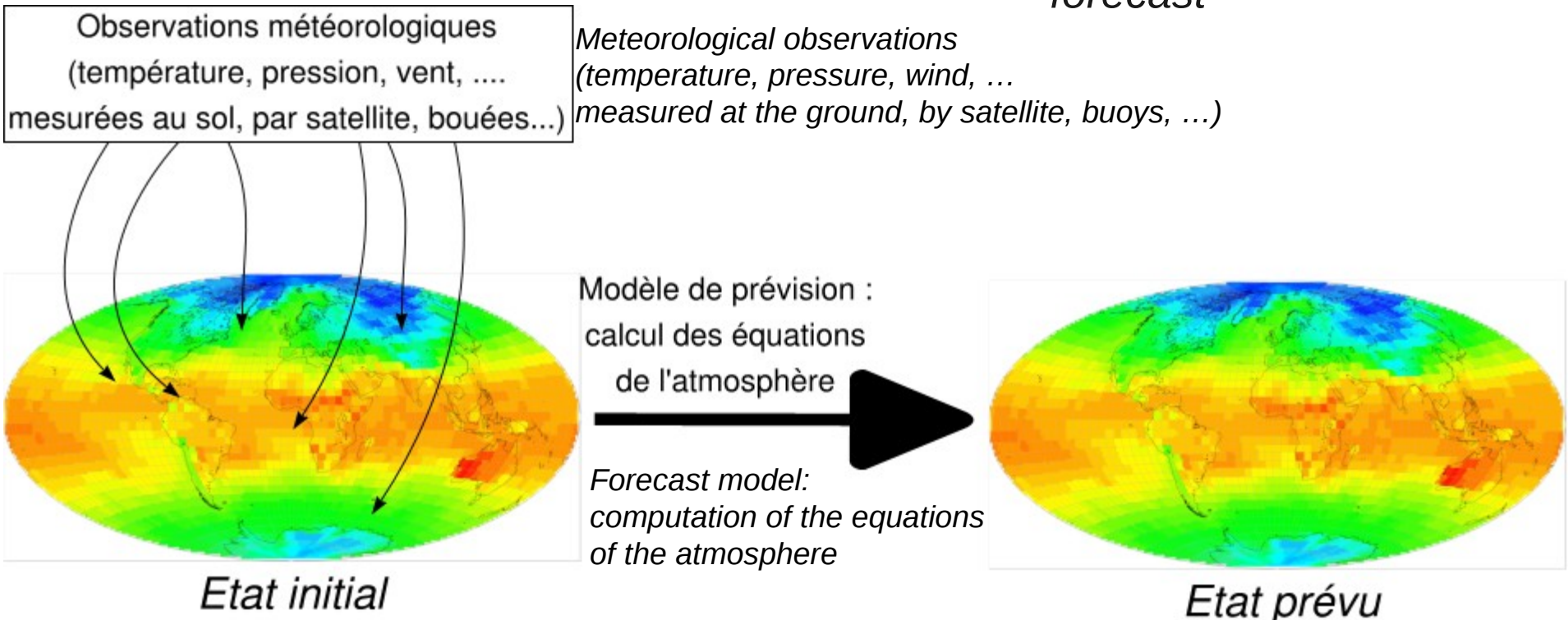
Meteorological observations
(temperature, pressure, wind, …
measured at the ground, by satellite, buoys, …)

Etat initial
Initial state

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. La prévision d'ensemble
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. Ensemble prediction

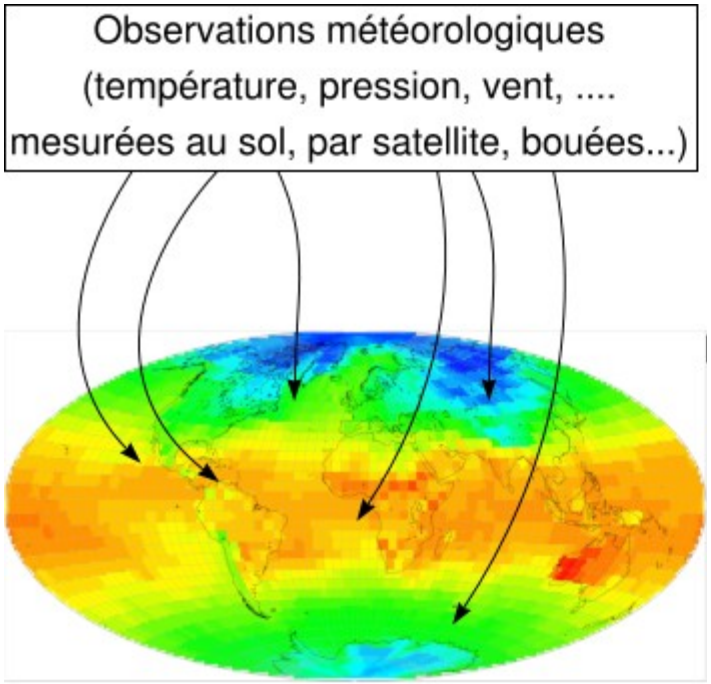
5. Conclusions and prospects

METEO FRANCE

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*



Etat initial
Initial state

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

2. L'analyse / *The analysis*

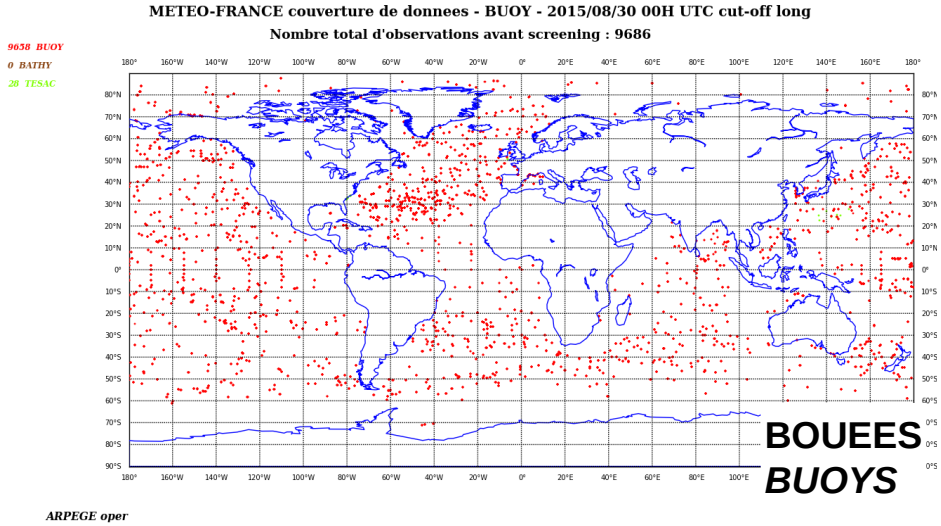
Les observations
The observations

- 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.

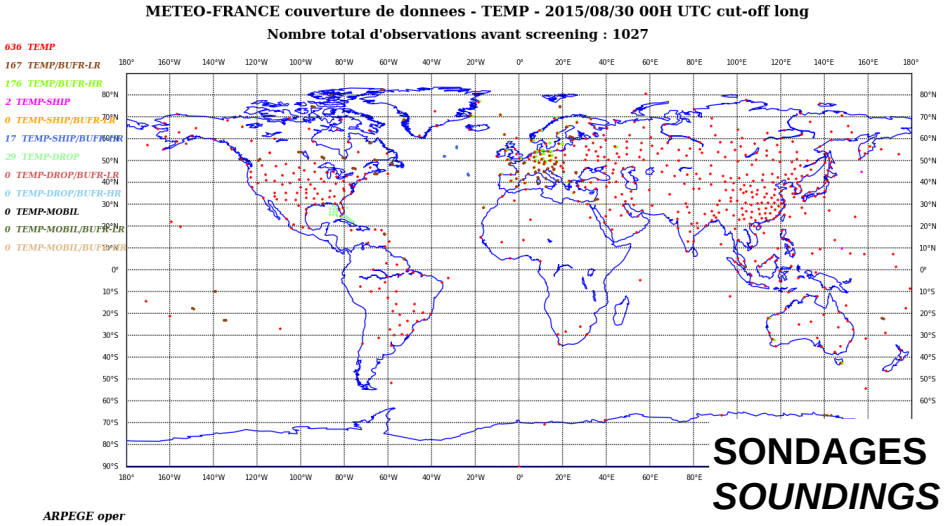
- *Types of observations:*
  - *Which measures are available ? The soundings and synoptic stations give direct measurements of these parameters at synoptic hours but not homogeneously in space.*
  - *Satellites make indirect measurements of these parameters (brightness temperatures, reflected waves)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

METEO FRANCE

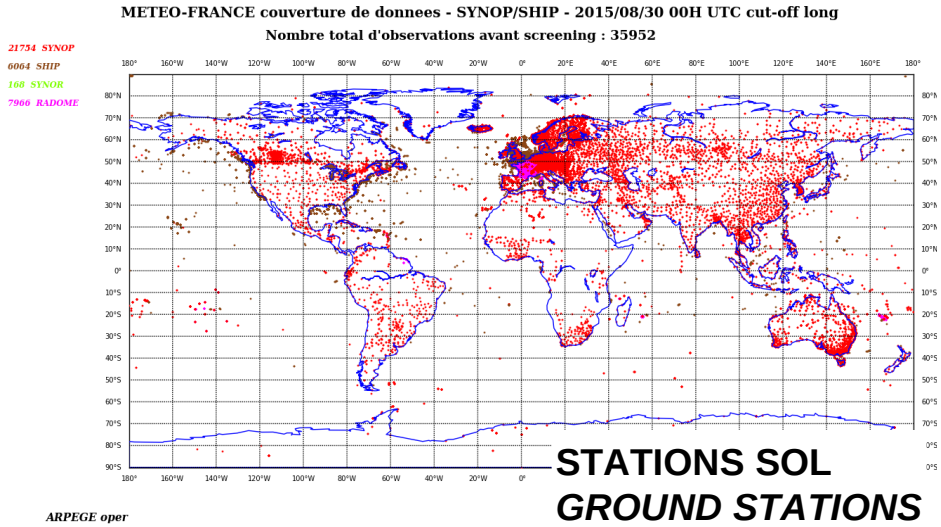
2. L'analyse / *The analysis*



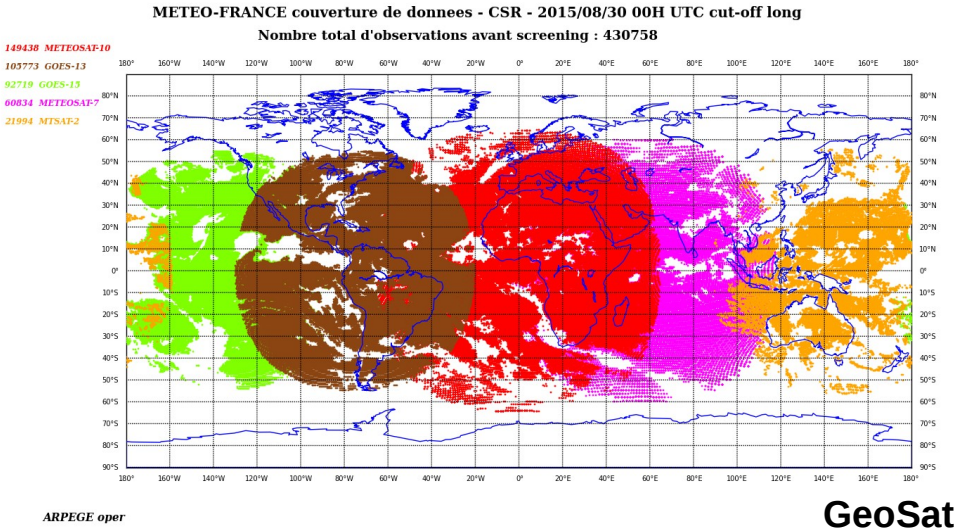
BOUEES
BUOYS



SONDAGES
SOUNDINGS



STATIONS SOL
GROUND STATIONS

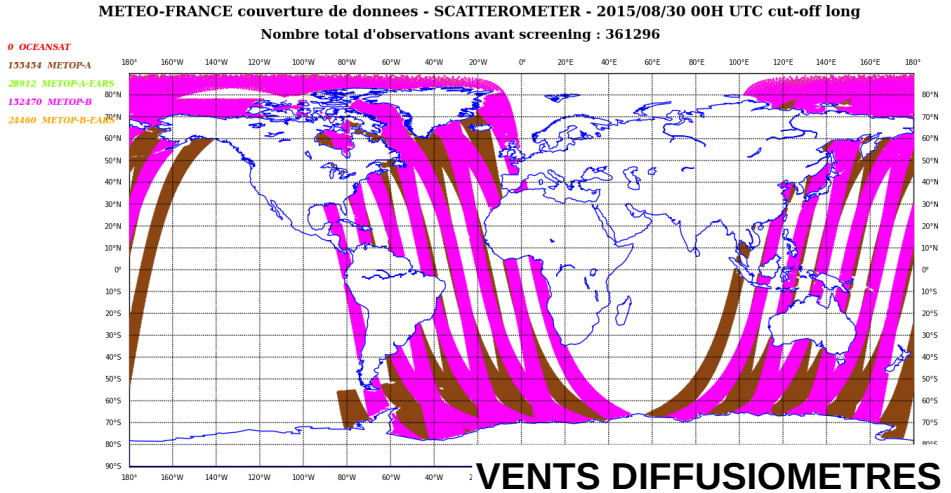


GeoSat

2. L'analyse / *The analysis*

Importance du réseau / *Impact of assimilation time*

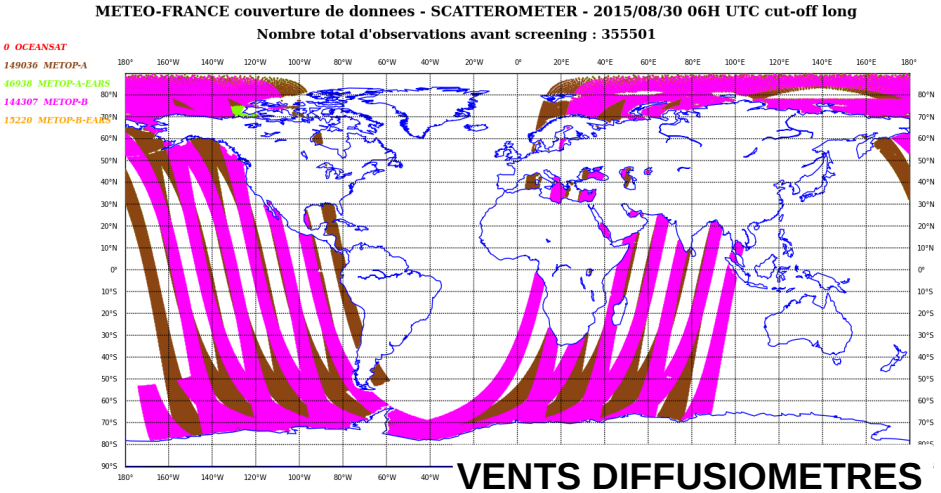
00UTC



VENTS DIFFUSIOMETRES
SCATTEROMETER WINDS

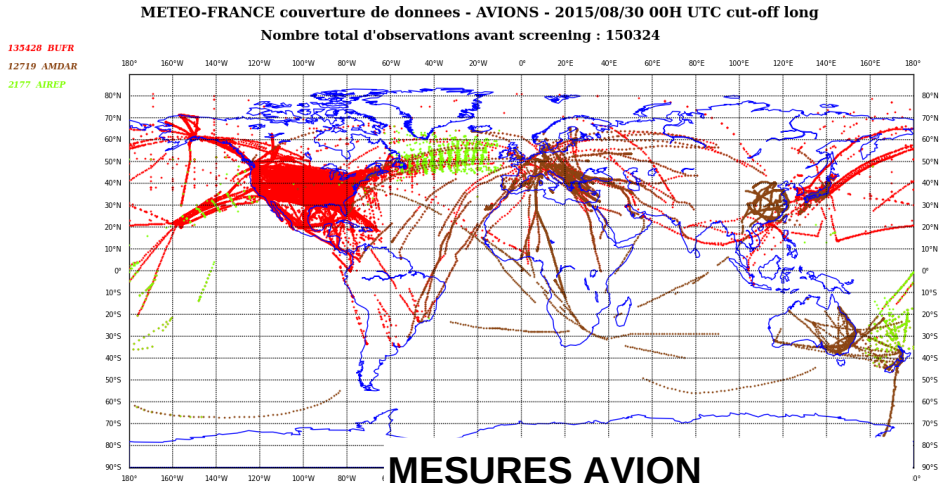
ARPEGE oper

06UTC



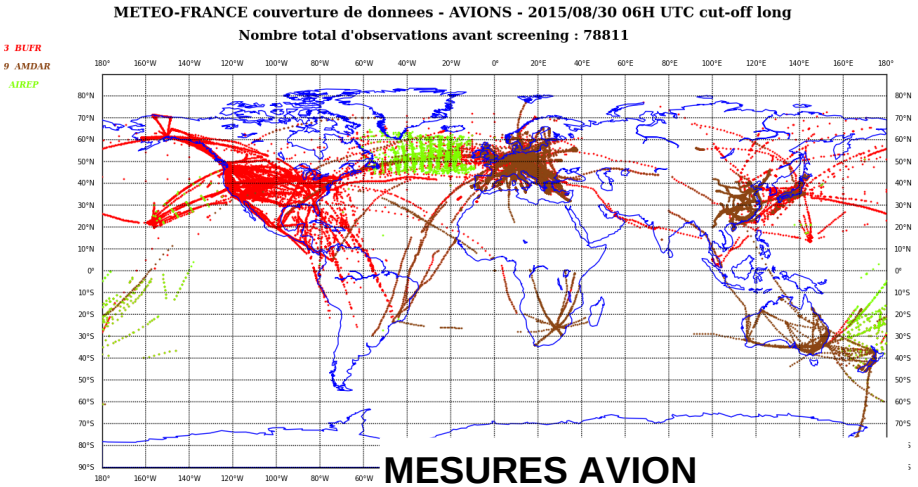
VENTS DIFFUSIOMETRES
SCATTEROMETER WINDS

ARPEGE oper



MESURES AVION
AIRCRAFT MEASUREMENTS

ARPEGE oper

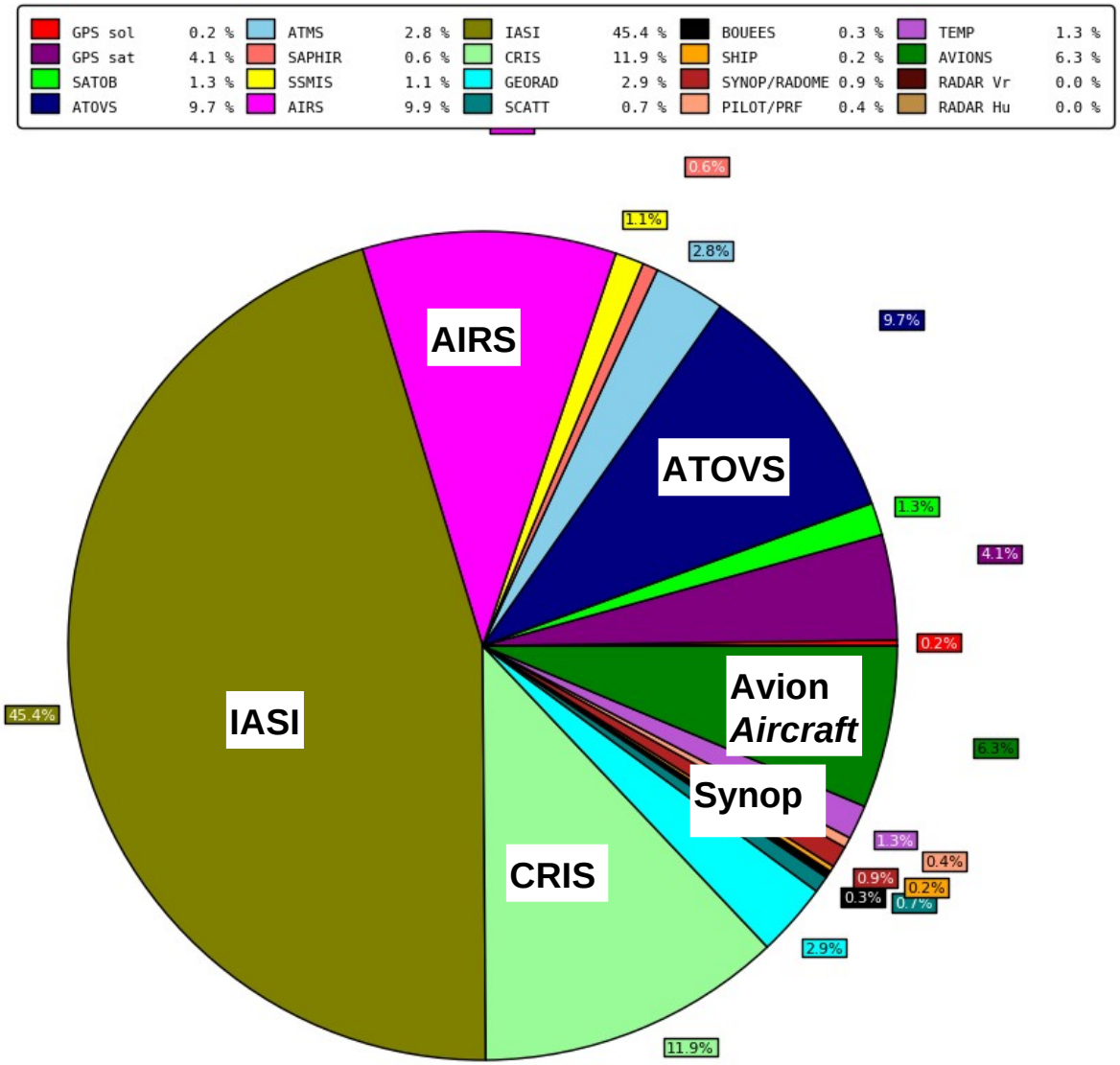


MESURES AVION
AIRCRAFT MEASUREMENTS

ARPEGE oper

2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations



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

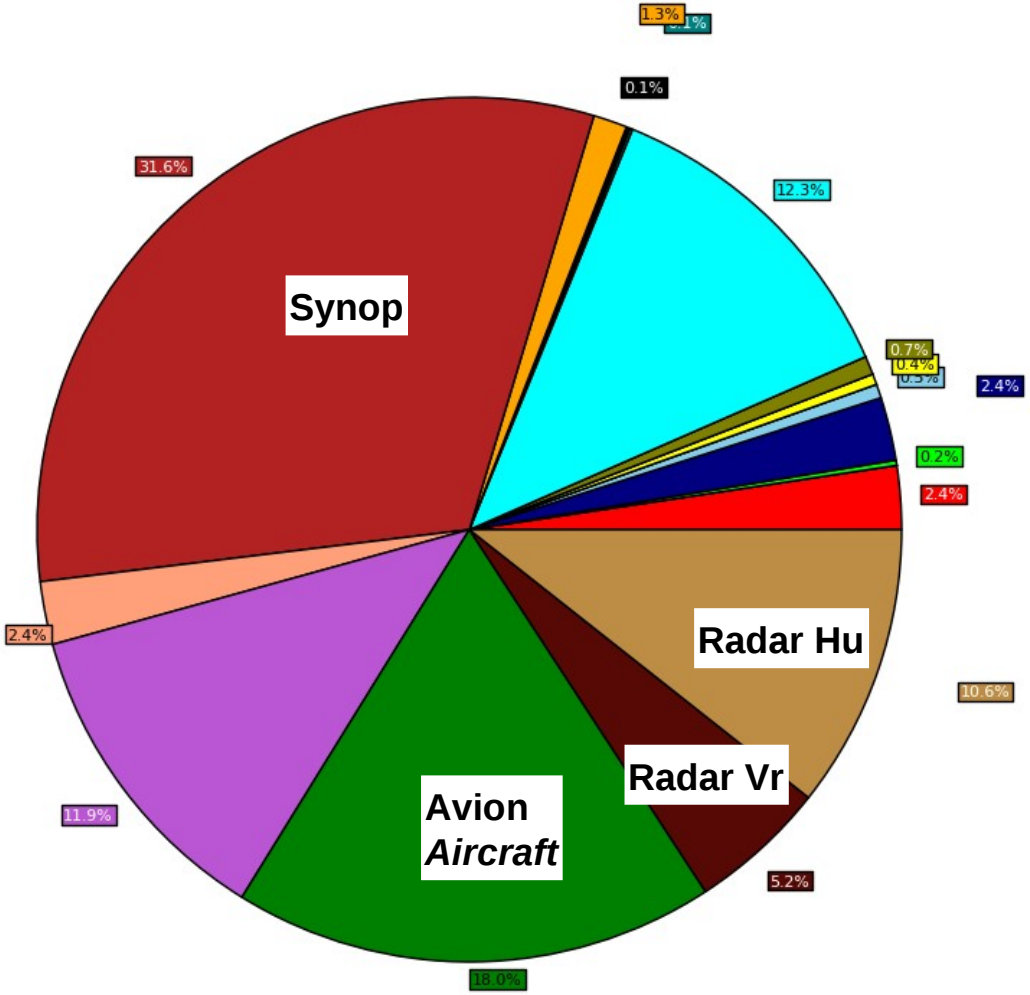
*Repartition of the observations assimilated in the **global model** Arpege*

DirOP/COMPAS 01-a

2. L'analyse / *The analysis*

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

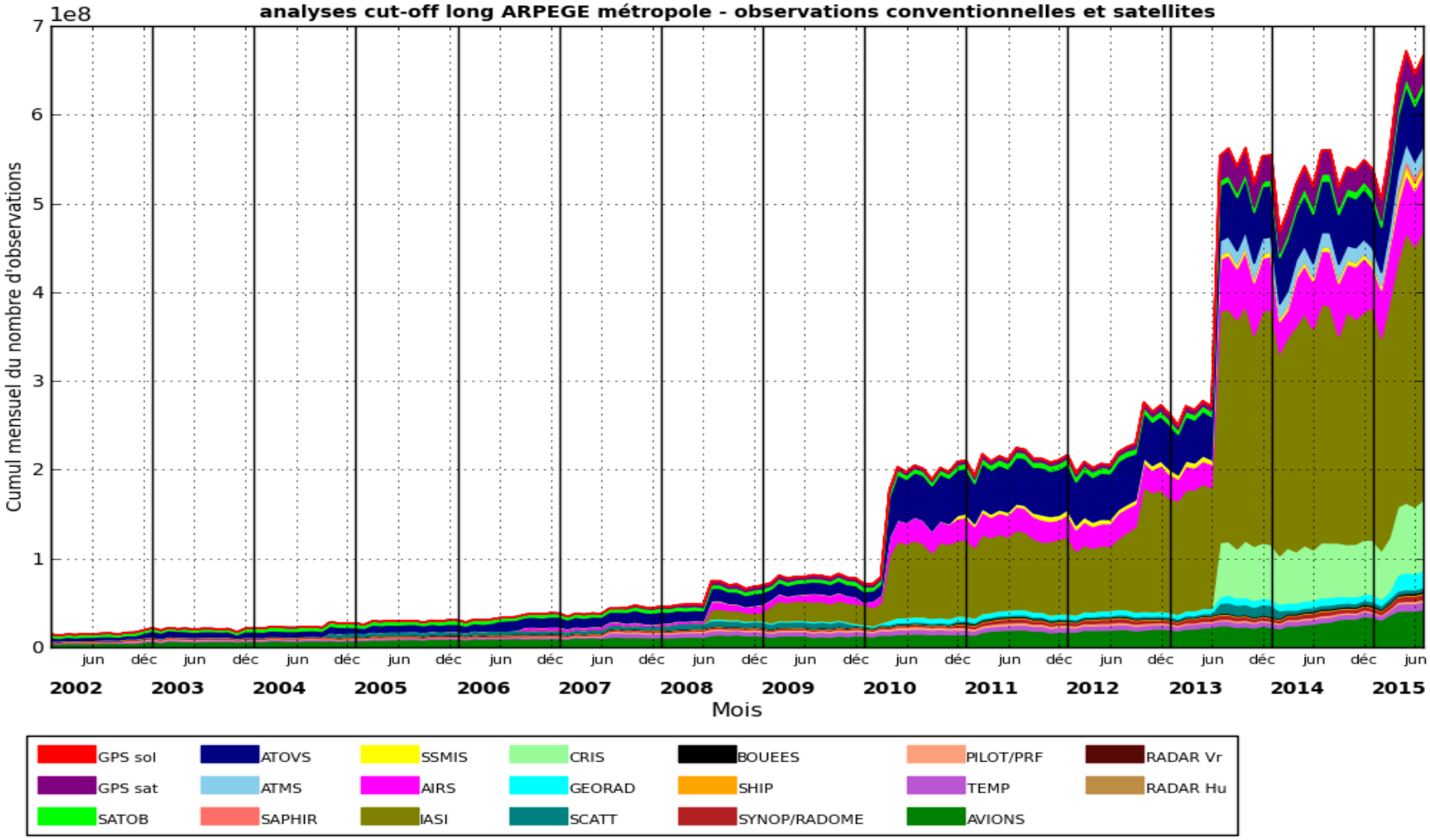
DirOP/COMPAS 01-a

METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Les observations
The observations

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



DirOP/COMPAS 01-août-2015

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. La prévision d'ensemble
5. 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. Ensemble prediction

5. Conclusions and prospects

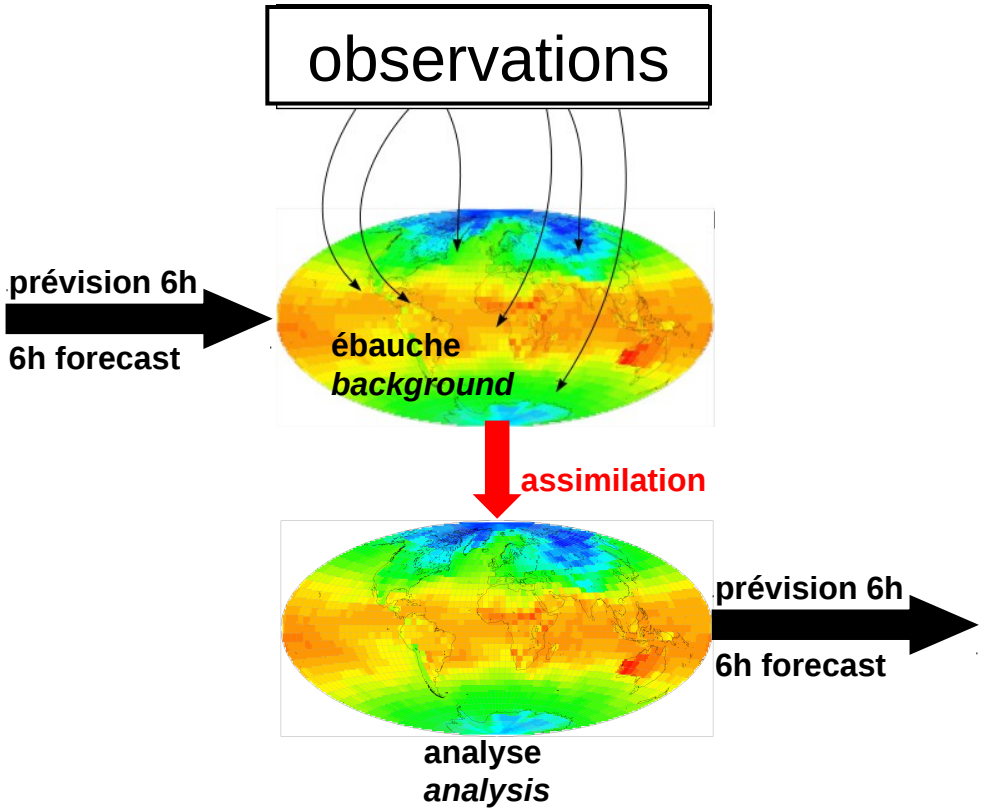
METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Les observations sont **assimilées** dans une prévision provenant du passé récent : l'**ébauche**

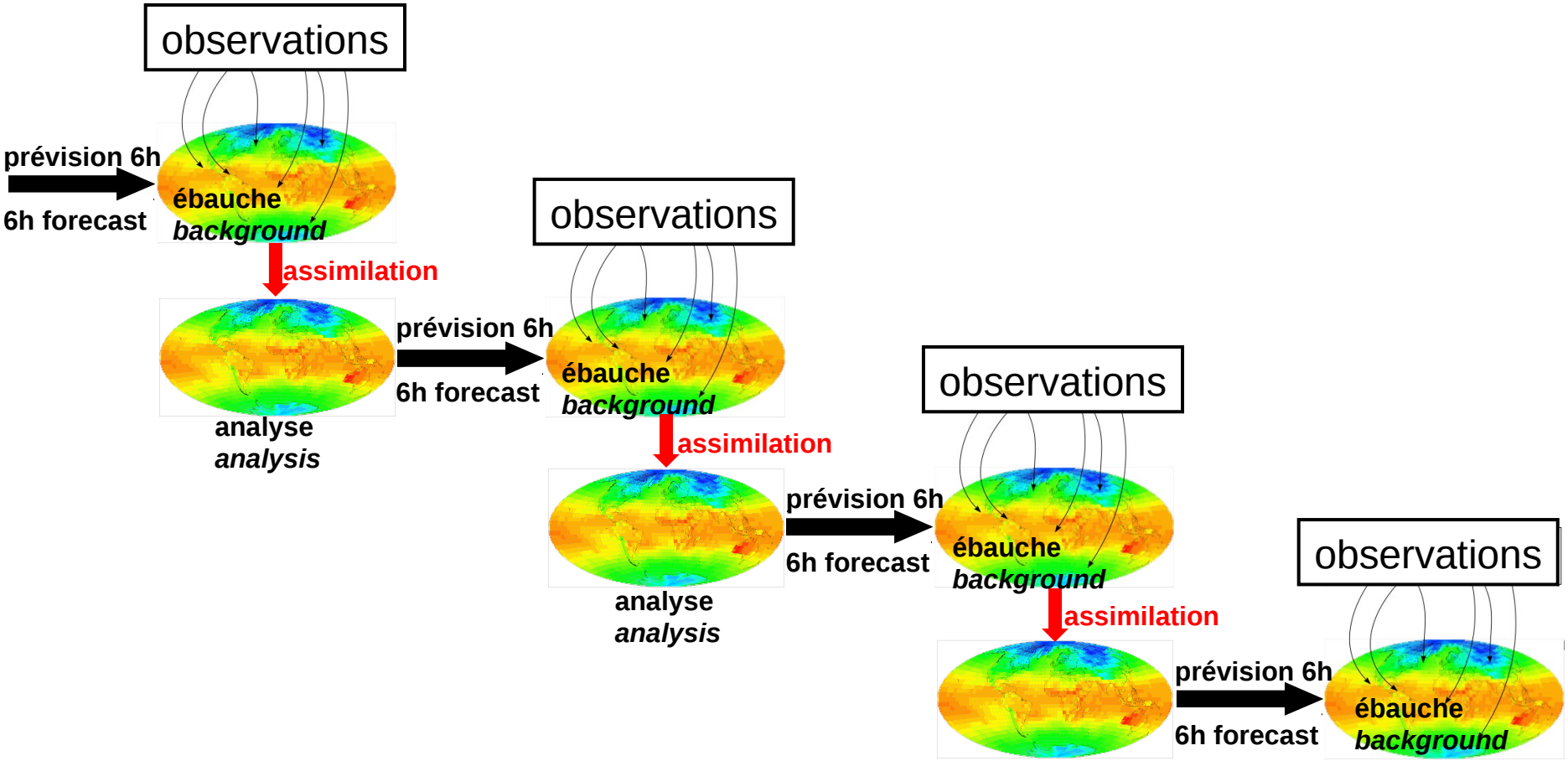
- *The observations are **assimilated** in a forecast coming from the recent past: the **background***



2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
The assimilation

- Le cycle d'assimilation :
- *The assimilation cycle :*



2. L'analyse / *The analysis*

Méthodes de calcul
Methods of computation

- Assimilation des observations par estimation par les moindres carrés
- Méthodes de calcul de cette estimation :
  - Interpolation optimale
  - Filtre de Kalman
  - L'assimilation variationnelle
    - 3D-Var (ex Arome)
    - 4D-Var (ex IFS)
    - Données dérivées

- *Assimilation of observations by least-square estimation*
- *Methods of computation of this estimation:*
  - *Optimal interpolation*
  - *Kalman Filter*
  - *Variational assimilation*
    - *3D-Var (ex Arome)*
    - *4D-Var (ex IFS)*
    - *Variables deduced from model*

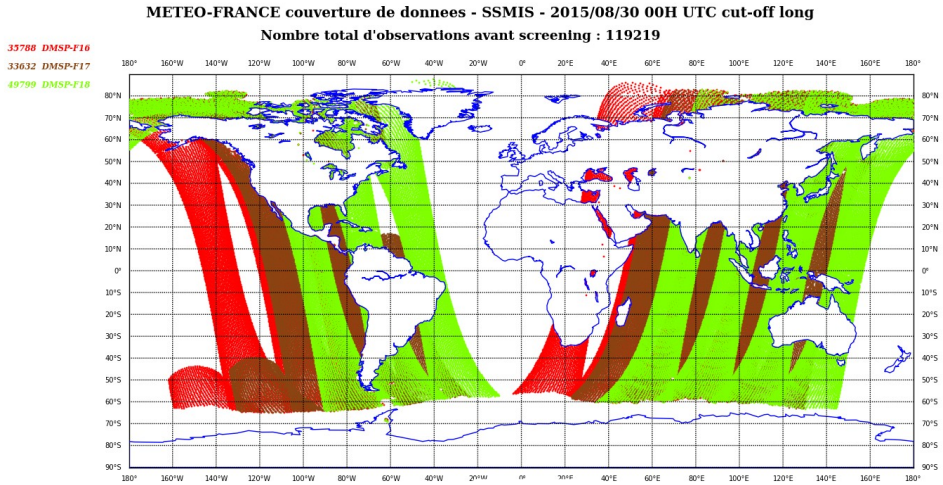
METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

L'assimilation
L'assimilation

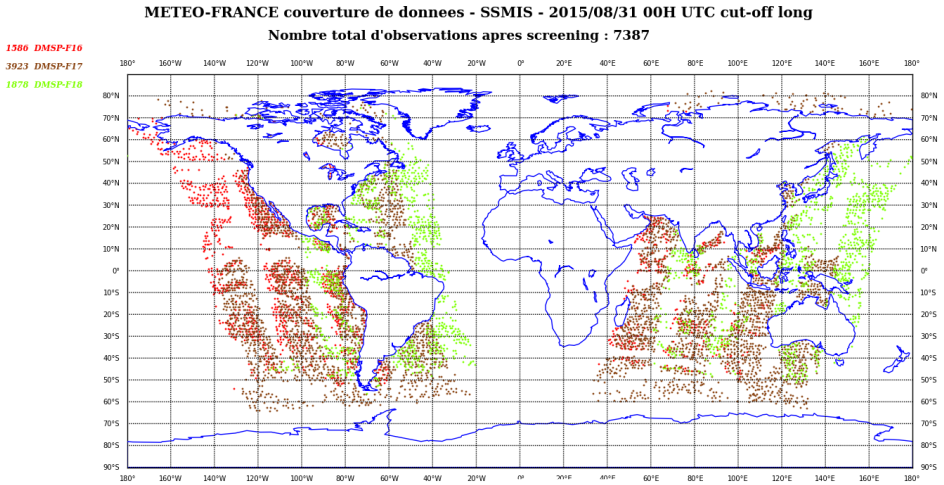
- Exemple de sélections des observations (radiances SSMI/S)
  - seulement mesures décorrélées (suffisamment éloignées)
  - seulement ciel clair

- Example of selected observations (radiances SSMI/S)
  - *only measures that are decorrelated (sufficiently away one to the others)*
  - *clear-sky only*



ARPEGE oper

Before



ARPEGE oper

After

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. La prévision d'ensemble
5. 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

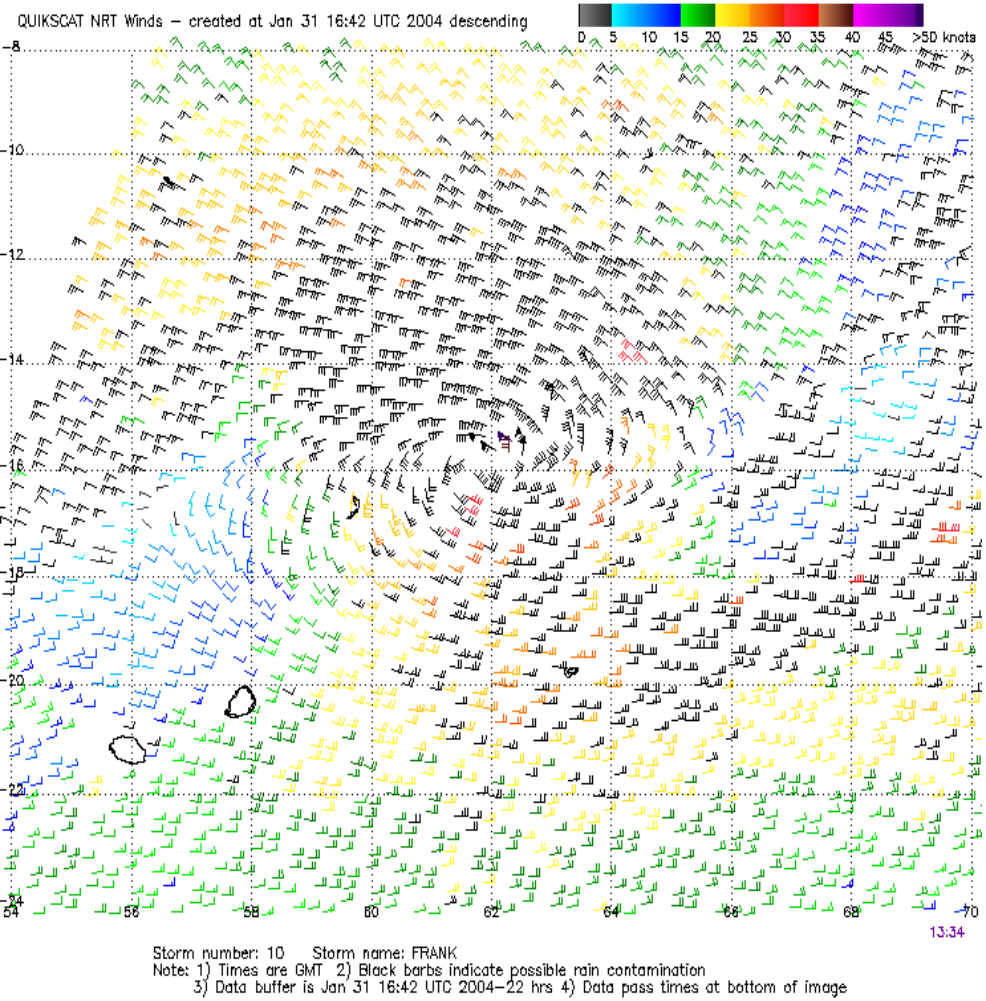
4. Ensemble prediction

5. Conclusions and prospects

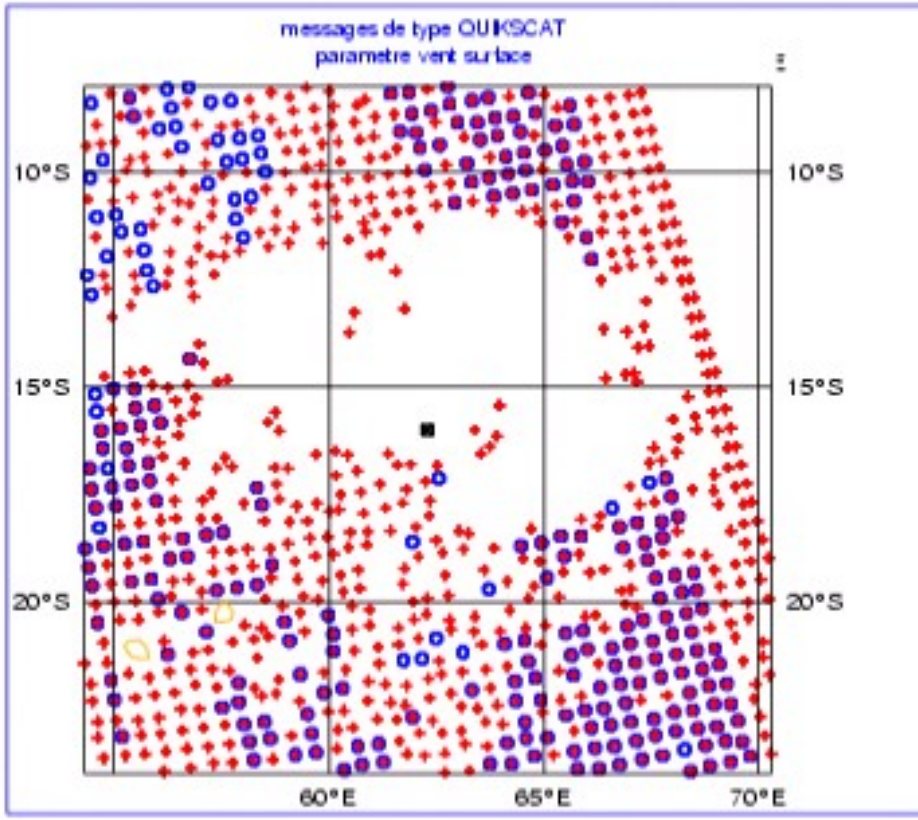
METEO FRANCE

2. L'analyse / *The analysis*

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones



Observed QuikScat winds



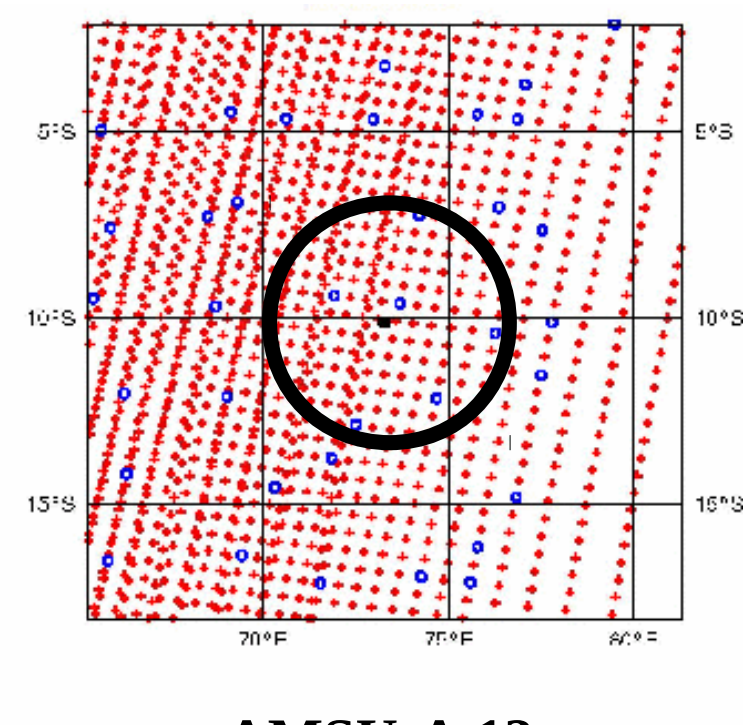
Available QuikScat winds for the analysis :

+ not assimilated

o assimilated

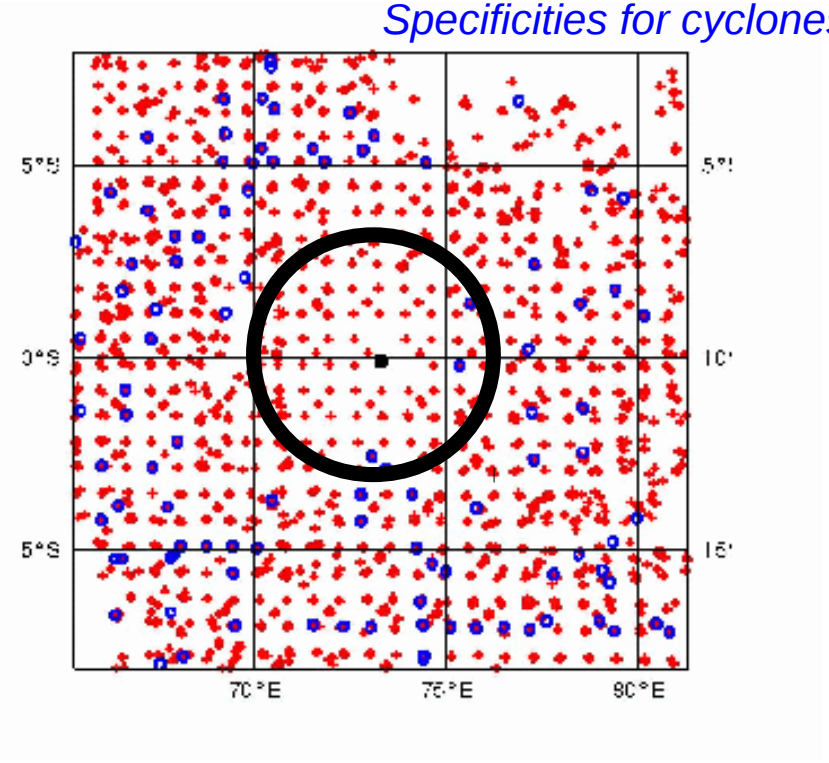
2. L'analyse / *The analysis*

Spécificités pour les cyclones
Specificities for cyclones



AMSU-A 12

(peak at 10 hPa)



SATOB winds

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

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 et peuvent être prise en compte par certains modèles (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 and available only for some models using bogus*

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. La prévision d'ensemble
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. Ensemble prediciton

5. Conclusions and prospects

METEO FRANCE

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

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

3. La prévision / *The forecast*

Les équations d'évolution
The equations of evolution

- $\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho}\overrightarrow{\text{grad}}\, p - 2\,\vec{\Omega} \wedge \vec{V} + \underline{Ff}$ 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 << 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 << 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) et vertical si non-hydrostatique,

  - la température de l'air T,

  - la pression de surface P_s,

  - l'humidité spécifique $q = M_{eau} / M_{totale}$

  - certains hydrométéores en fct des modèles

- On peut en déduire toutes les autres quantités = variables diagnostiques :

  Géopotentiel, la vitesse verticale (si hydrostatique), le tourbillon, la divergence ...

- *They are evolution equations for prognostic variables :*

  - *horizontal wind (zonal and meridian components) and vertical if hydrostatism,*

  - *air temperature T,*

  - *Surface pressure P_s,*

  - *specific humidity $q = M_{water} / M_{total}$*

  - *some hydrometeors according models*

- *All other quantities (= diagnostic variables) can be deduced from these variables :*

  Geopotentiel height, vertical velocity (if hydrostatism), vorticity, divergence …

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. La prévision d'ensemble
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. Ensemble prediction

5. Conclusions and prospects

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 (= résolues),
  - 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 (= resolved),*
  - *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*

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.*

- $dU(T) = \delta U + \underline{\delta Q}$ (Travail + Chaleur)

Energy

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.*

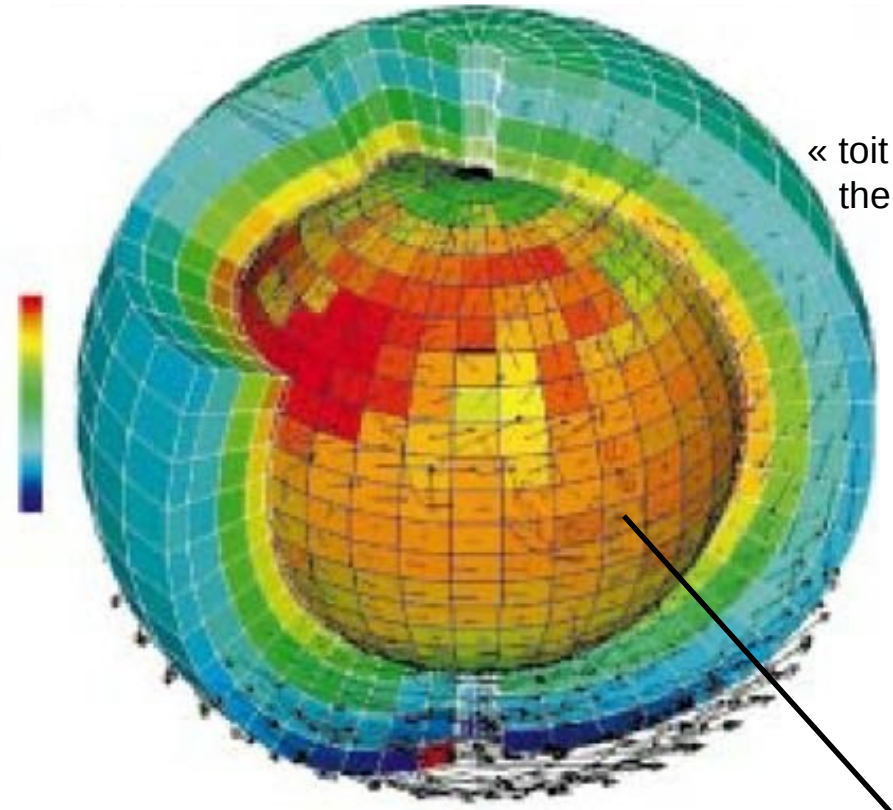
- $$\frac{dq}{dt} = \underline{\text{Evaporation - Précipitation}}$$

Water

METEO FRANCE

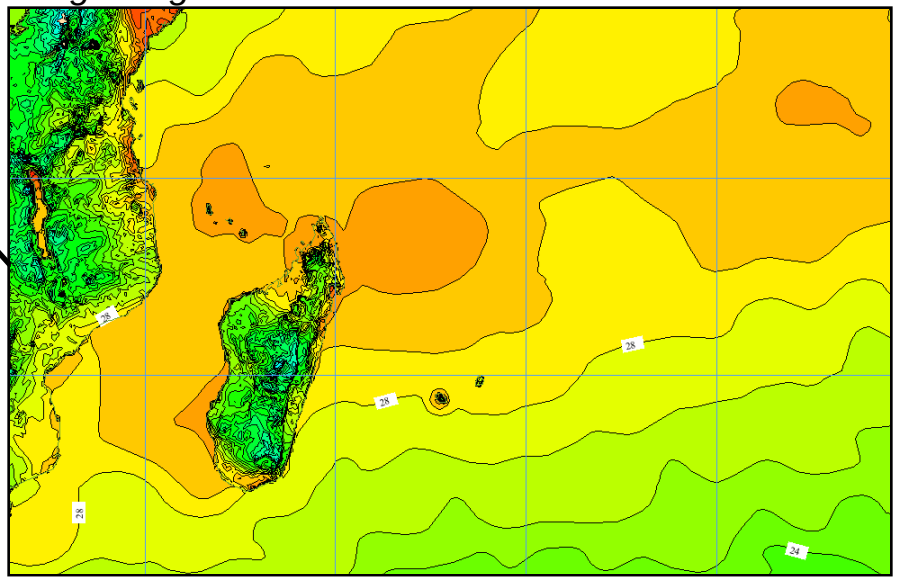
3. La prévision / *The forecast*

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

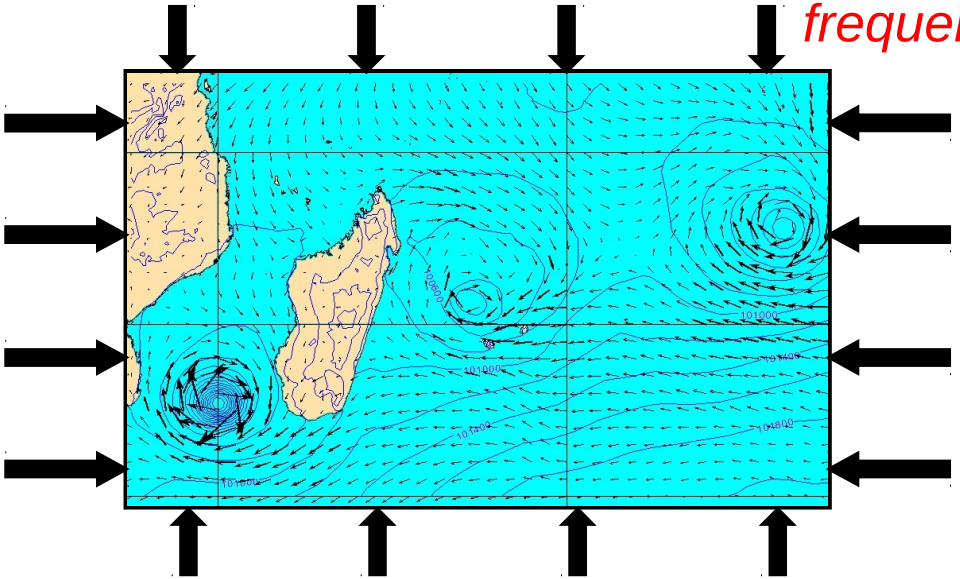


3. La prévision / *The forecast*

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)*



Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. La prévision d'ensemble
   - Principes généraux
   - Les ingrédients
   - Les produits de la prévision d'ensemble
   - Evaluation des prévisions
5. Conclusions et perspectives

1. General principles

2. The analysis (data assimilation)

3. The forecast

4. Ensemble prediction
   - *General principles*
   - *Ingredients of an ensemble prediction*
   - *Outputs of an ensemble prediction*
   - *Evaluation of the forecasts*

5. Conclusions and prospects

METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Principes généraux …
General principles …

- Laplace (~1800) : si on connaît l'état initial d'un système physique et les équations qui le régissent, on peut prévoir son évolution en tout instant futur

  → **Déterministe = Prévisible**.

- Poincaré (~1900) : certains systèmes déterministes ont des solutions extrêmement **sensibles aux conditions initiales**.
- Lorenz (~1960) : découverte du chaos déterministe

  → **Déterministe ≠ Prévisible.**

- *Laplace (~1800) : if the initial state of a physical system and its equations of evolution are known, then it should be possible to predict its evolution in the future*

→ ***Déterministic = Predictable***.

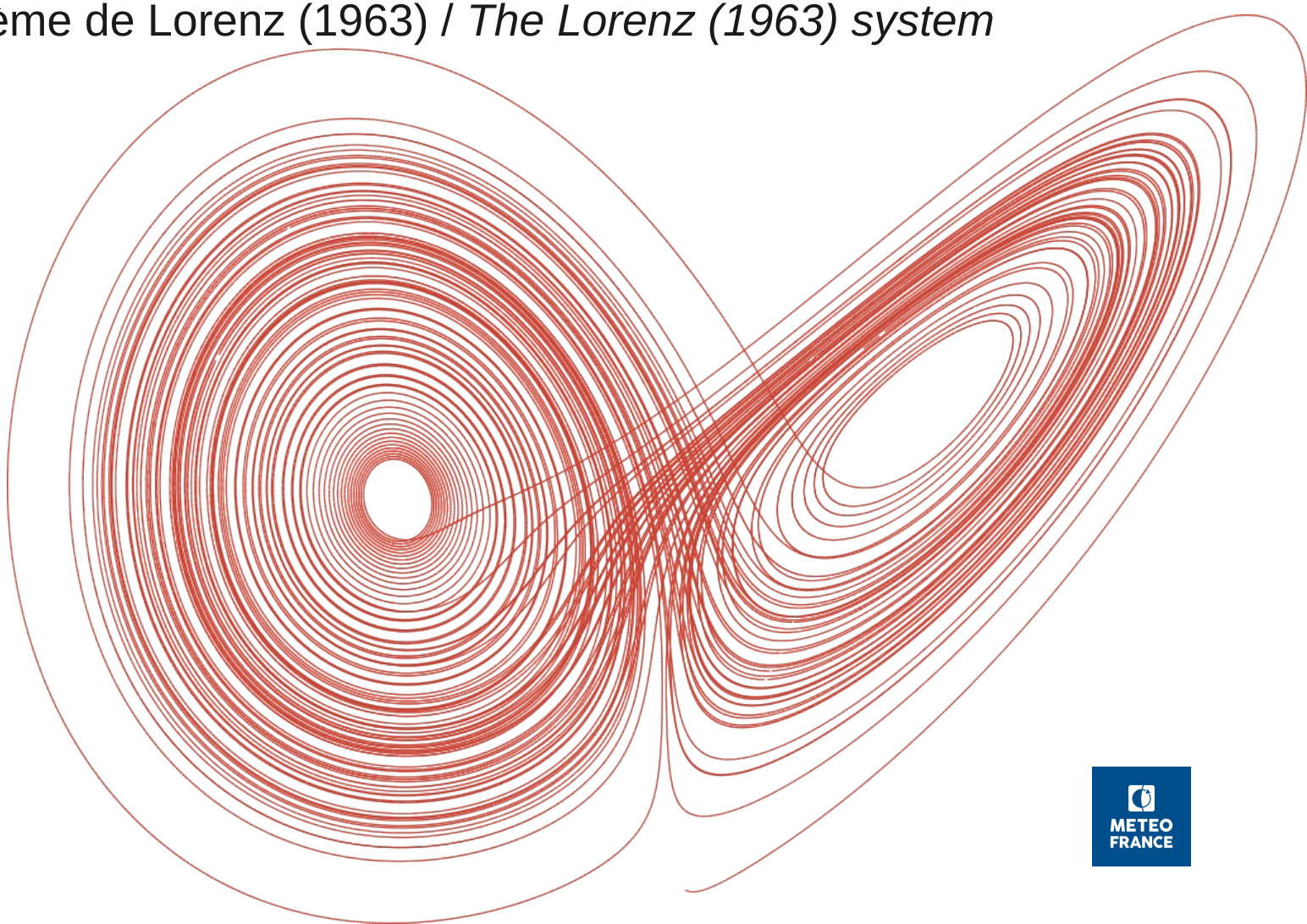
- *Poincaré (~1900) : some deterministic systems have solutions that are extremely* ***sensitive to the initial conditions***.
- *Lorenz (~1960) : discovery of the determinisitic chaos*

  → ***Déterministic ≠ Predictable.***

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Principes généraux …
General principles …

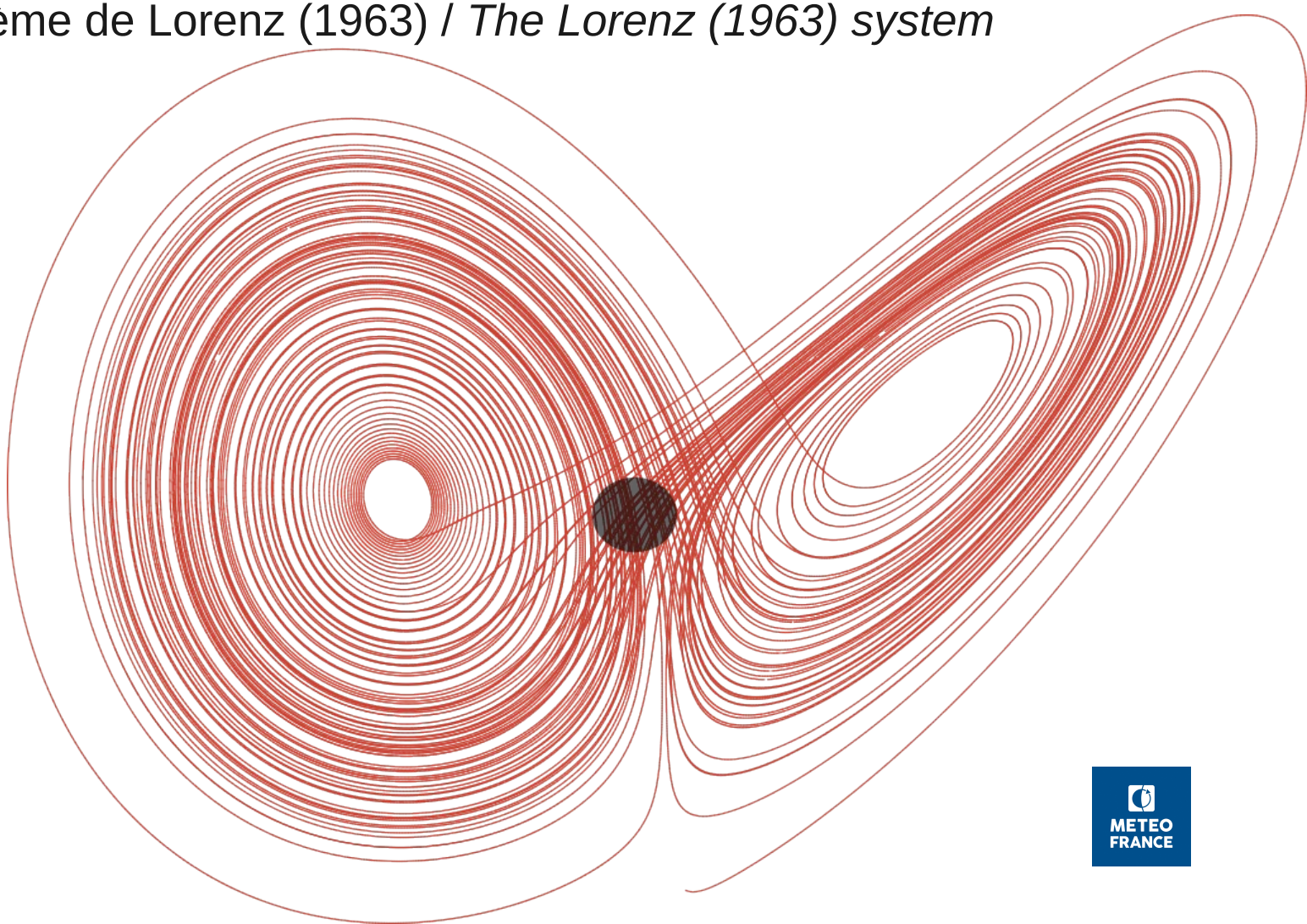
- Le système de Lorenz (1963) / *The Lorenz (1963) system*



4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Principes généraux …
General principles …

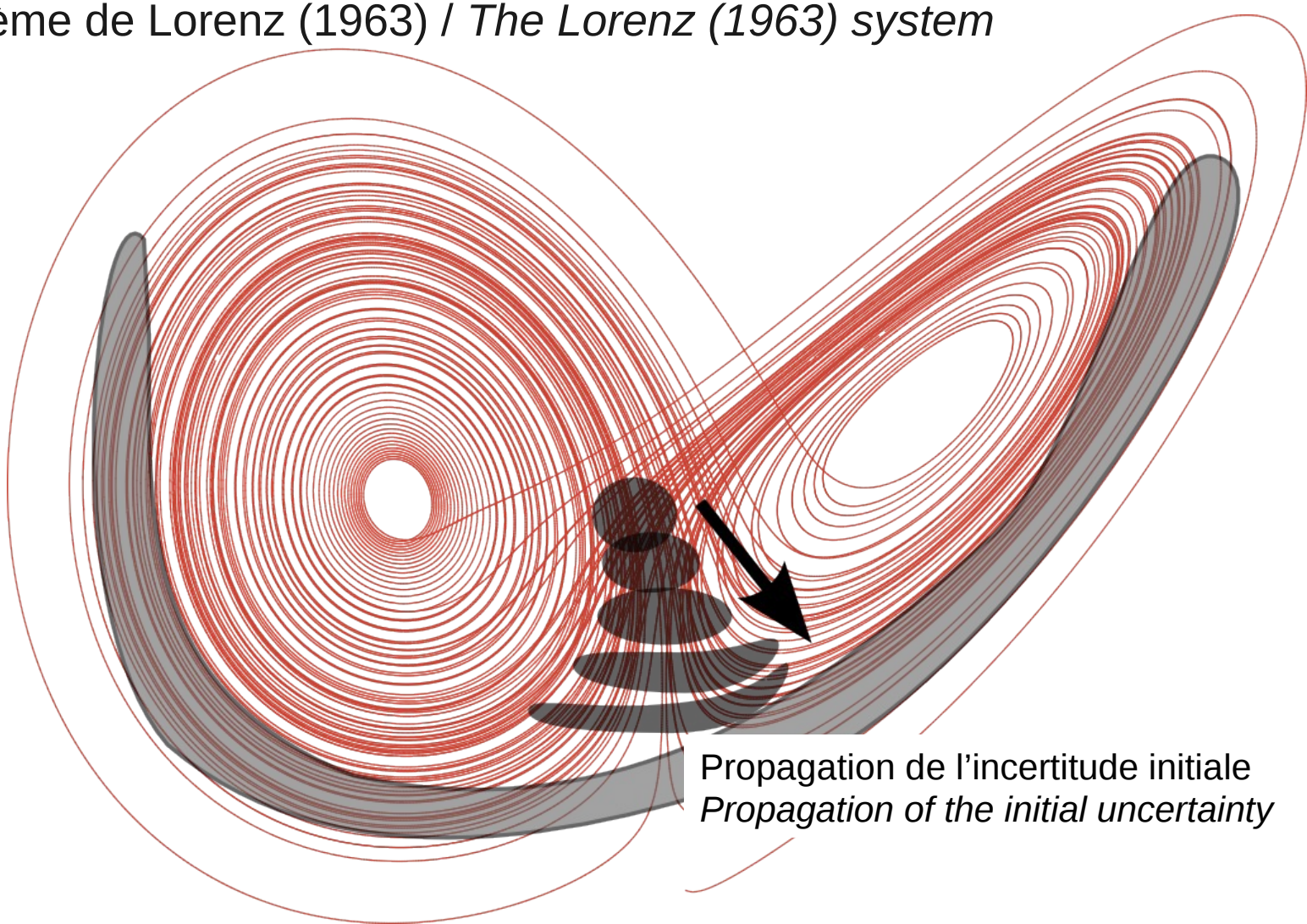
- Le système de Lorenz (1963) / *The Lorenz (1963) system*



4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Principes généraux …
General principles …

- Le système de Lorenz (1963) / *The Lorenz (1963) system*



Propagation de l'incertitude initiale
Propagation of the initial uncertainty

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- L'évolution de l'atmosphère présente une forte sensibilité aux conditions initiales
  - → Les prévisions sont incertaines intrinsèquement

- Premier objectif de la prévision d'ensemble = estimer l'incertitude d'une prévision
  - → Plusieurs prévisions sont lancées, partant de conditions initiales légèrement perturbées par rapport à l'analyse

- *The evolution of the atmosphere is highly sensitive to the initial conditions*
  - → *The forecasts are intrinsiquely uncertain*

- *Ensemble prediction aims firstly at estimating the uncertainty of a forecast*
  - → *Several forecasts are run, starting from initial states slightly perturbed around the analysis*

METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- La modélisation de l'atmosphère introduit aussi des erreurs car elle repose sur des simplifications :
  - Equations incomplètes
  - Discrétisations et schéma temporel
  - Paramétrisations physiques (phénomènes sous-maille)

→Certaines prévisions d'ensemble ont pour objectif d'introduire ces sources d'erreur

- *The modelization of the atmosphere also introduces some errors because it relies on some simplifications :*
  - *Imperfect equations*
  - *The discretization and temporal scheme*
  - *the physical parametrizations (under-mesh phenomenas)*

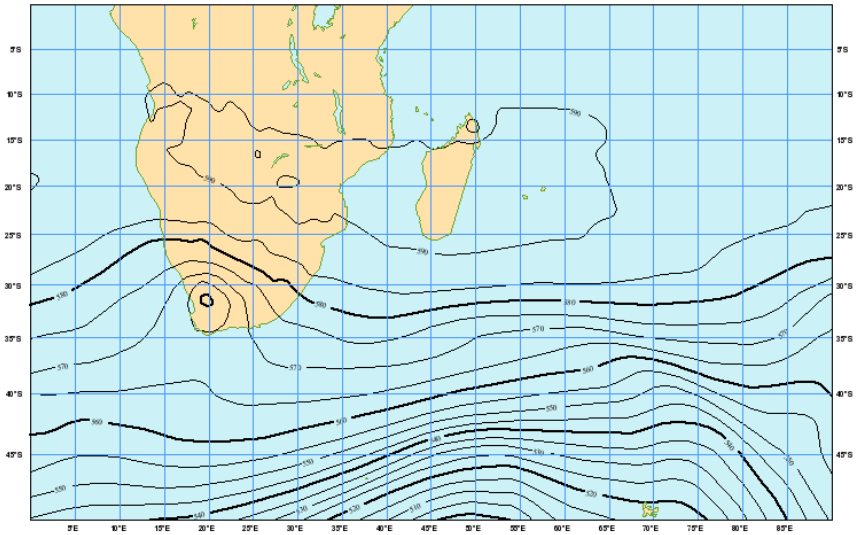
→*Some ensemble prediction systems aim to introduce these error sources.*

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

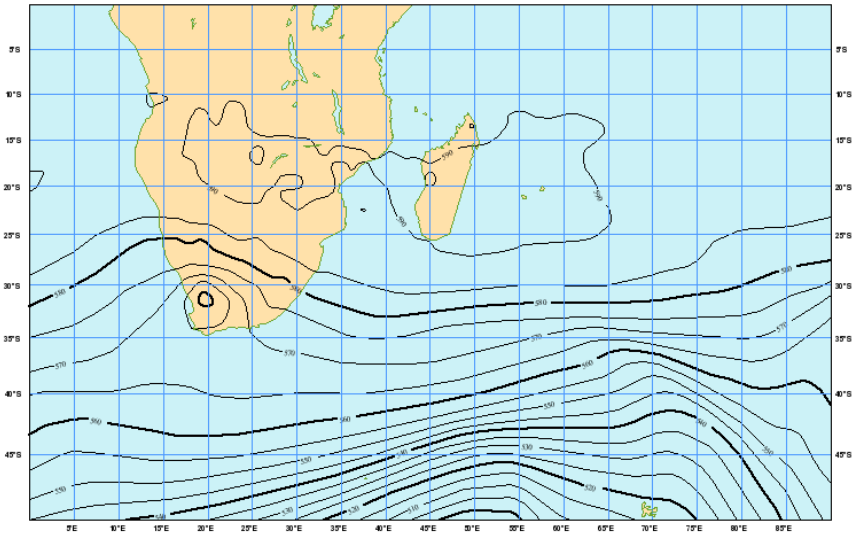
La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- Illustration de la divergence entre deux prévisions :
  - États initiaux très proches (différence inférieure à l'erreur d'analyse moyenne)
  - Même modèle, sauf paramétrisations physiques

- *Illustration of the divergence between two forecasts:*
  - *The initial states are very close (difference lower than the mean analysis error)*
  - *The same model, except for the physical parametrizations*



0 H



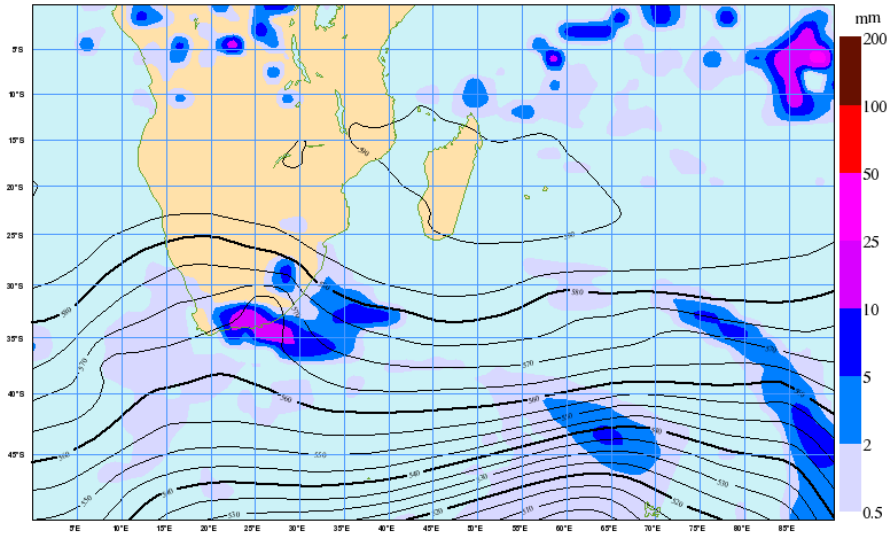
FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

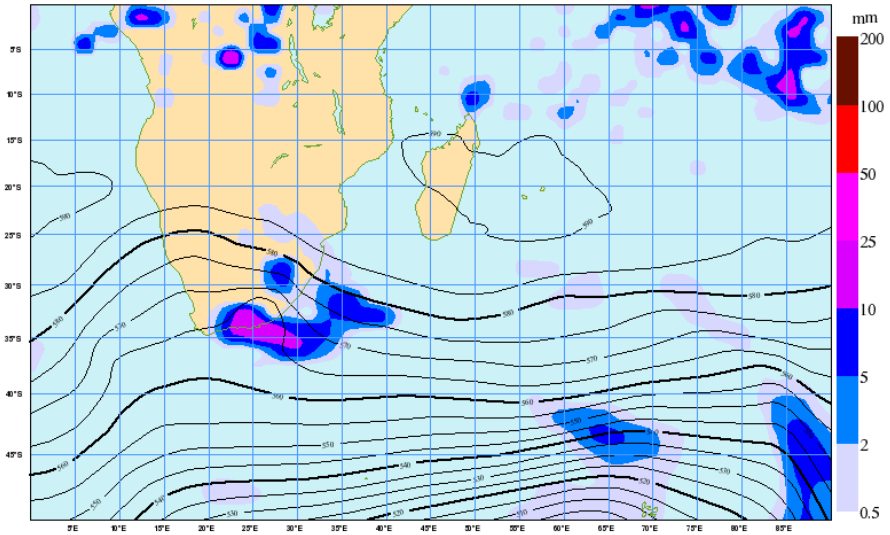
La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- Illustration de la divergence entre deux prévisions :
  - États initiaux très proches (différence inférieure à l'erreur d'analyse moyenne)
  - Même modèle, sauf paramétrisations physiques

- *Illustration of the divergence between two forecasts:*
  - *The initial states are very close (difference lower than the mean analysis error)*
  - *The same model, except for the physical parametrizations*



12 H



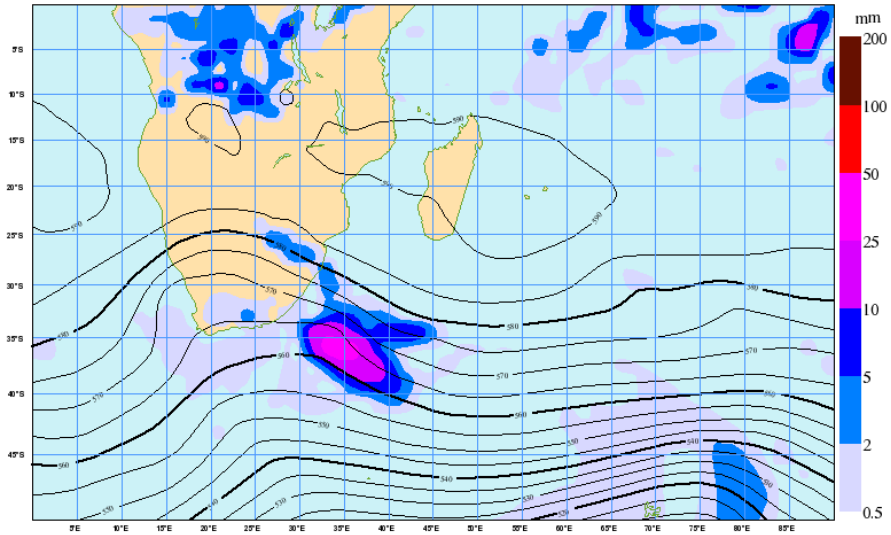
FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

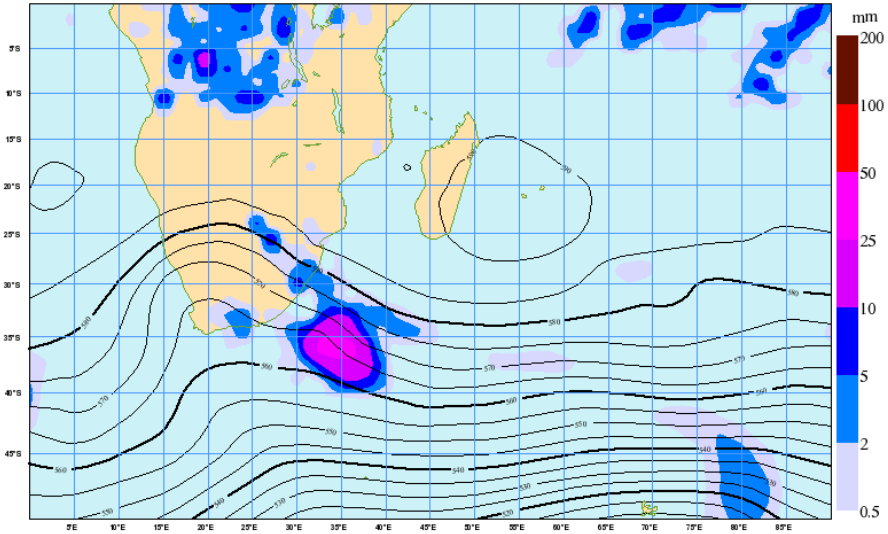
La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- Illustration de la divergence entre deux prévisions :
  - États initiaux très proches (différence inférieure à l'erreur d'analyse moyenne)
  - Même modèle, sauf paramétrisations physiques

- *Illustration of the divergence between two forecasts:*
  - *The initial states are very close (difference lower than the mean analysis error)*
  - *The same model, except for the physical parametrizations*



24 H



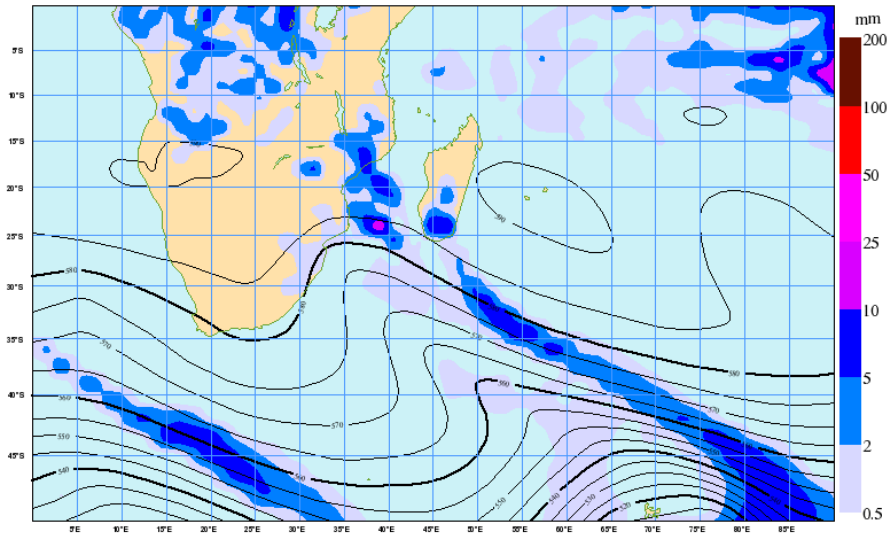
FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

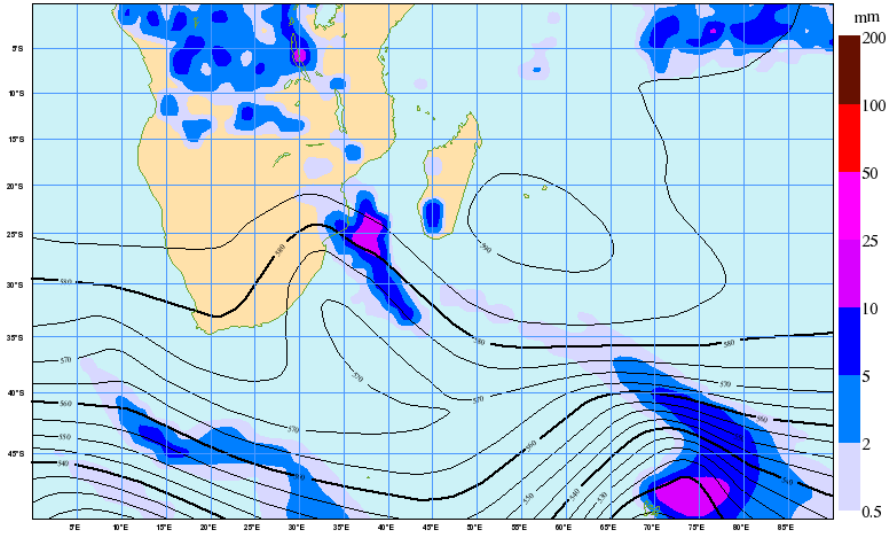
La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- Illustration de la divergence entre deux prévisions :
  - États initiaux très proches (différence inférieure à l'erreur d'analyse moyenne)
  - Même modèle, sauf paramétrisations physiques

- *Illustration of the divergence between two forecasts:*
  - *The initial states are very close (difference lower than the mean analysis error)*
  - *The same model, except for the physical parametrizations*



48 H

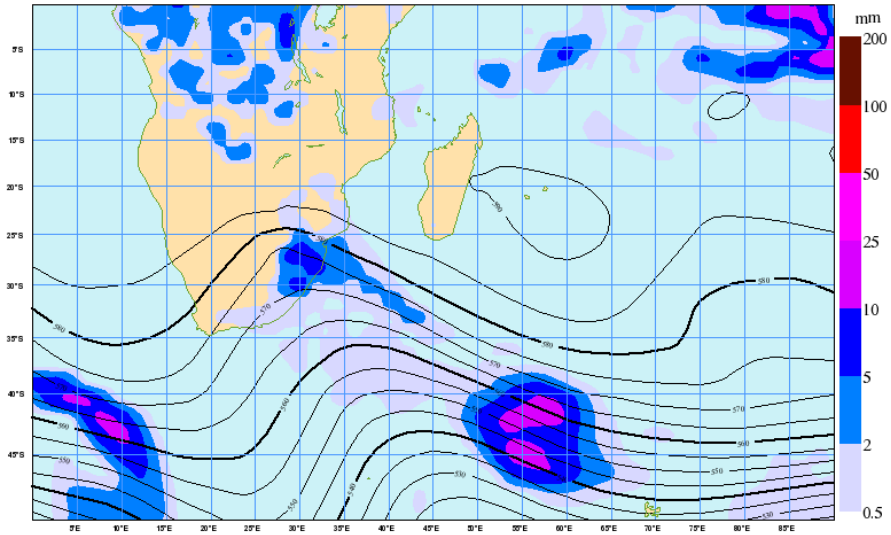


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

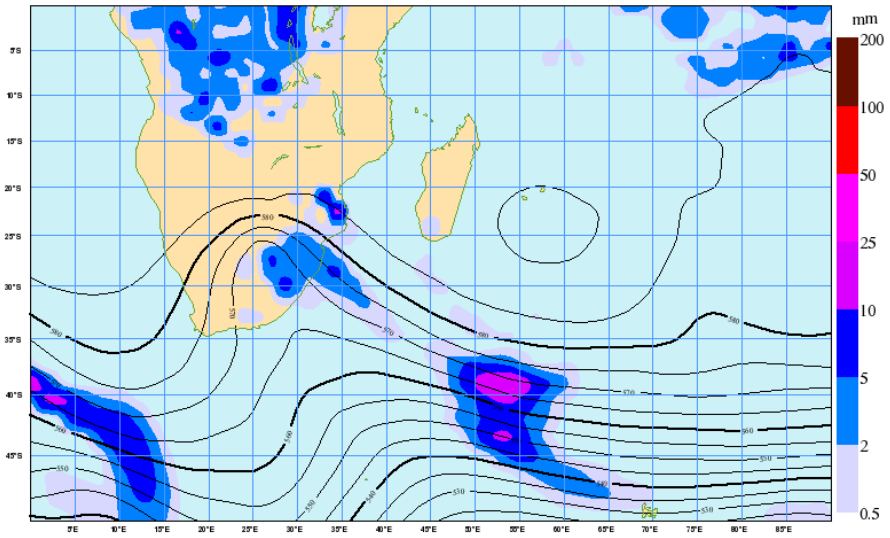
La prévisibilité de l'atmosphère
The atmospheric predictability

- Illustration de la divergence entre deux prévisions :
  - États initiaux très proches (différence inférieure à l'erreur d'analyse moyenne)
  - Même modèle, sauf paramétrisations physiques

- *Illustration of the divergence between two forecasts:*
  - *The initial states are very close (difference lower than the mean analysis error)*
  - *The same model, except for the physical parametrizations*



72 H



Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. La prévision d'ensemble
   - Principes généraux
   - Les ingrédients
   - Les produits de la prévision d'ensemble
   - Evaluation des prévisions
5. Conclusions et perspectives

1. General principles

2. The analysis (data assimilation)

3. The forecast

4. Ensemble prediction

- *General principles*
- *Ingredients of an ensemble prediction*
- *Outputs of an ensemble prediction*
- *Evaluation of the forecasts*

5. Conclusions and prospects

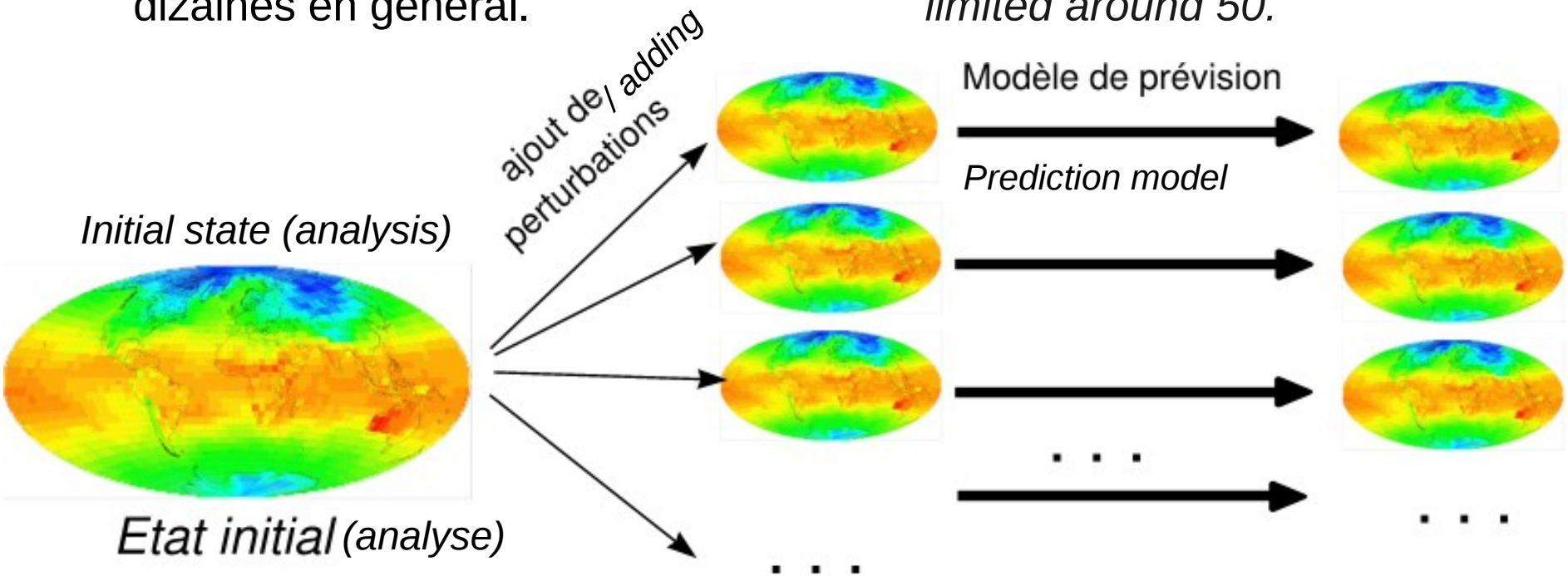
METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Le modèle numérique
The numerical model

- Un système de prévision d'ensemble consiste à simuler plusieurs évolutions possibles de l'état de l'atmosphère, les **membres**. Le nombre de membre est limité à quelques dizaines en général.

- *An ensemble prediction system consists in running several possible evolutions of the atmospheric state, the members. The number of members is generaly limited around 50.*



4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Le modèle numérique
The numerical model

- Un système de prévision d'ensemble repose sur :
  - Un modèle de prévision numérique
  - Le calcul de perturbations initiales
  - Le calcul de perturbations du modèle

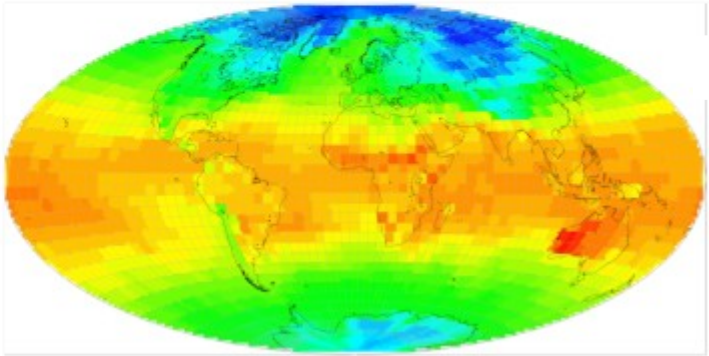
- *An ensemble prediction system relies on:*
  - *A numerical prediction model*
  - *The computation of initial perturbations*
  - *The computation of perturbations of the model*

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Le modèle numérique
The numerical model

- Une prévision d'ensemble est associée à un modèle de prévision numérique. Souvent, la résolution des membres est moindre que celle du modèle déterministe.
- Le membre non-perturbée s'appelle le **controle** (différent de la **prévision déterministe**).

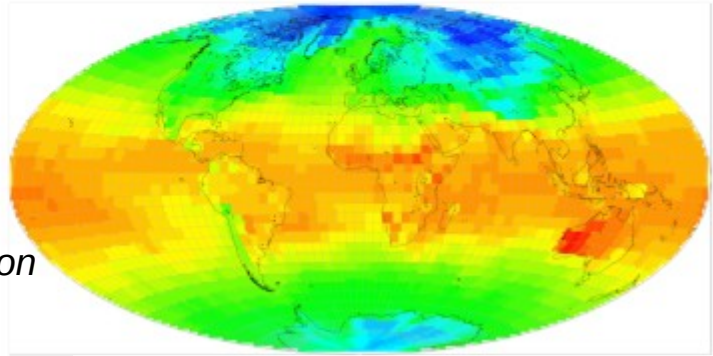
- *An ensemble forecast is associated to a numerical prediction model. The resolution of the members is generally lower than the deterministic model.*
- *The non-perturbed member is called the **control** (different to the **deterministic forecast**).*



Analyse / *Analysis*

Modèle de prévision :
haute résolution

Forecast model, high resolution



Prévision déterministe
/ Deterministic Forecast

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Les perturbations initiales
The initial perturbations

- Quelles perturbations initiales ? Aléatoirement?
- Leur amplitude doit etre inférieure à l'erreur initiale moyenne
- L'objectif est d'estimer les directions les plus probables d'évolution de l'état de l'atmosphère ; mais comment ?
- Quelques méthodes de calcul :
  - Vecteurs singuliers
  - Observations perturbées
  - *Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF)*

- *What initial perturbations ? Randomly?*
- *Their amplitude should be lower than the mean initial error*
- *The objective is to estimate the most probable directions of evolution of the atmospheric state; but how?*
- Some calculation methods :
  - *Singular vectors*
  - *Perturbed observations*
  - *Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF)*

METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Description des principaux systèmes
Description of the main systems

- Comment prendre en compte l'incertitude due au modèle ?
  - Ensemble multi-modèle
  - Physique différente
  - Physique stochastique (perturbation aléatoire des coefficients de paramétrisation)

- La plus grande source d'incertitude provient des phénomènes sous-maille représentés par les paramétrisations physiques

- *How to take into account the model uncertainty?*
  - *Multi-model ensemble*
  - *Different physics*
  - *Stochastic physics (random disturbance of parametrization coefficients)*

- *The largest source of uncertainty comes from the under-mesh processes represented by the physical parametrizations*

METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Description des principaux systèmes
Description of the main systems

	Centre	Number of members	Resolution	Inital perturbations	Model perturbations
EPS	CEPMMT ECMWF	51	18km (0-15j) 36km (16-46j)	Singular vectors + perturbed observations	Physics (stochastic)
PEARP	Météo-France	35	10 km France ~35 km Océan Indien	Singular vectors + perturbed observations	Physics
MO GREPS	UK Met Office	46 (7days) 24 (15 days)	33 km 60 km	ET KF ET KF	- Physics
	CMC (Canada)	21	~100 km	Perturbed observations	Physics
GEFS	NCEP (USA)	21	~100 km	ET Rescaled	Stochastic total tendancy

Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. La prévision d'ensemble
   - Principes généraux
   - Les ingrédients
   - Les produits de la prévision d'ensemble
   - Evaluation des prévisions
5. Conclusions et perspectives

1. General principles

2. The analysis (data assimilation)

3. The forecast

4. Ensemble prediction

- *General principles*
- *Ingredients of an ensemble prediction*
- *Outputs of an ensemble prediction*
- *Evaluation of the forecasts*

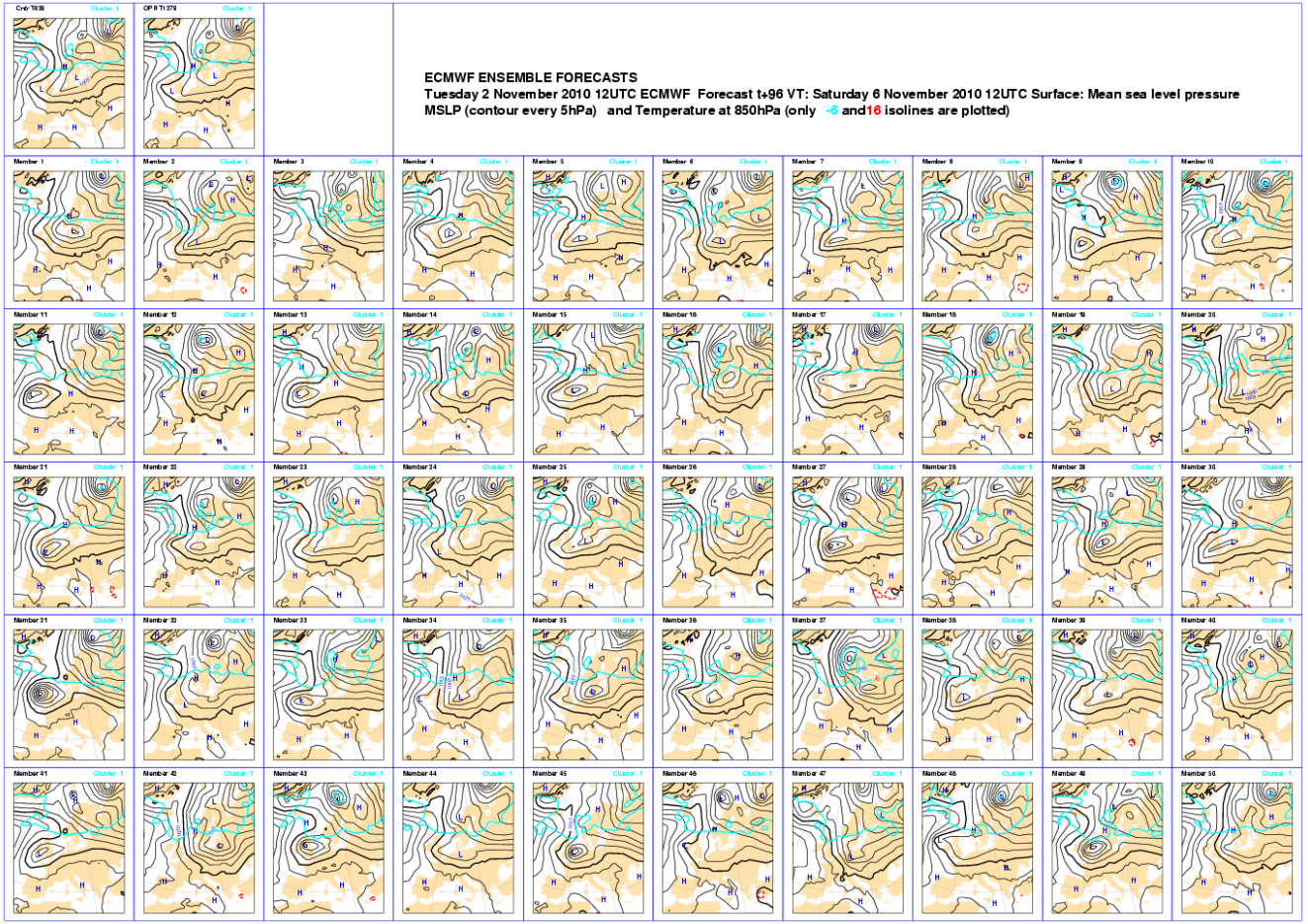
5. Conclusions and prospects

METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Les membres
The members

- Les différents membres prévus sont supposés **équiprobables**
- *The different forecast members are supposed* ***equiprobables***

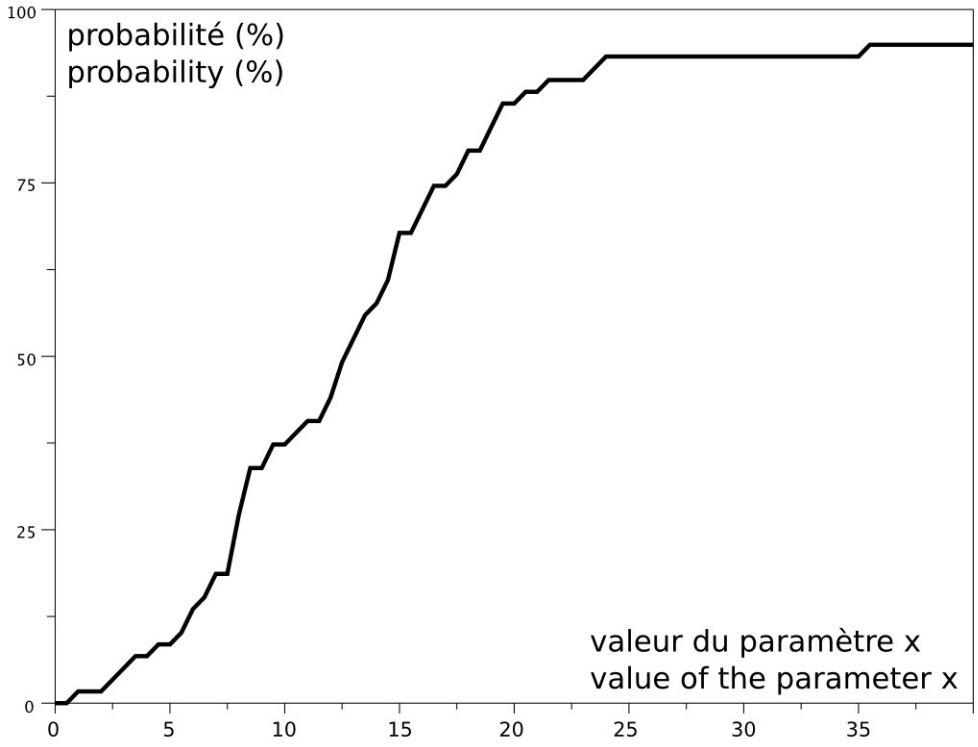


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Les membres
The members

- En chaque point de la carte, pour chaque paramètre prévu, une **distribution de probabilité prévue** est déduite.

- *At every point of the map, for every predicted parameter, a **distribution of forecast probability** is deduced.*



4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Dispersion
Spread

- Nécessité de mesurer l'incertitude
  - Écart-type
  - Dispersion par boite à moustache
  - Probabilité de dépassement de seuil
  - Quantiles
  - Index de prévision extrême (EPI)

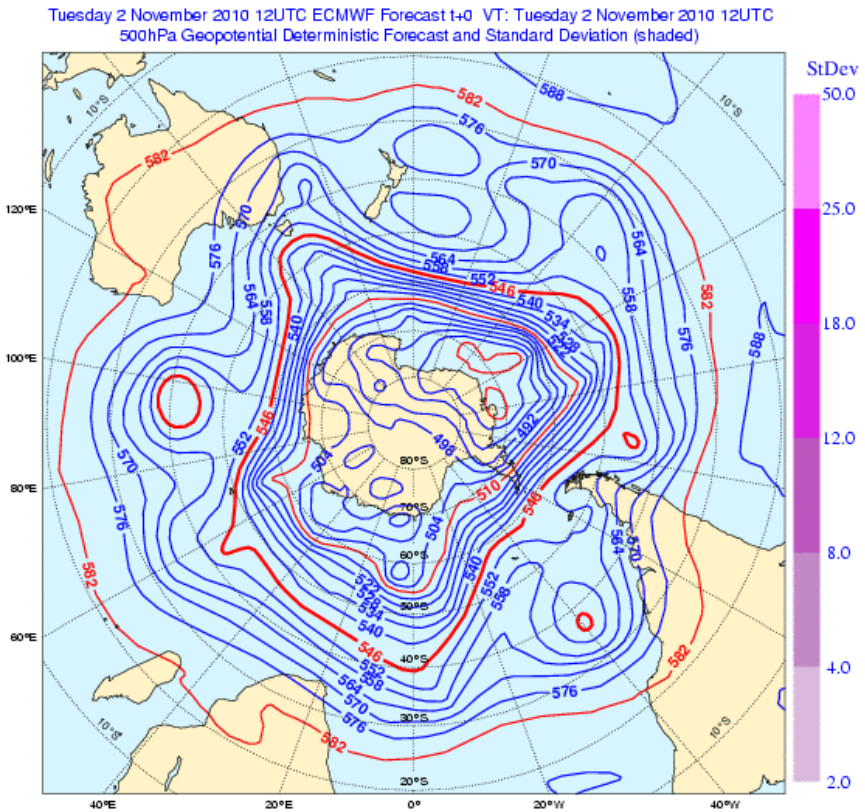
- *Requirement to measure the uncertainty*
  - *Standard deviation*
  - *Spread by box plot*
  - *Probability of value above a threshold*
  - *Quantiles*
  - *Extreme Forecast Index (EPI)*

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Dispersion
Spread

- Evaluation de l'écart-type en lien avec la prévision déterministe

- *Assessment of standard deviation linked with the determinist forecast*



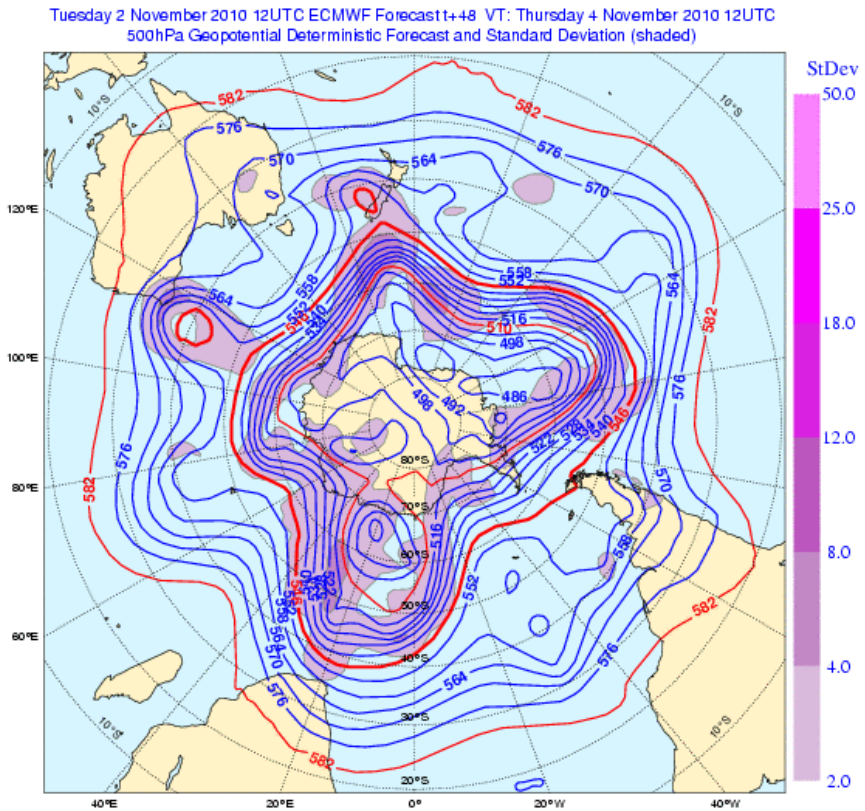
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2$$

0h

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Dispersion
Spread

- Evaluation de l'écart-type en lien avec la prévision déterministe
- *Assessment of standard deviation linked with the determinist forecast*



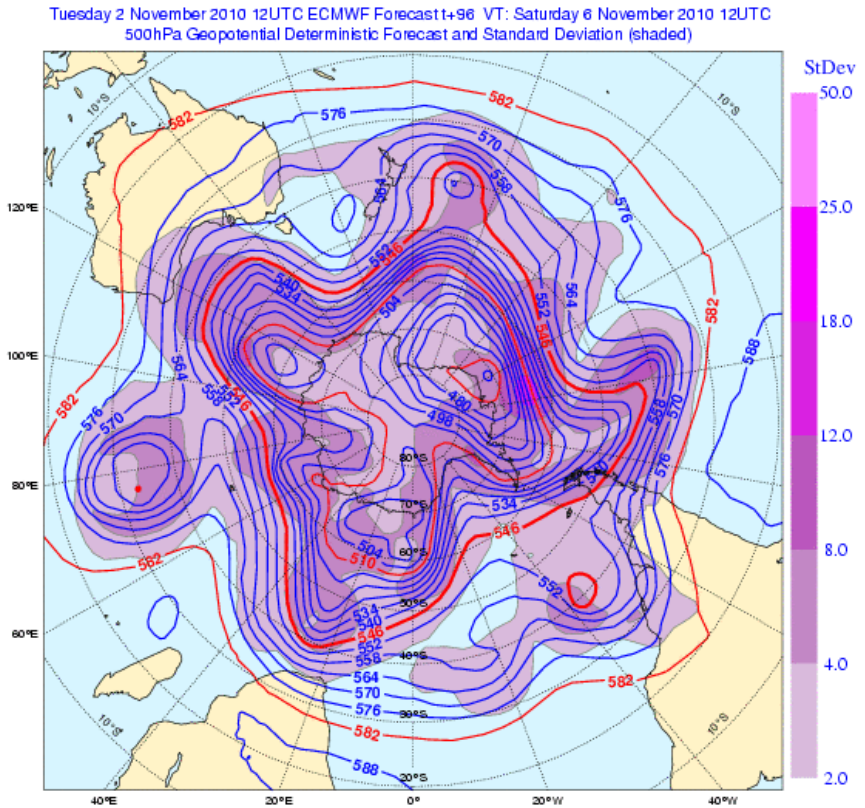
48h

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2$$

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Dispersion
Spread

- Evaluation de l'écart-type en lien avec la prévision déterministe
- *Assessment of standard deviation linked with the determinist forecast*



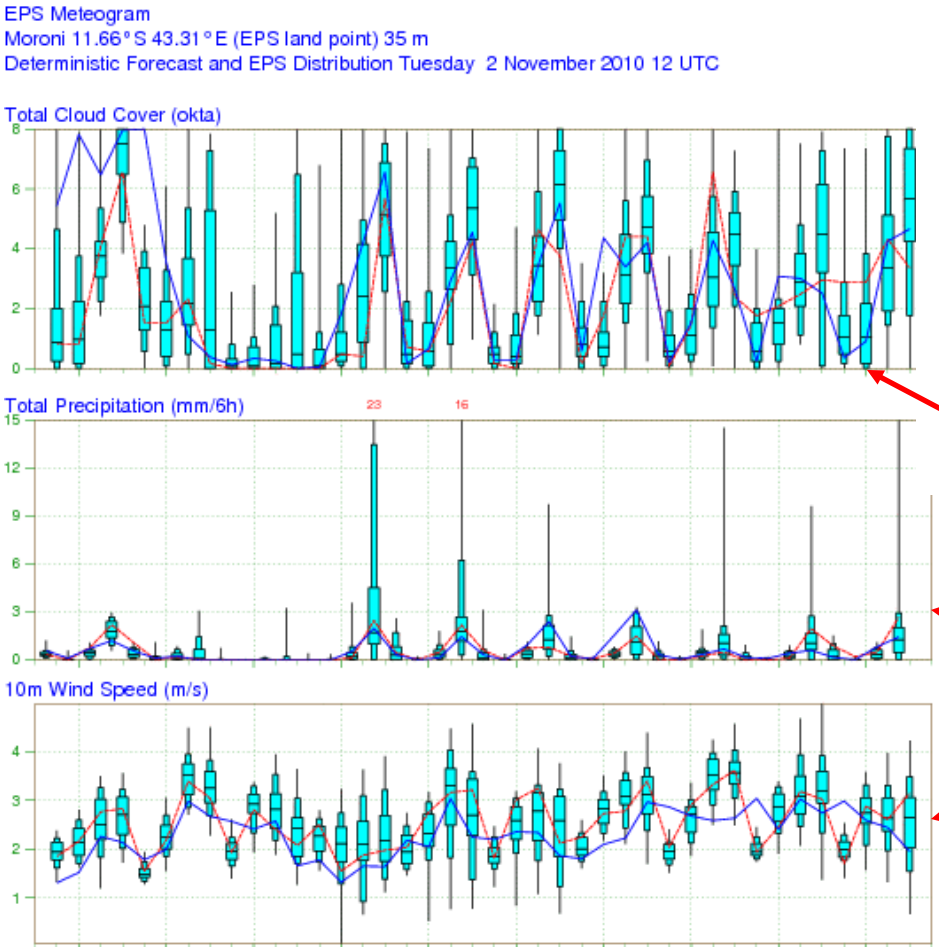
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_i - \overline{X})^2$$

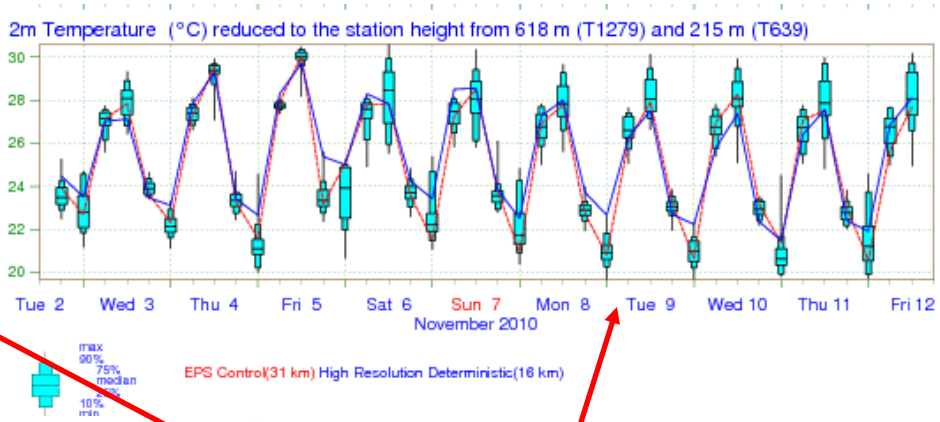
96h

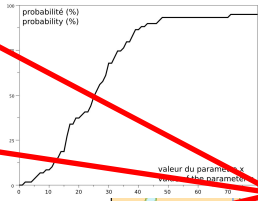
4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

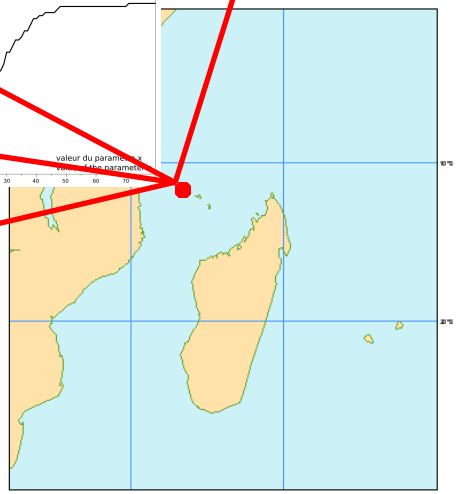
Dispersion
Spread

- Les EPSgrams utilisent la dispersion
- *EPSgrams use spread*





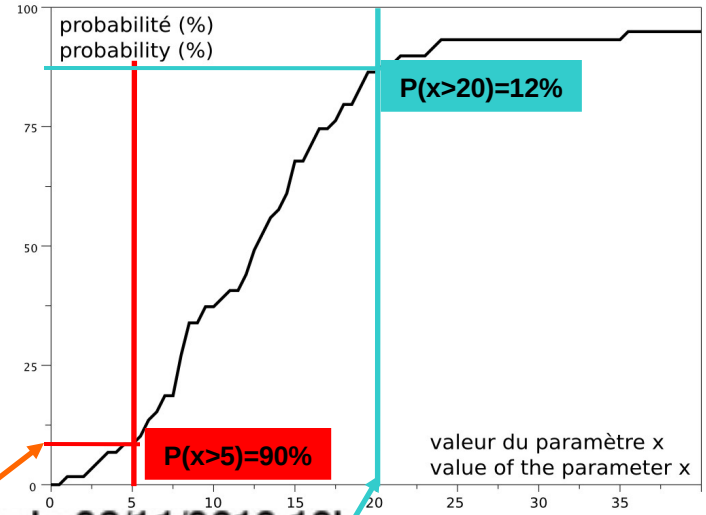


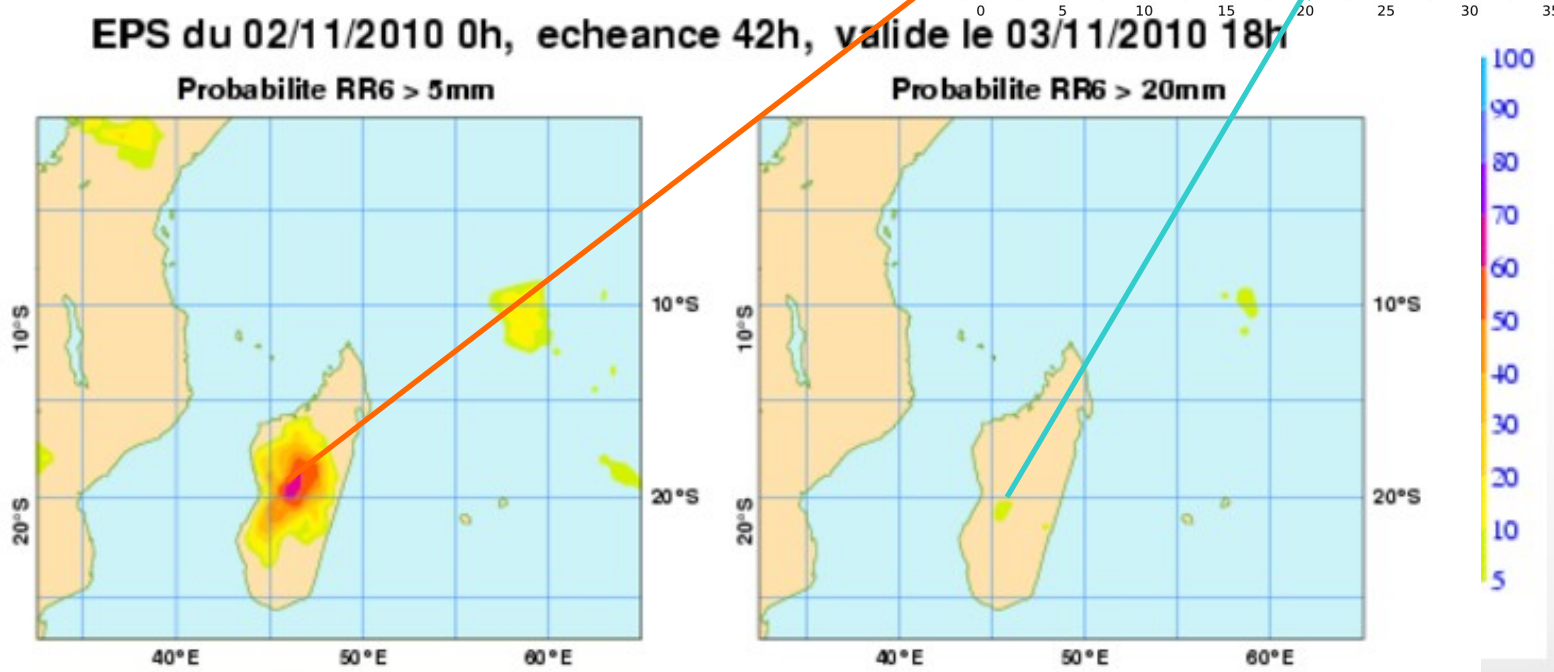


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

- Probabilité de dépassement de seuil en un point
- *Probability of value above a threshold at a point*

Probabilités / *Probabilities*

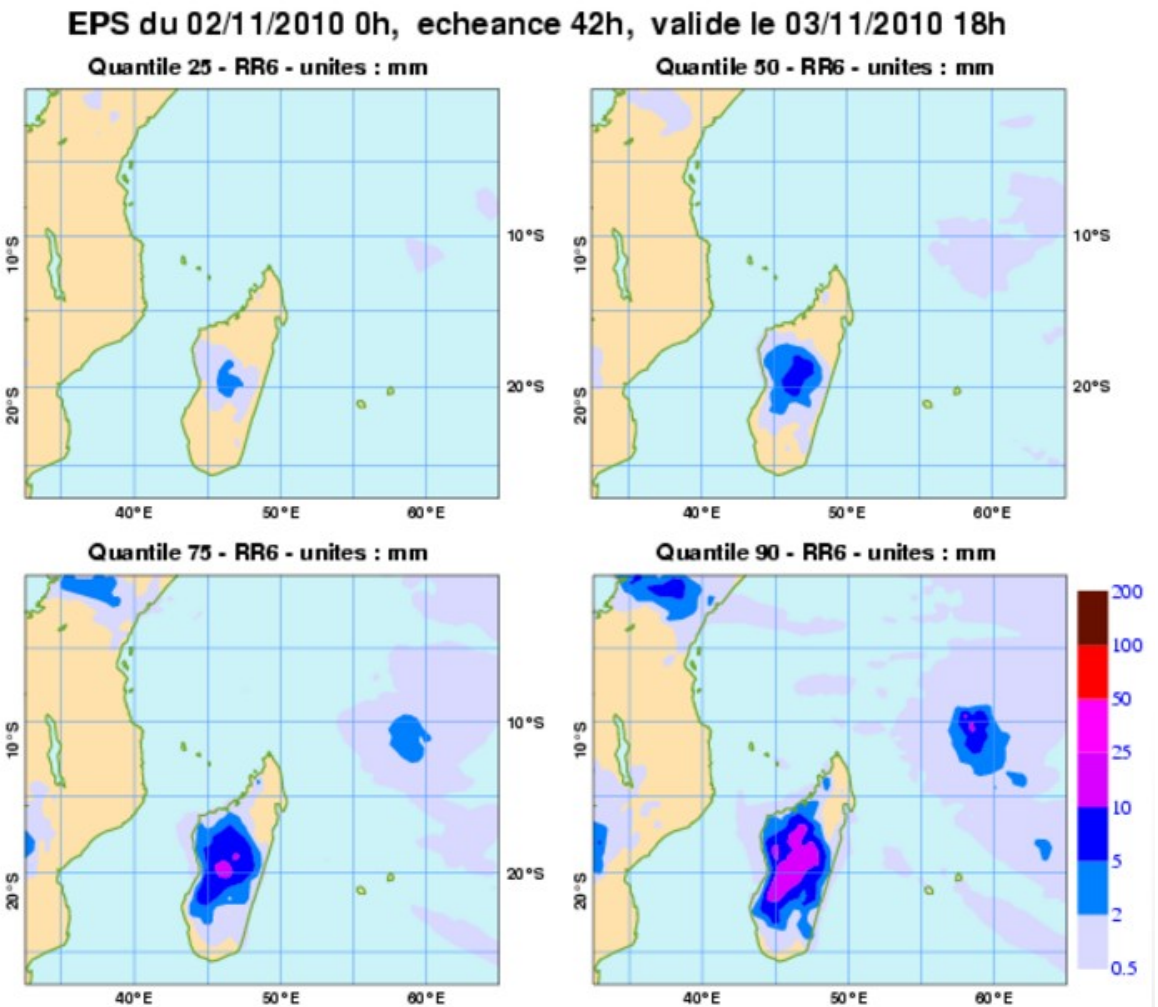


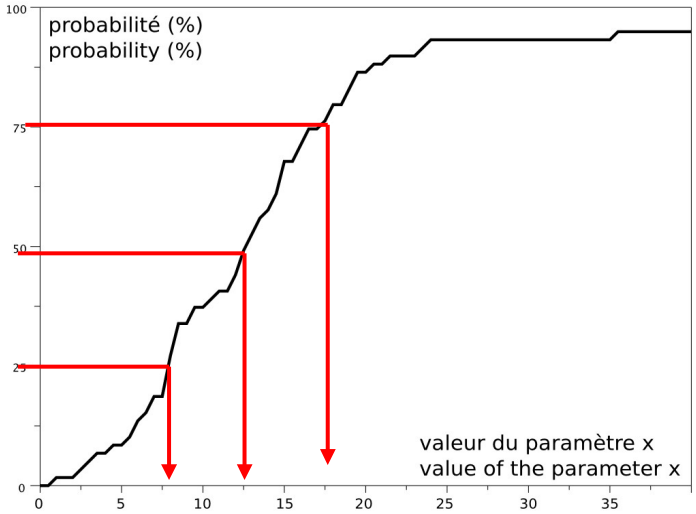


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Probabilités / *Probabilities*

- Quantiles en un point
- *Quantiles at a point*



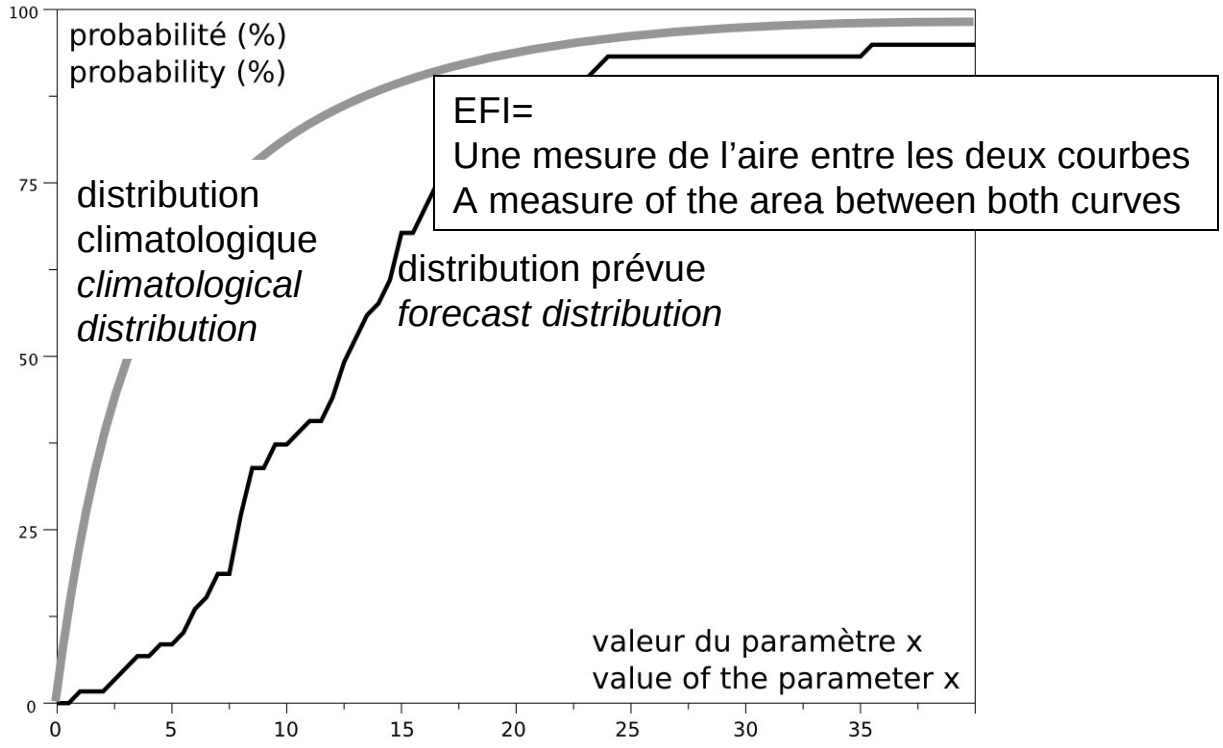


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Probabilités / *Probabilities*

- Extreme Forecast Index (EFI)
  - Objectif: prévoir les événements extrêmes (vent, précipitations), par rapport à la climatologie du modèle
  - Indique si le modèle prévoit des valeurs inhabituelles

- Extreme Forecast Index (EFI)
  - *Aim: forecasting the extreme events (wind, precipitations), taking into account the model climatology*
  - *Indicates whether the model predicts unusual values*



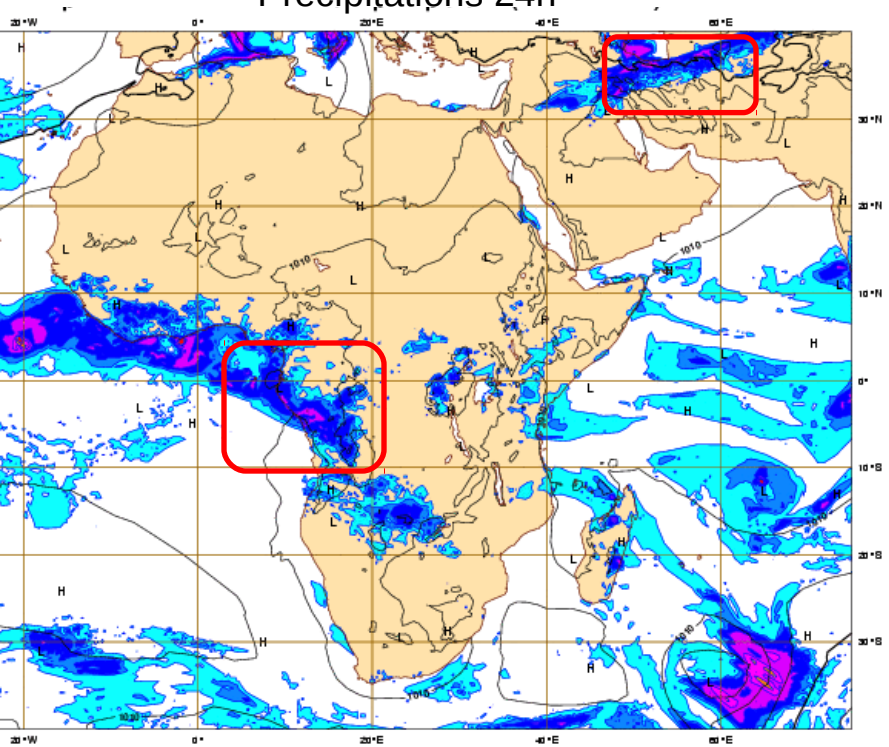
4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Probabilités / *Probabilities*

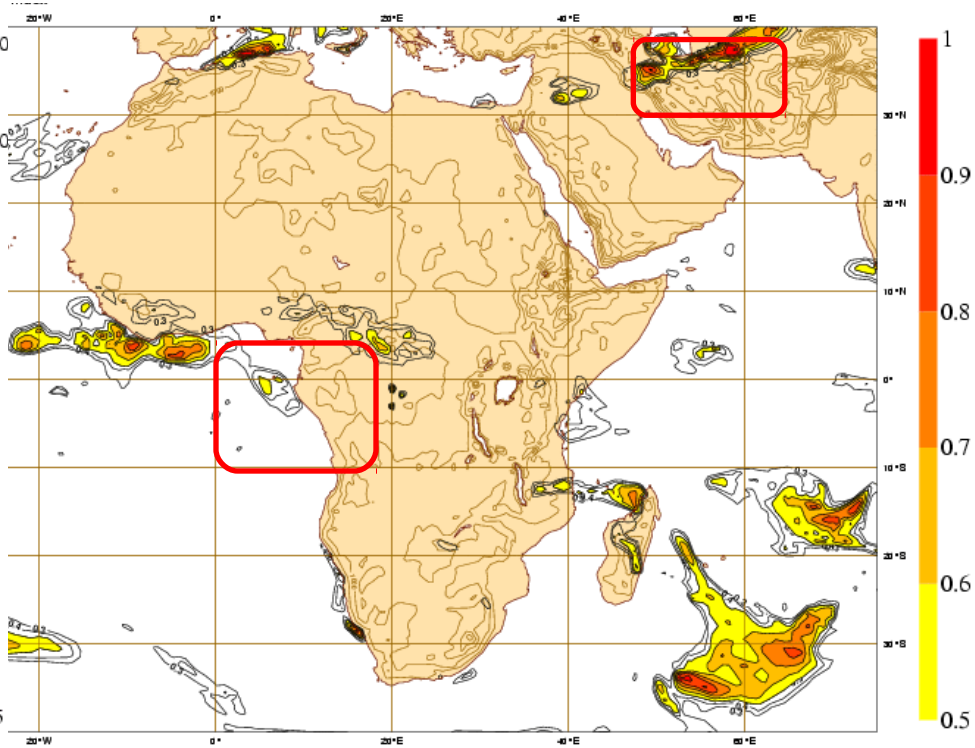
- Extreme Forecast Index (EFI)
  - Objectif: prévoir les événements extrêmes (vent, précipitations), par rapport à la climatologie du modèle
  - Indique si le modèle prévoit des valeurs inhabituelles

- Extreme Forecast Index (EFI)
  - *Aim: forecasting the extreme events (wind, precipitations), taking into account the model climatology*
  - *Indicates whether the model predicts unusual values*

Precipitations 24h



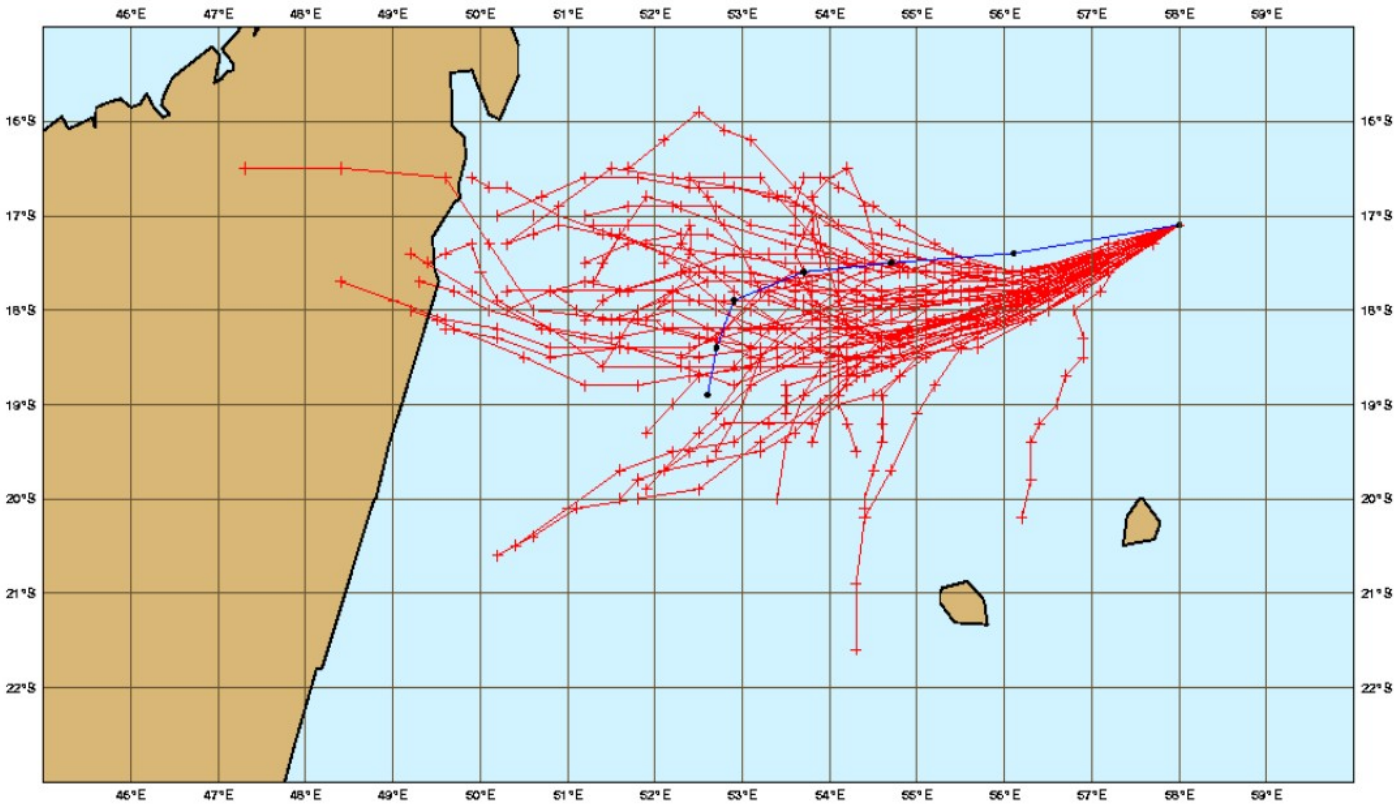
EFI Précipitations 24h



4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Produits cyclone
Cyclone products

- Trajectoires du cyclone prévues par les membres
- *Trajectories of the cyclone forecasted by the members*

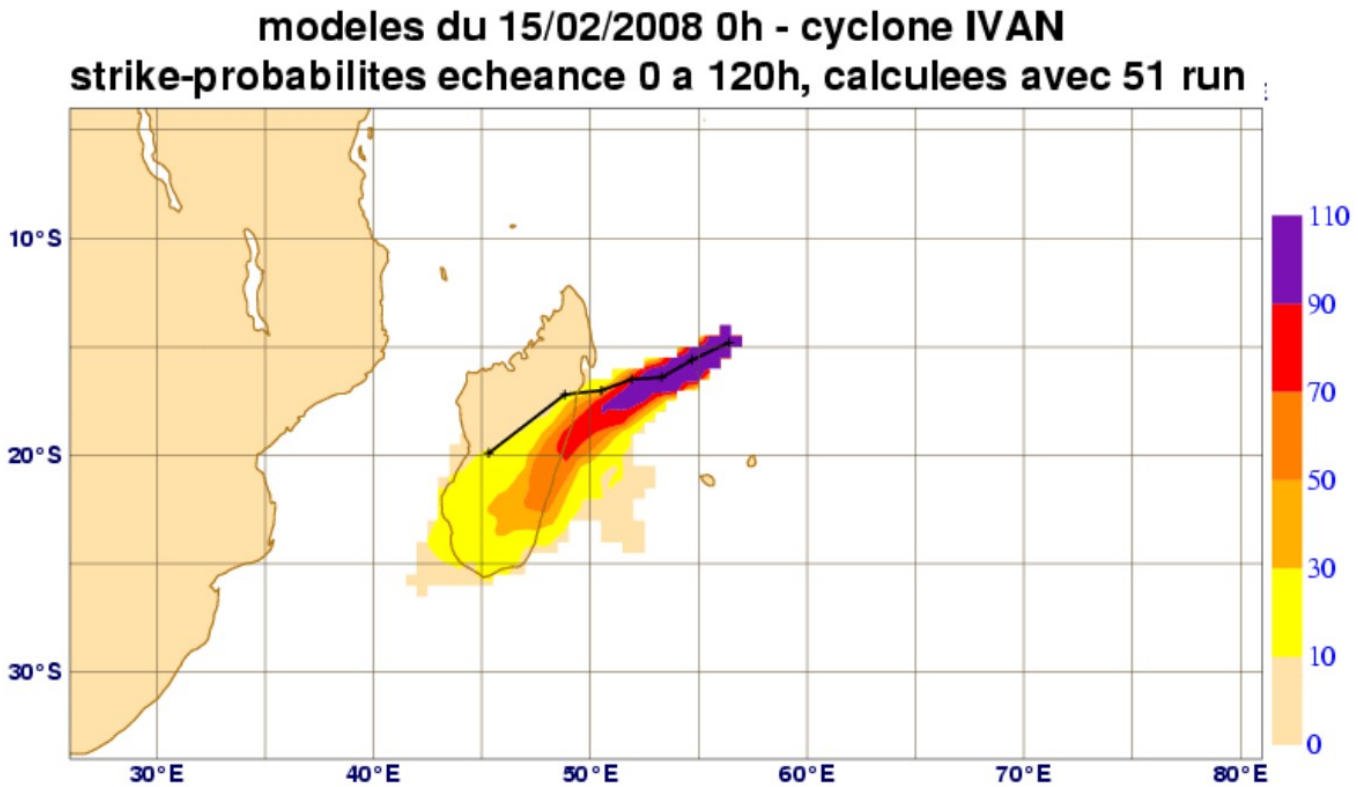


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Produits cyclone
Cyclone products

- Probabilités de présence : probabilité qu'un cyclone tropical passe dans un rayon de 120 km dans les prochaines 120 h.

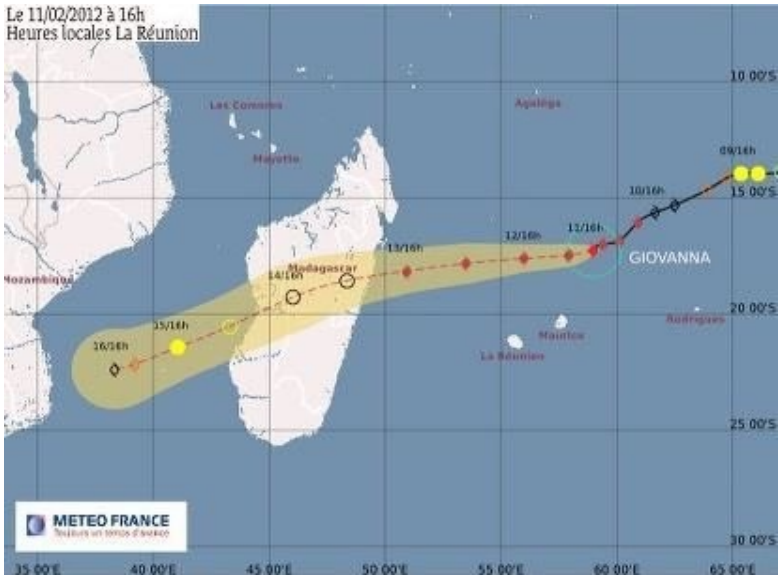
- *Strike probabilities : probability that a tropical cyclone will pass within a 120km radius during the next 120h.*

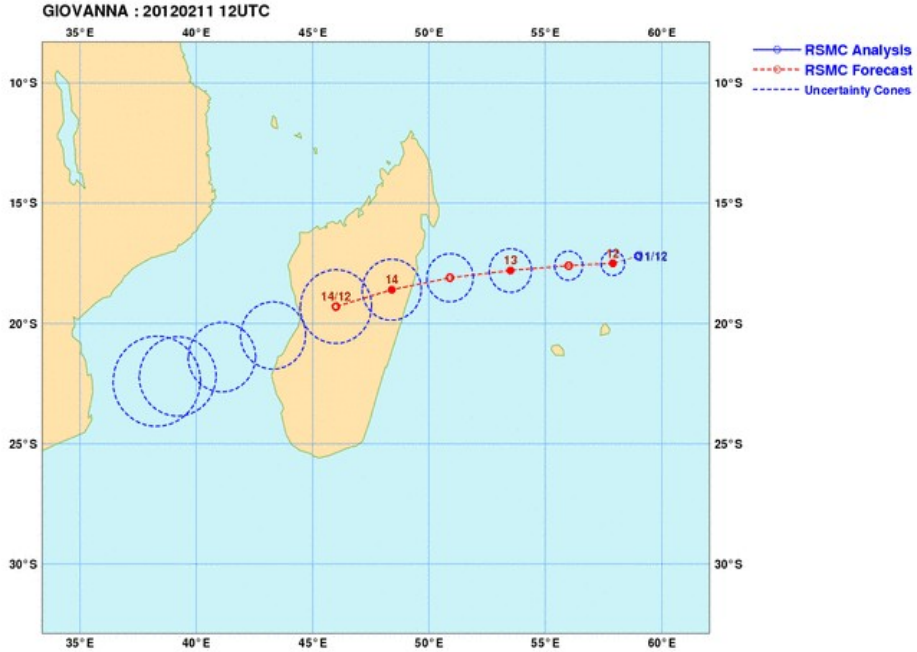


4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Produits cyclone
Cyclone products

- Cone d'incertitude de la prévision de trajectoire du CMRS
- *Uncertainty cone of the RSMC track forecast*





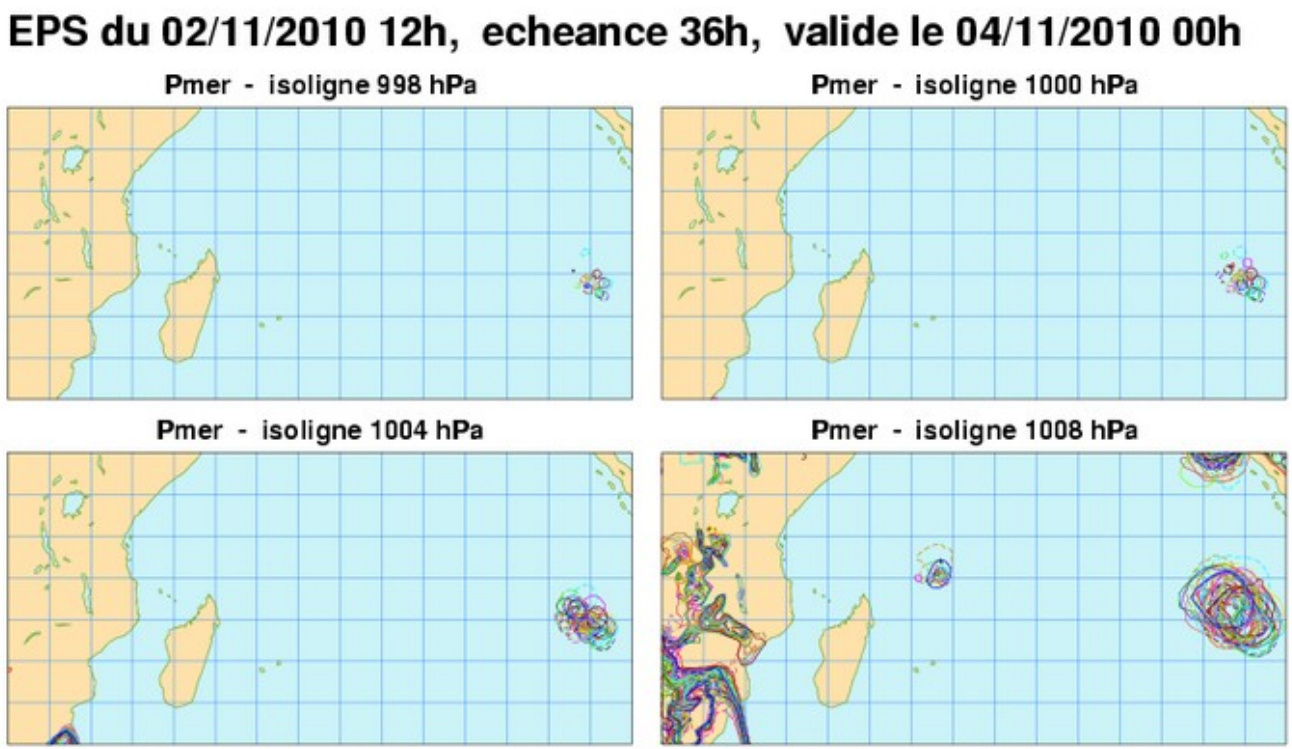
Site internet public du CMRS de la Réunion
Public Website of RSMC La réunion

Site internet SWFDP (accès restreint)
Southern Africa SWFDP Website
(Restricted Acces)

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Produits cyclone
Cyclone products

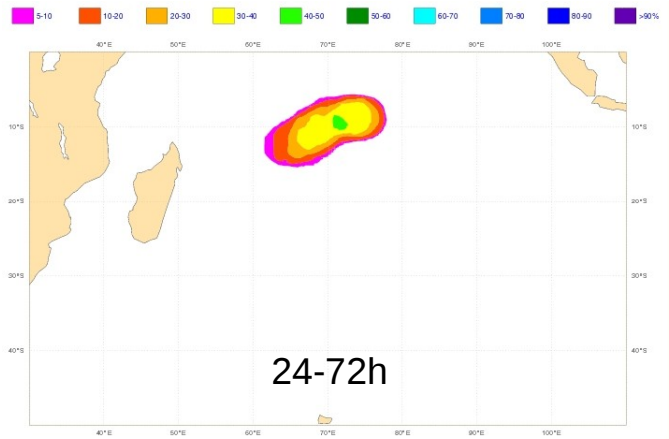
- Spaghettis Pmer pour la détection de la cyclogenèse
- *MSLP spaghettis for the detection of cyclogenesis*

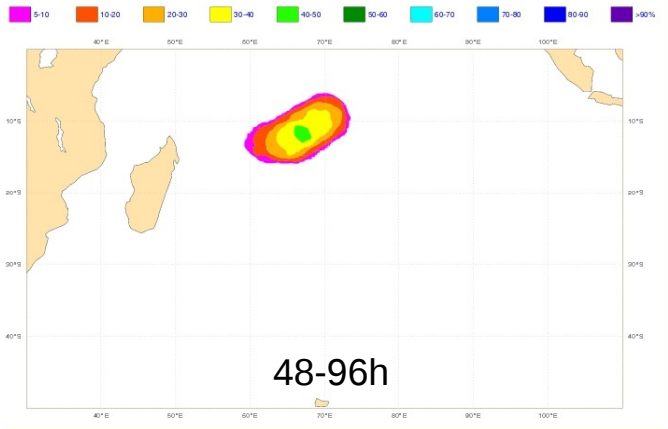


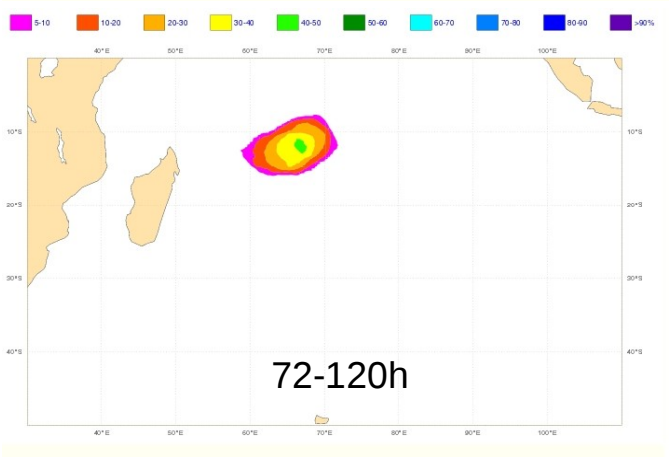
4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

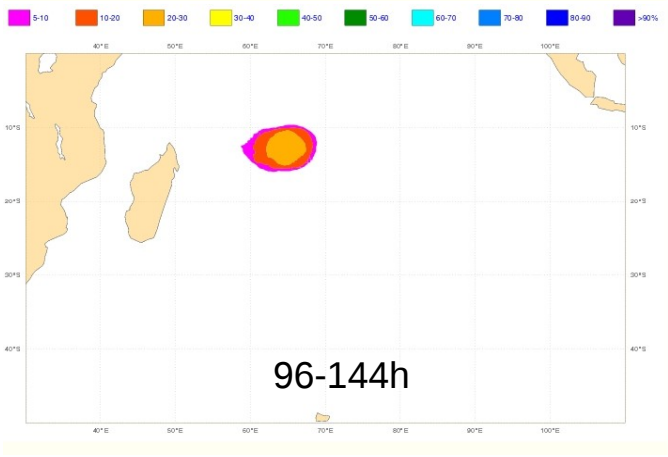
Produits cyclone
Cyclone products

- Probabilités de présence pour la détection de la cyclogenèse
- *Strike probabilities for the detection of cyclogenesis*









Plan

1. Principes généraux
2. L'analyse (assimilation de données)
3. La prévision
4. La prévision d'ensemble
   - Principes généraux
   - Les ingrédients
   - Les produits de la prévision d'ensemble
   - Evaluation des prévisions
5. Conclusions et perspectives

1. General principles

2. The analysis (data assimilation)

3. The forecast

4. Ensemble prediction

- *General principles*
- *Ingredients of an ensemble prediction*
- *Outputs of an ensemble prediction*
- *Evaluation of the forecasts*

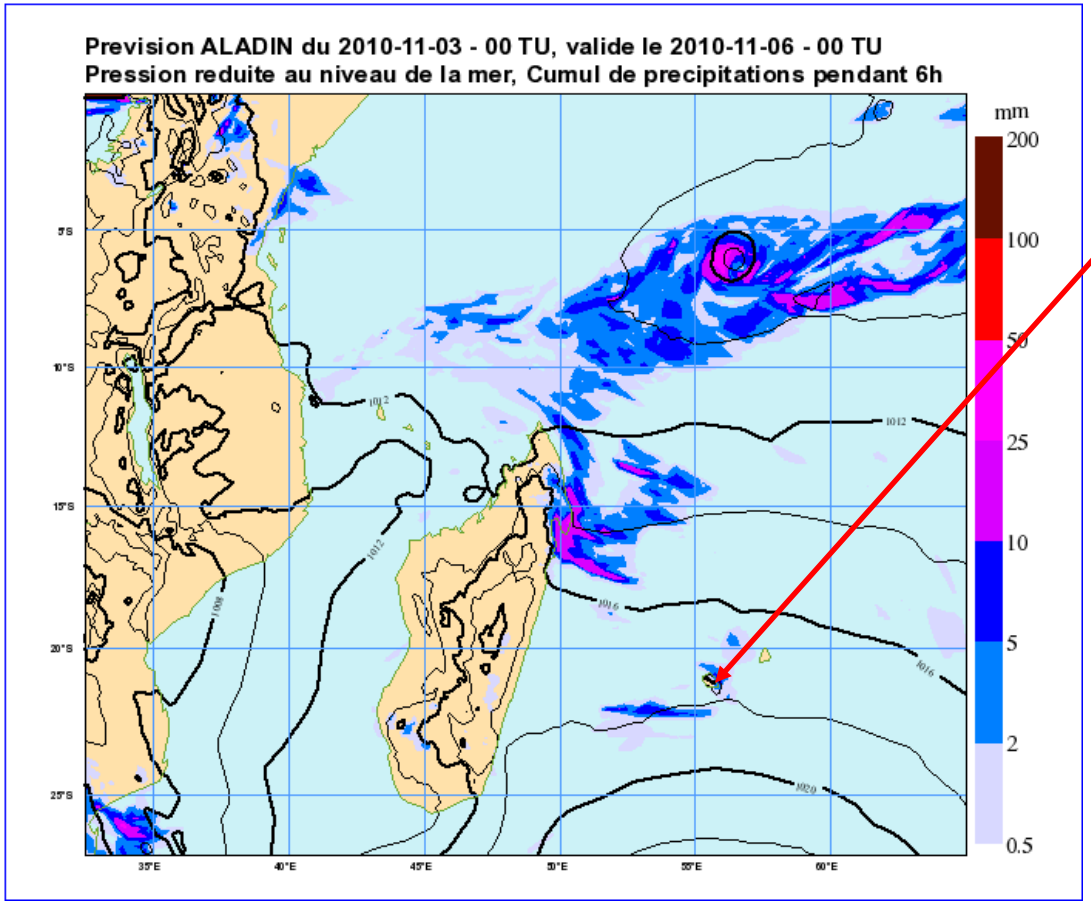
5. Conclusions and prospects

METEO FRANCE

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Evalution des prévisions
Evaluation of the forecasts

- Une prévision déterministe peut être comparée à une observation
- *A deterministic forecast may be compared to an observation*



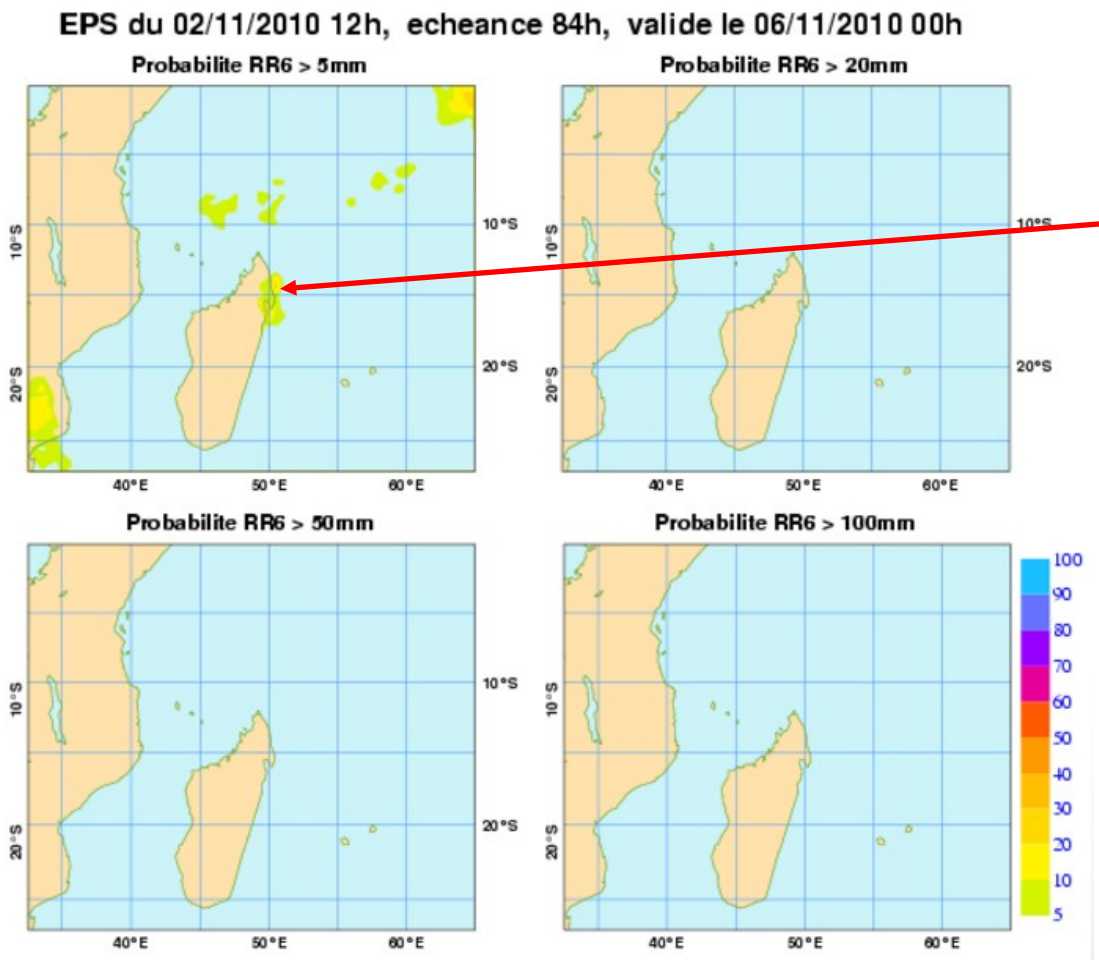
Exemple :
prévision 8mm/6h
peut être comparée à l'observation

Example:
Forecast 8mm/6h
may be compared to the observation

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Evalution des prévisions
Evaluation of the forecasts

- Comment vérifier et évaluer une prévision d'ensemble ?
- *How to verify and evaluate an ensemble forecast?*



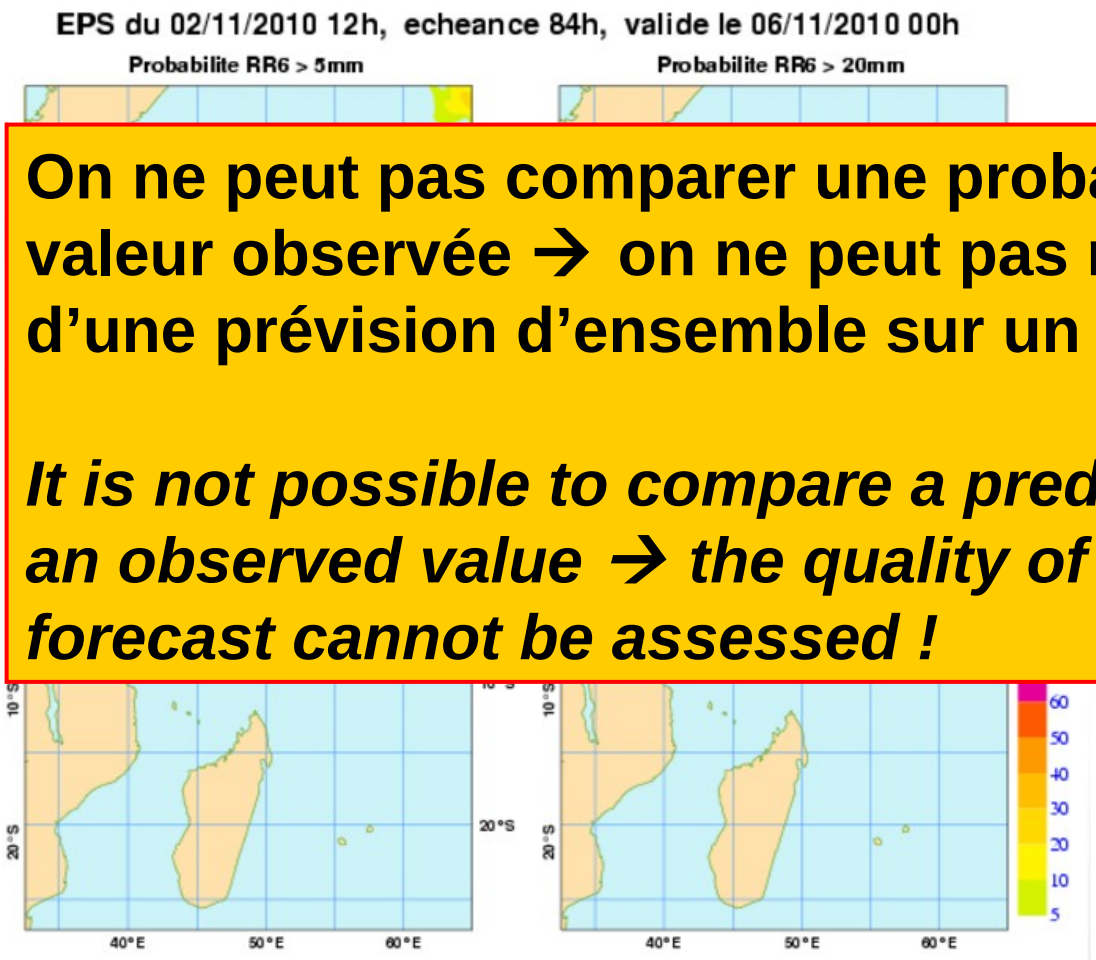
La probabilité qu'il pleuve au moins 5mm pendant 6h est de 20%.
S'il pleut effectivement, la prévision est-elle bonne ?
S'il ne pleut pas, la prévision est-elle bonne ?

The probabibility that rain is over 5mm for 6h is 20%.
If it actually rains, is it a good forecast?
If it does not rain, is it a good forecast?

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Evalution des prévisions
Evaluation of the forecasts

- Comment vérifier et évaluer une prévision d'ensemble ?
- *How to verify and evaluate an ensemble forecast?*



On ne peut pas comparer une probabilité prévue à une valeur observée → on ne peut pas mesurer la qualité d'une prévision d'ensemble sur un cas !

It is not possible to compare a predicted probability with an observed value → the quality of a single ensemble forecast cannot be assessed !

4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Paramètres de qualité
Quality parameters

- Evaluation de la qualité globale du modèle et non en lien avec une prévision
- Besoin de grands échantillons pour avoir des scores significatifs

  → Amélioration par calibration
- Paramètres de qualité = scores
  - Fiabilité
  - Résolution
  - Score de Brier
  - Courbe ROC

- *Assessment of the overall quality of the model and not specific to a forecast*
- *Need large samples to have significant scores*

  → *Improvement by calibration*
- *Quality parameters = scores*
  - *Reliability*
  - *Resolution*
  - *Brier Score*
  - *ROC plot*

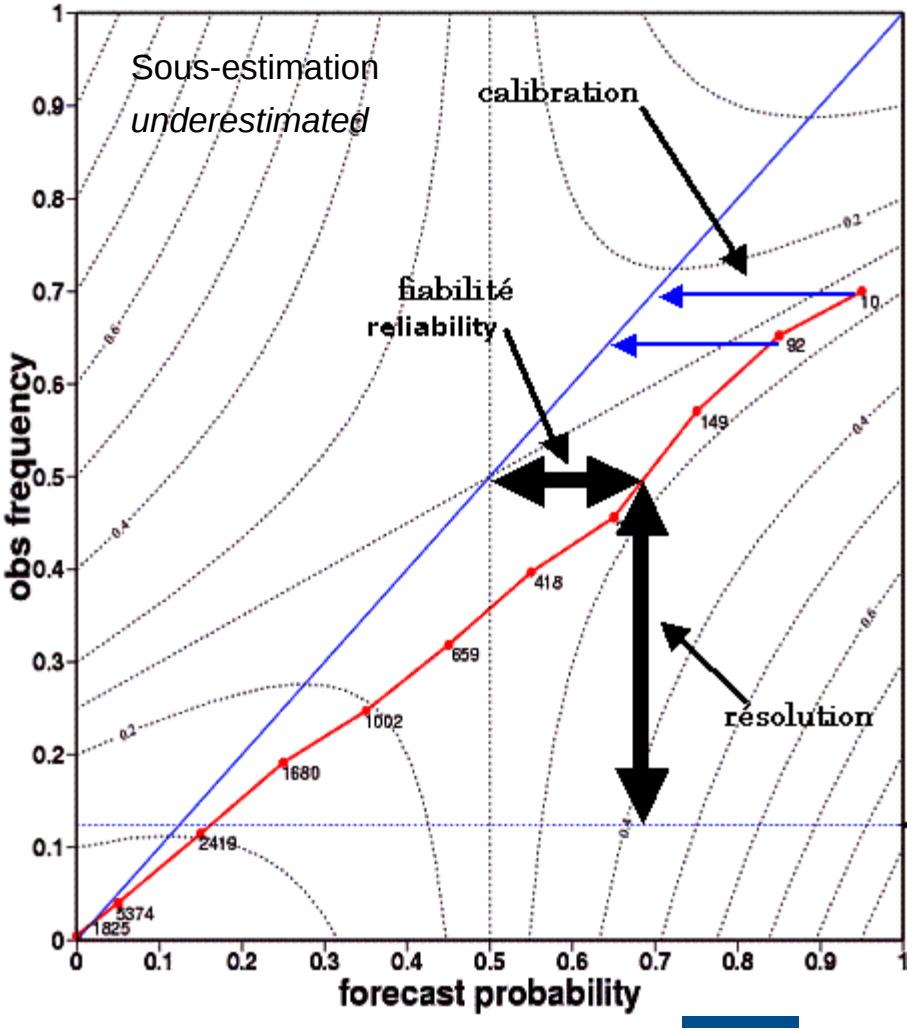
4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

Paramètres de qualité
Quality parameters

- Fiabilité : accord entre probabilités prévues et fréquences observées
- Plus la fiabilité a une valeur petite, meilleur c'est
- La fiabilité peut être améliorée en **calibrant** le système.

$$\textit{fiabilité / reliability} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} n_i (p_i - o_i)^2$$

- *Reliability : agreement between predicted probabilities and observed frequencies*
- *The smaller the reliability is, the better it is.*
- *The reliability may be improved by **calibrating** the system*



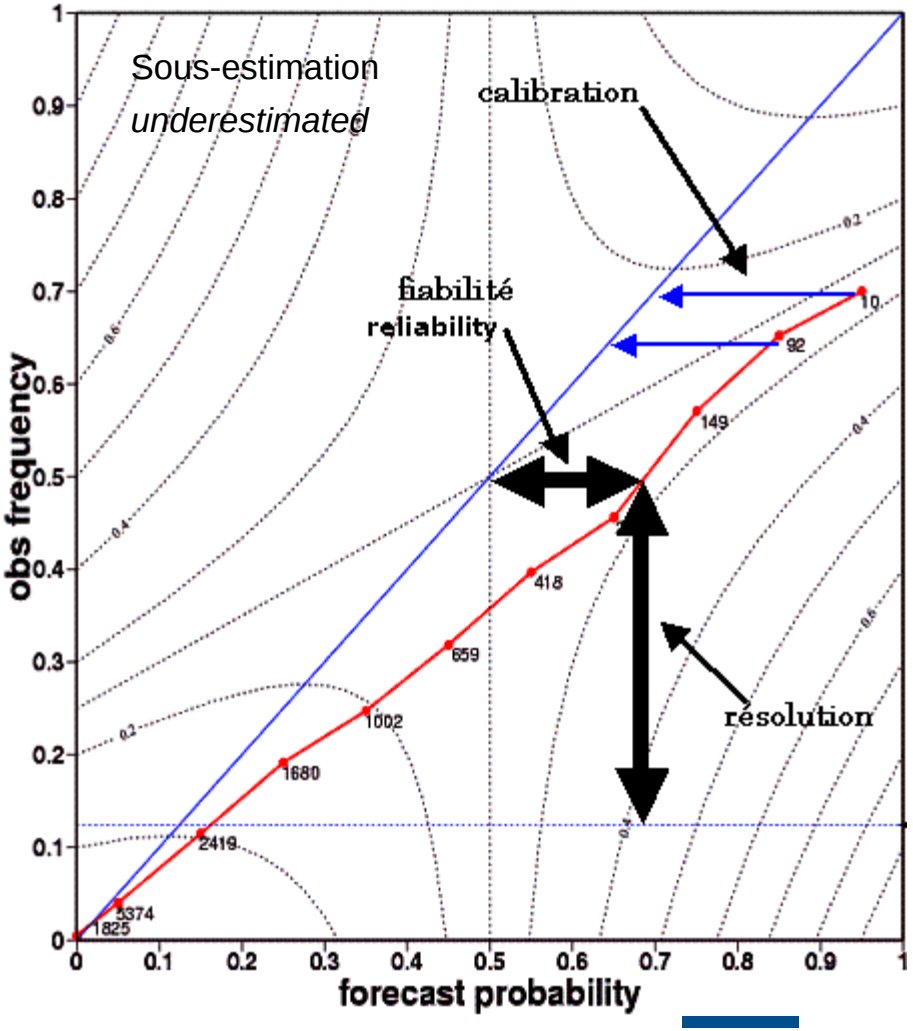
4. Evaluation des prévisions
Evaluation of the forecasts

Paramètres de qualité
Quality parameters

- Résolution : capacité à discriminer les situations ayant des probabilités d'occurence du phénomène étudié différentes
- Plus la résolution a une grande valeur, meilleur c'est → être loin de l'observation moyenne « c »

$$resolution = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} n_i (o_i - c)^2$$

- *Resolution : ability to discriminate situations with different probabilities of occurrence*
- *The bigger the resolution is, the better it is →furthest of the mean value « c »*



4. Prévision d 'ensemble / *Ensemble prediction*

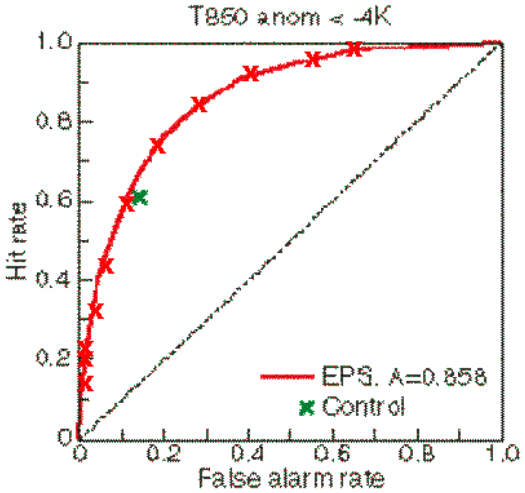
Scores
Scores

$$Brier\ score = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(p_i - o_i)^2$$

- Fiabilité sans pondération
- Plus le score a une petite valeur, meilleur c'est
- Courbe ROC (Caractéristiques relatives de fonctionnement) à partir de plusieurs seuils pour
  - Taux de fausses alarmes : b/(b+d)
  - Taux de réussite : a/(a+c)

- *No-weighted Fiability*
- *The smaller the brier score is, the better it is*
- ROC plot (Relative Operating Characteric) using different thresholds for
  - False alarm rate : b/(b+d)
  - Hit rate : a/(a+c)

Seuil = n%	Observé / *observed*	Non observé / *Not observed*
Prévu / *Forecasted*	a	b
Non prévu / *Not forecasted*	c	d



Plan

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

1. General principles

2. The analysis (data assimilation)

3. The forecast

4. Ensemble prediction

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

METEO FRANCE

5. Conclusions et perspectives
Conclusions and prospects

- Une évolution permanente nécessaire et bénéfique
- Prévisions de trajectoires ont progressé régulièrement depuis 20 ans
- Depuis quelques années, capacité des modèles à prévoir l'intensité
- Réduire la dispersion = une nécessité

- *A permanent and beneficial evolution*
- *The track forecasts have been improving for 20 years*
- *In recent years, model ability to forecast intensity*
- *Reduce standard deviation = a needed*

METEO FRANCE

5. Conclusions et perspectives
Conclusions and prospects

- L'avenir : des modèles à haute résolution (< 3km) 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 (< 3km) 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

METEO FRANCE

5. Conclusions et perspectives
Conclusions and prospects

- Malgré les progrès continus de la prévision numérique et humaine, il existe une **limite indépassable** à la prévisibilité de l'atmosphère ; il est utile de prévoir l'incertitude de la prévision.
- La prévision d'ensemble est une technique assez récente (~15 ans), pour laquelle des recherches actives sont toujours en cours :
  - Comment calculer les perturbations initiales ?
  - Quelles techniques de perturbation du modèle?

- *Despite the continuous improvements of the numerical and human prediction, there is an **impassable limit** to the atmospheric predictability ; it is useful to forecast the uncertainty of the forecast.*
- *Ensemble prediction is a quite recent technique (~15 years old), for which active research is still going on :*
  - *How to compute the initial perturbations?*
  - *What techniques for perturbing the model?*

METEO FRANCE

5. Conclusions et perspectives
Conclusions and prospects

- Les résultats de la prévision d'ensemble peuvent prendre plusieurs formes : dispersion, probabilités, EFI,...
- Des produits spécifiques pour les cyclones permettent de caractériser l'incertitude de la prévision de trajectoire et de la cyclogenèse.
- L'évaluation des prévisions d'ensemble nécessite d'appliquer des outils statistiques à un échantillon suffisamment grand.

- *The results from ensemble prediction may take several forms: spread, probabilities, EFI,...*
- *Some specific products for tropical cyclones allow to characterize the uncertainty of track forecast and of cyclogenesis.*
- *The evaluation of ensemble forecasts requires to apply some statistical tools to a sufficiently large sample.*

METEO FRANCE

5. Conclusions et perspectives
Conclusions and prospects

- La prévision d’ensemble est une aide supplémentaire permettant d'évaluer l'incertitude et quantifier les risques de phénomènes dangereux
- Base pour les prévisions mensuelles, saisonnières et climatiques
- Utilisation pour la prévision d'ensemble de vagues

- *Ensemble prediction is an additional help to evaluate uncertainties and quantify risks of hazards*
- *basis of monthly, seasonnal and climate predictions*
- *Used for ensemble prediction of wave models*

METEO FRANCE