



# **LES MODELES DE PREVISION DE L'ATMOSPHERE**

Jean Coiffier

(Janvier 2006)

Association des Anciens de la Météorologie



# PLAN

- Historique
- Principe d'un modèle
- La mise en oeuvre
- La définition de l'état initial
- Les résultats
- La prévision d'ensemble



# Vilhelm Bjerknes

La prévision du temps est un problème déterministe à valeurs initiales au sens mathématique du terme :

" Si, comme le pense chaque homme raisonnant scientifiquement, les phénomènes atmosphériques se développent à partir de ceux qui les précèdent suivant des lois précises, on peut en déduire que les conditions nécessaires et suffisantes pour une solution rationnelle de la prévision en météorologie sont les suivantes :

on doit connaître avec une précision suffisante l'état de l'atmosphère à un instant donné ;

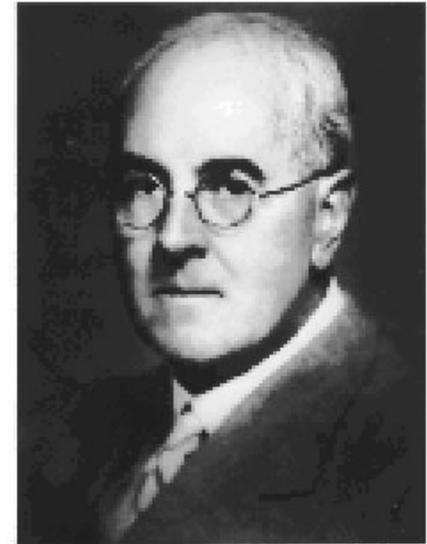
on doit connaître avec une précision suffisante les lois selon lesquelles un état de l'atmosphère se développe à partir de l'état précédent. « (V. Bjerknes, 1904)





# L. F. Richardson

Entre 1916 et 1922, L.F. Richardson résout les équations de la prévision du temps de façon approchée avec les outils du calcul numérique et réalise une prévision à six heures d'échéance qui se révèle complètement irréaliste.



« 64 000 calculateurs seraient nécessaires pour prendre de vitesse l'évolution du temps sur l'ensemble du globe » (L.F. Richardson , 1922)



# C.G.Rossby – J. Charney



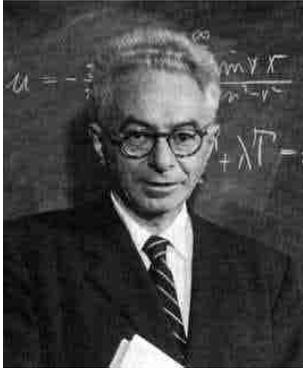
Equation d'évolution du tourbillon  
(*composante verticale du rotationnel du vent*),  
(C.G. Rossby, 1939)

Etude des échelles des  
mouvements dans l'atmosphère  
(J. Charney, 1948)





# R. Courant, K. Friedrichs, K. Lewy



$$C = \frac{U\Delta t}{\Delta x}$$

Critère CFL:

$C$  ne doit pas dépasser une valeur limite



R. Courant, K. Friedrichs,

H. Lewy

Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, Math. Ann. 100, 32-74 (1928)



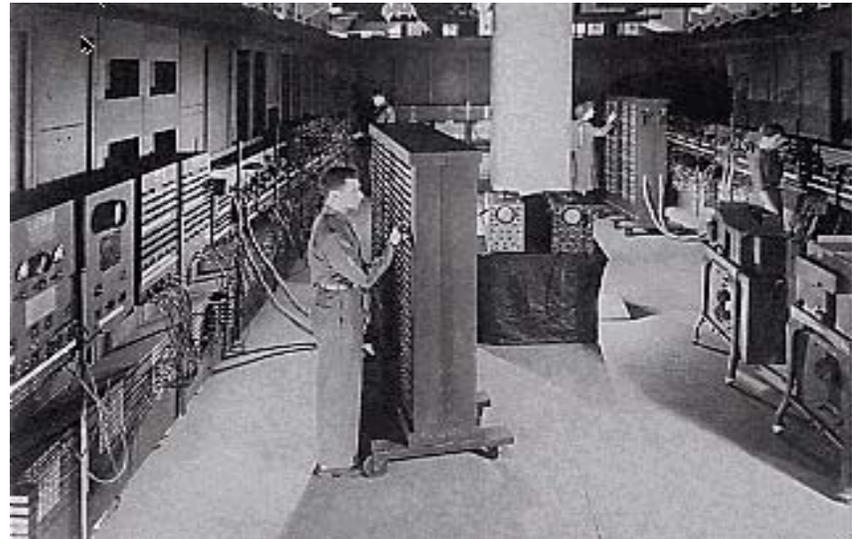
## Intégration numérique de l'équation du tourbillon barotrope (J. Charney, R. Fjortoft, J. von Neumann, 1950)



J. Charney, R. Fjortoft  
et J. Von Neumann  
réalisent la première  
prévision numérique du  
temps



Le calcul est réalisé sur  
l'ENIAC installé à Aberdeen





## Un problème de conditions initiales

Soit un domaine **D** fermé par une frontière **F** sur lequel sont définis les paramètres représentatifs de l'atmosphère **X(x,y,z,t)**

Connaissant **X(x,y,z,t<sub>0</sub>)**, état initial sur **D**, ainsi que :

**X(x,y,z,t)** sur **F** quel que soit **t** (conditions aux limites),

déterminer **X(x,y,z,t)** sur **D** pour tout **t** jusqu'à une échéance donnée, sachant que l'évolution de **X(x,y,z,t)** est donnée par le système d'équations aux dérivées partielles :

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = \mathbf{F}(\mathbf{X})$$



# Les équations

- 1 - Equation du **mouvement** : 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.

Elles ne permettent de traiter que certaines échelles.

Les processus physiques d'échelle inférieure aux échelles traitées par la dynamique et qui participent aux échanges avec l'extérieur doivent être **paramétrés**. On s'intéresse seulement à leur effet global sur les variables du modèle.



# Les équations primitives

En s'astreignant à ne traiter des phénomènes d'échelle supérieures à une dizaine de km, on peut simplifier les équations en faisant l'**hypothèse d'équilibre hydrostatique**. Elle revient à **négliger l'accélération verticale** mais **non le mouvement vertical**. On aboutit alors aux **équations primitives**

Elles se mettent sous la forme **d'équations d'évolution**

pour :

- les deux composantes du **vent horizontal U et V**,
- la **température** de l'air **T**,
- l'**humidité** spécifique **q**,
- (la **pression de surface p<sub>s</sub>**).



# Les équations aux dérivées partielles

Equations pour le mouvement horizontal

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + fv - \frac{\partial \Phi}{\partial x} + F_u$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - fu - \frac{\partial \Phi}{\partial y} + F_v$$

Equation de continuité

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = - \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right]$$

Equation de la thermodynamique

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - \omega \frac{\partial T}{\partial p} + \frac{R}{C_p} \frac{T}{p} \omega + \mathcal{Q}$$

Equation de l'hydrostatique

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -R \frac{T}{p}$$

Equation de conservation de la vapeur d'eau

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - \omega \frac{\partial q}{\partial p} + \mathcal{Q}$$

Les termes  $F_u$ ,  $F_v$ ,  $\mathcal{Q}$  et  $\mathcal{Q}$  représentent les termes de frottement, d'apport de chaleur et d'humidité.



# Les différences finies

Dérivée spatiale

$$\frac{\partial X}{\partial x} ; \frac{X(x + \Delta x) - X(x - \Delta x)}{2\Delta x}$$

Dérivée temporelle

$$\frac{\partial X}{\partial t} ; \frac{X(x, t + \Delta t) - X(x, t)}{\Delta t}$$

ou bien

$$\frac{\partial X}{\partial t} ; \frac{X(x, t + \Delta t) - X(x, t - \Delta t)}{2\Delta t}$$



# Les méthodes de Galerkin

Les champs horizontaux s'expriment à l'aide d'un développement tronqué sur une base de fonctions convenablement choisies

Fonctions associées de Legendre sur la sphère

=> **méthode spectrale**

Fonctions non nulles sur un domaine réduit

=> **méthode des éléments finis**

La méthode de Galerkin consiste à effectuer une projection orthogonale sur un ensemble fini d'éléments de la base de fonctions choisie ; elle permet de calculer les dérivées spatiales avec une plus grande précision que la méthode des différences finies.



# La paramétrisation des processus physiques

- Les termes de **friction** dans l'équation du mouvement.
- Les termes de **sources ou de puits de chaleur** dans l'équation de conservation de l'énergie.
- Les termes de **sources ou de puits d'humidité** dans l'équation de conservation de la vapeur d'eau.

On cherche à déterminer **l'effet moyen** des divers processus physiques d'échelle inférieure à la maille sur les variables de grande échelle du modèle.



# Les processus physiques paramétrés

- Les échanges avec le sol ( **frottement, chaleur sensible, vapeur d'eau** ).
- Les échanges turbulents ( **dissipation de quantité de mouvement d'énergie et de vapeur d'eau** ).
- Les effets du rayonnement avec prise en compte des nuages ( **bilan radiatif en surface et dans les couches atmosphériques** ).
- Les changements de phase de la vapeur d'eau et les précipitations
- Les effets de la convection

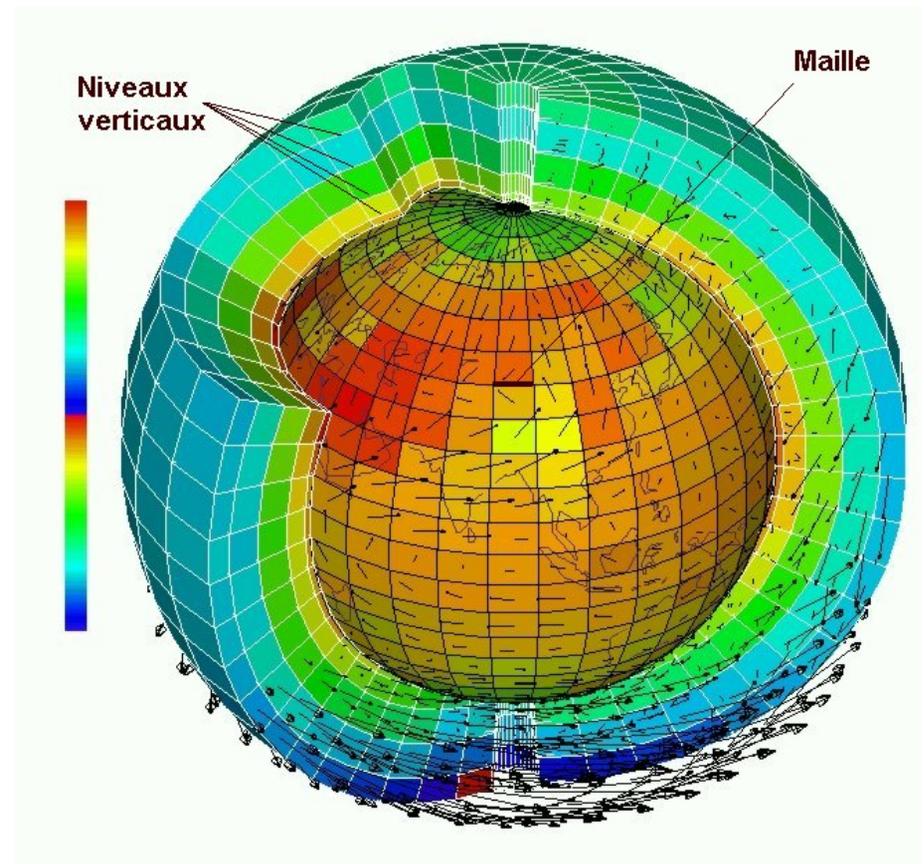


# Exemple d'un modèle global

L'atmosphère est découpée en petites boîtes élémentaires pour lesquelles sont définies  $U, V, T, q$

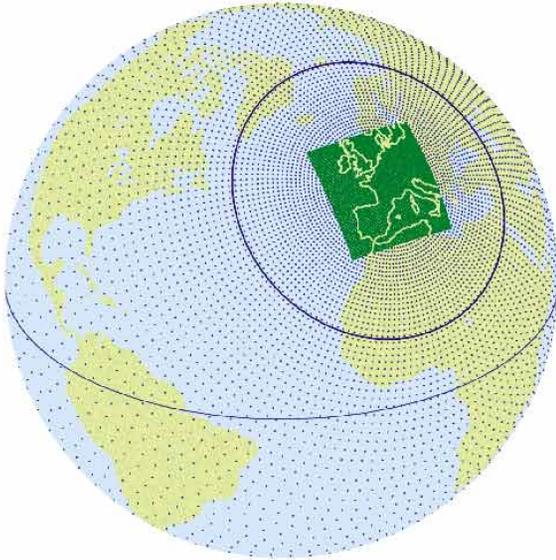
Le modèle du CEPMMT (Reading)

- Maille de 40 km
- 60 niveaux
- Prévisions jusqu'à 10 jours





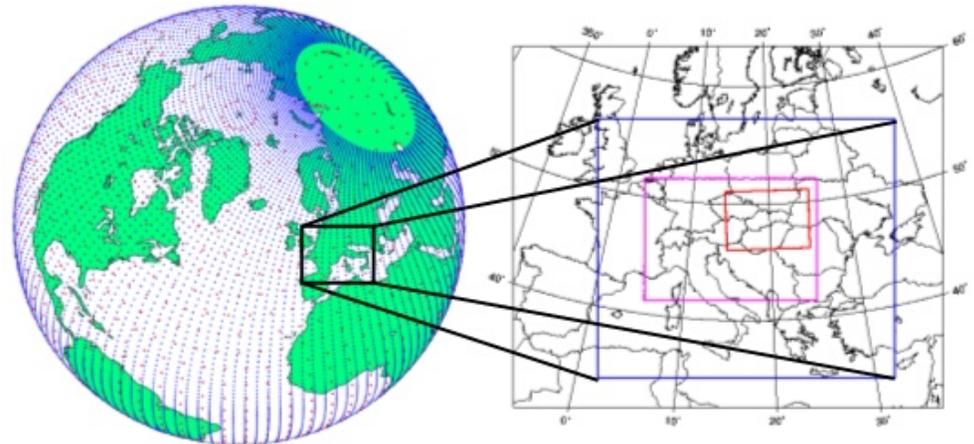
# Le système de modèles emboîtés



- La prévision à maille fine est réalisée sur un domaine limité (ALADIN France, maille 10 km)
- Les conditions aux limites sont fournies par un modèle à maille plus grande sur un domaine plus étendu (ARPEGE, maille 25 km sur la France)

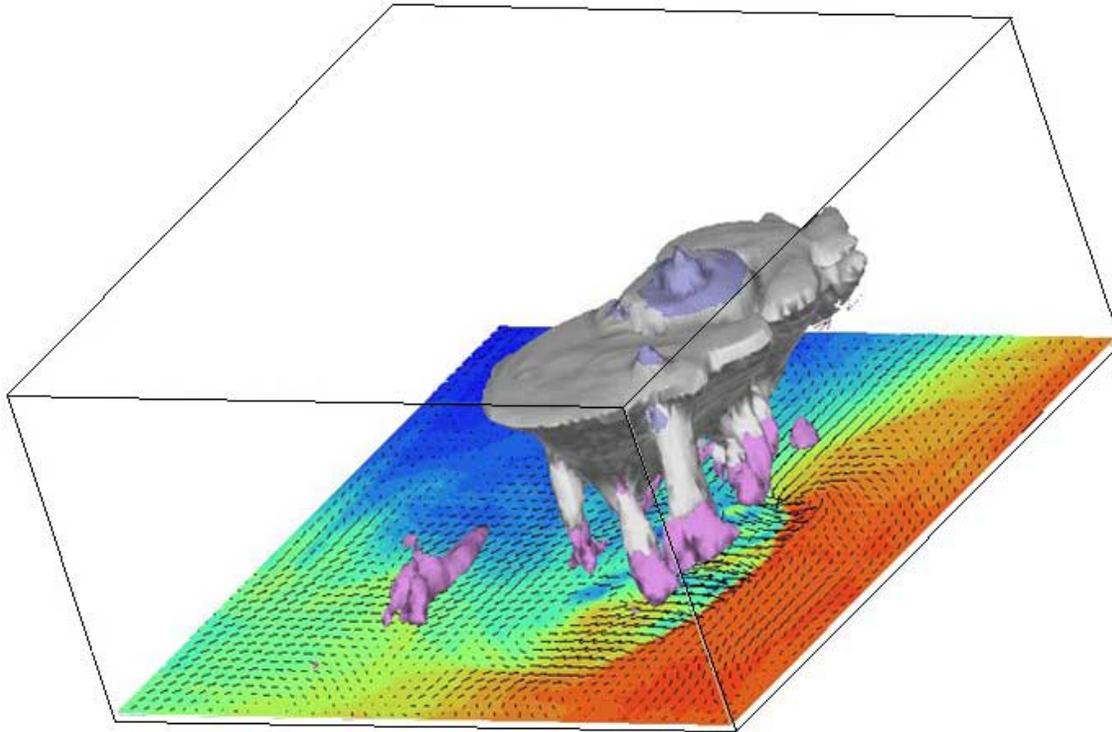
## Emboîtement multiple :

- Modèle Global ARPEGE (Météo-France) 25 km
- Modèle ALADIN (LACE) 12,5 km
- Modèle ALADIN (Slovénie) 6 km





# Modèle de mésoéchelle



**Modèle non hydrostatique AROME (Recherche):**

**Evolution d'une ligne de grain sur l'Île de France, en utilisant un modèle à maille de 2,5 km**



# Le nombre de calculs à effectuer et l'outil de calcul

$N_c$  : nb.de calculs / point de grille et pas de temps,

$N_x$  : nombre de points de grille,

$N_T$  : nombre de pas de temps.

$$N_{\text{Total}} = N_c \cdot I$$



Le calculateur FUJI VPP5000 de Météo-France : 500 Gigaflops

C'est à dire  $5 \cdot 10^{11}$  opérations en virgule flottante par seconde



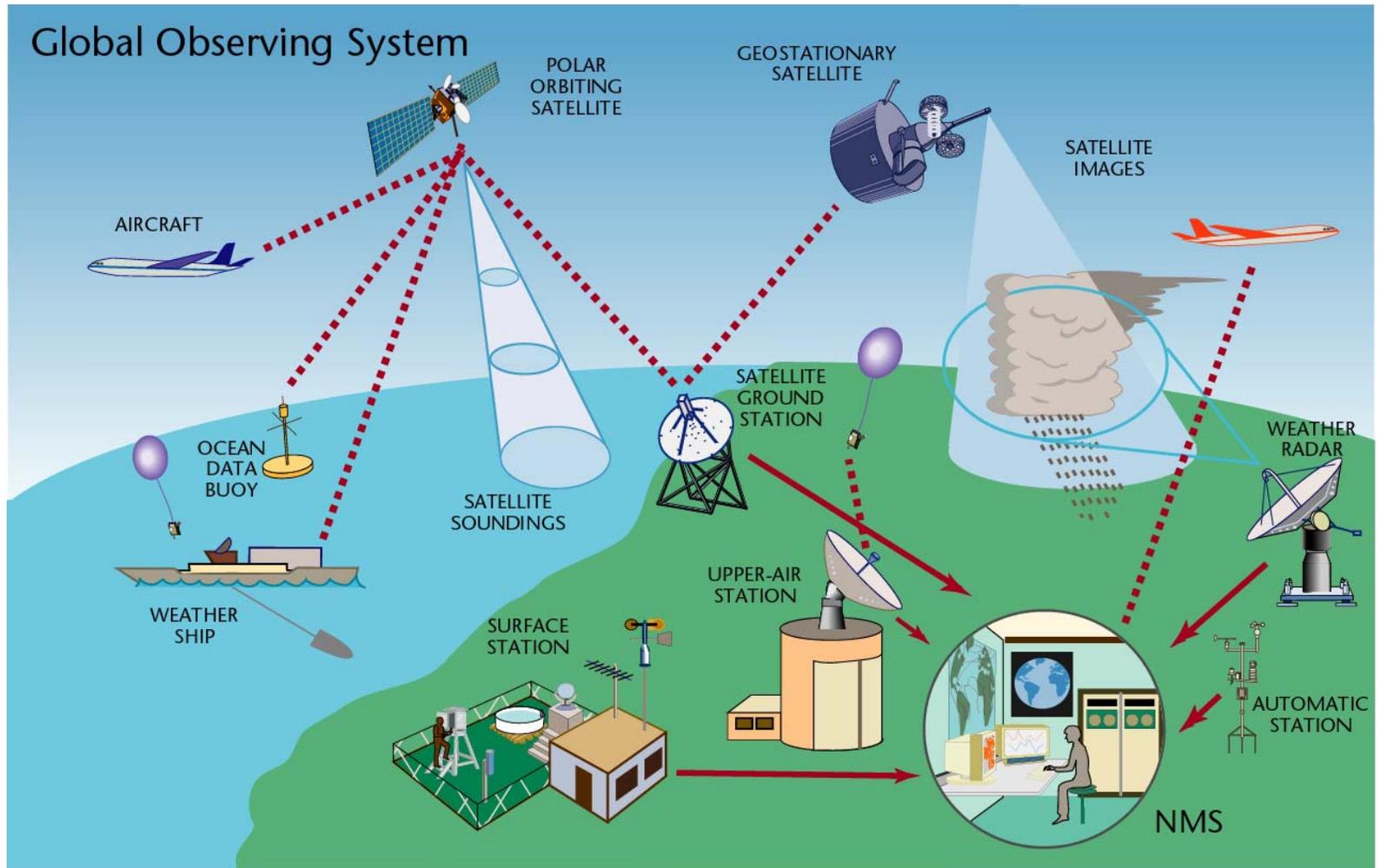
# L'interprétation des résultats sur station de travail

Une station de travail permet de visualiser des cartes des paramètres météorologiques prévus dans toutes leurs dimensions



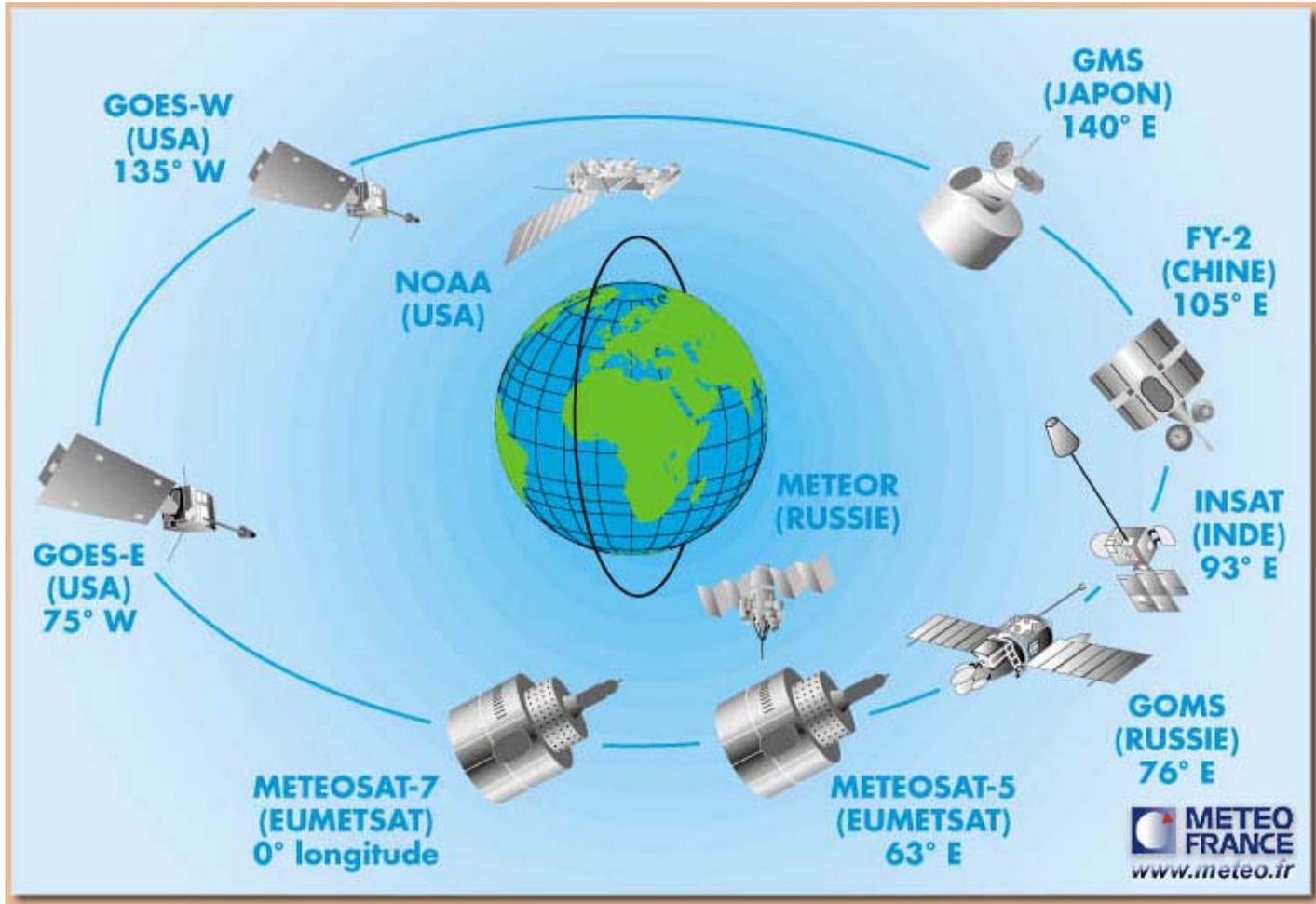


# Le système mondial d'observation supervisé par l'Organisation Météorologique Mondiale





# Le sous-système d'observation satellitaire





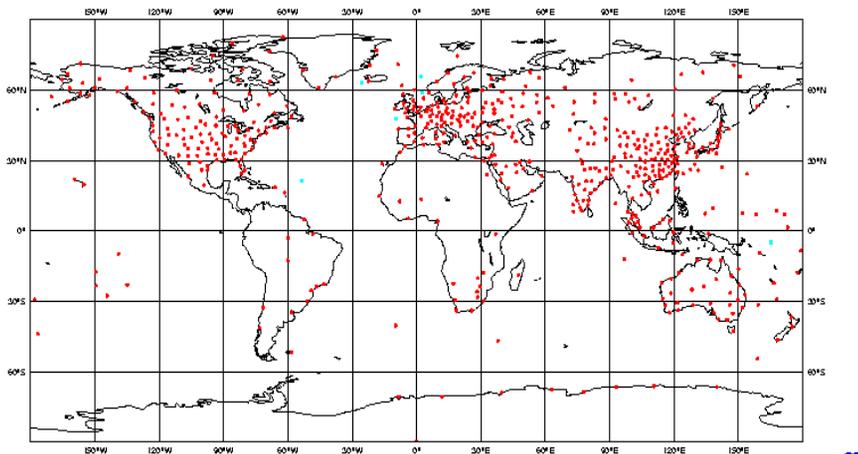
# Les points de mesure

## Réseau de radiosondages

Mesures synoptiques

Mesures directes

ECMWF Data Coverage - TEMP  
14/MAR/1999; 00 UTC  
Total number of obs = 568

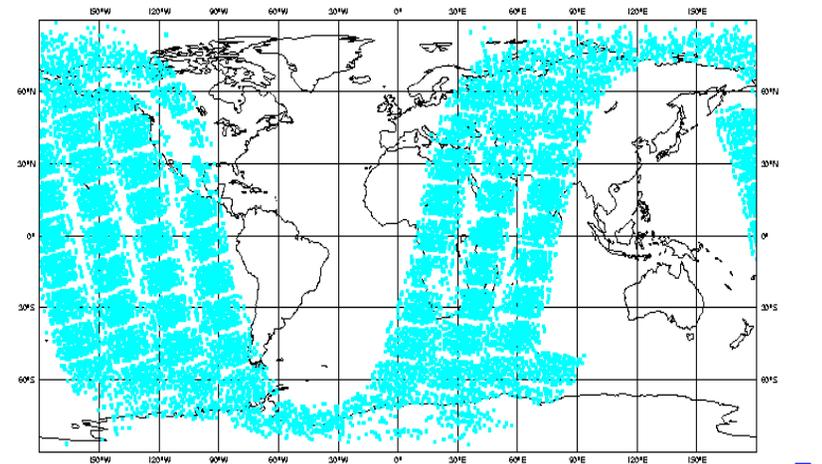


## Observations satellitaires

Mesures asynoptiques

Mesures indirectes

ECMWF Data Coverage - TOVS (120km)  
14/MAR/1999; 00 UTC  
Total number of obs = 35726





# L'analyse objective : détermination des conditions initiales

- On interpole des incréments à partir d'une **ébauche** (prévision récente)
- Les incréments aux points de grille sont **interpolés** à partir des incréments observés
- On doit connaître les valeurs observées **des variables utilisées dans le modèle**
- Toutes les valeurs doivent être ramenées à **l'instant initial** choisi.



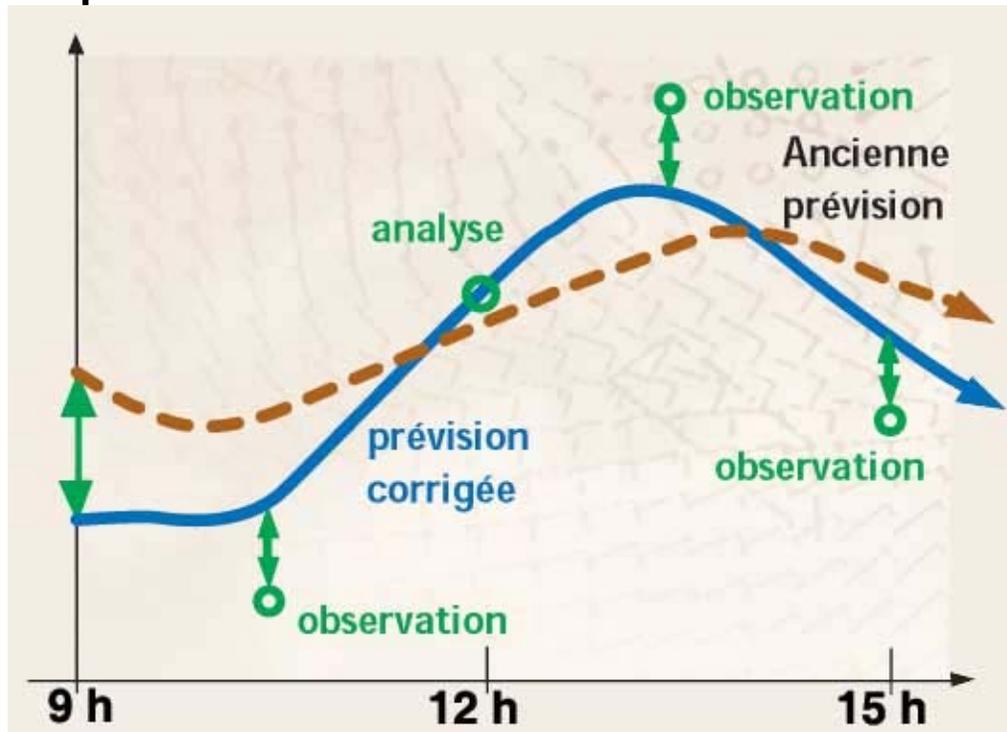
# Principe de la méthode variationnelle

- Un modèle récent fournit aux points d'observation la valeur des paramètres observés (variables du modèles ou **paramètres plus complexes comme les radiances énergétiques**).
- On cherche à déterminer l'ensemble des valeurs initiales qui permettent de minimiser l'écart entre les valeurs fournies par le modèle et les valeurs observées. On est ramené à la **minimisation d'une fonctionnelle**.
- La minimisation s'effectue par itérations successives en utilisant les méthodes du **contrôle optimal**.



# L'assimilation de données variationnelle : 4DVar

- Extension de la méthode variationnelle à 4 dimensions
- On part d'une trajectoire du modèle
- On modifie les conditions initiales (à 9 h) de façon à minimiser l'écart entre et les observations (sur la fenêtre temporelle 9 h – 15 h) sans toutefois s'écarter trop des valeurs de l'ébauche à l'instant initial (à 9h)
- On itère le processus





# La vérification des prévisions

L'erreur pour un paramètre un un point donné est la différence entre la valeur prévue et la valeur observée (ou analysée)

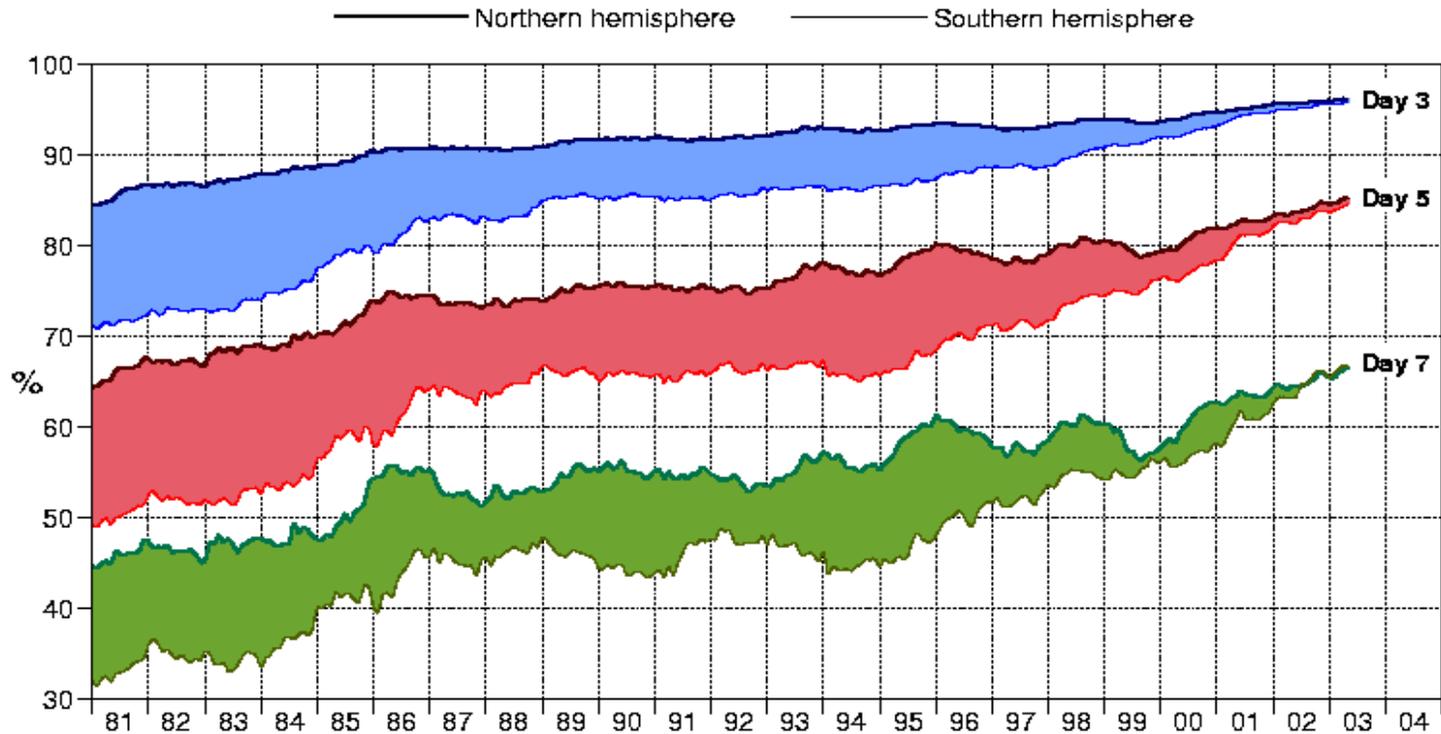
Le calcul systématique de cette erreur permet de déterminer des indicateurs de qualité :

- Coefficient de corrélation entre tendances
- Coefficient de corrélation entre anomalies
- Erreur quadratique moyenne de la prévision numérique comparée à celle d'une prévision triviale (persistance, climatologie).
- Durée de prédictibilité :  $\text{rms prévi} < \text{rms clim}$



# Evolution de la qualité au Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

Anomaly correlation of 500hPa height forecasts



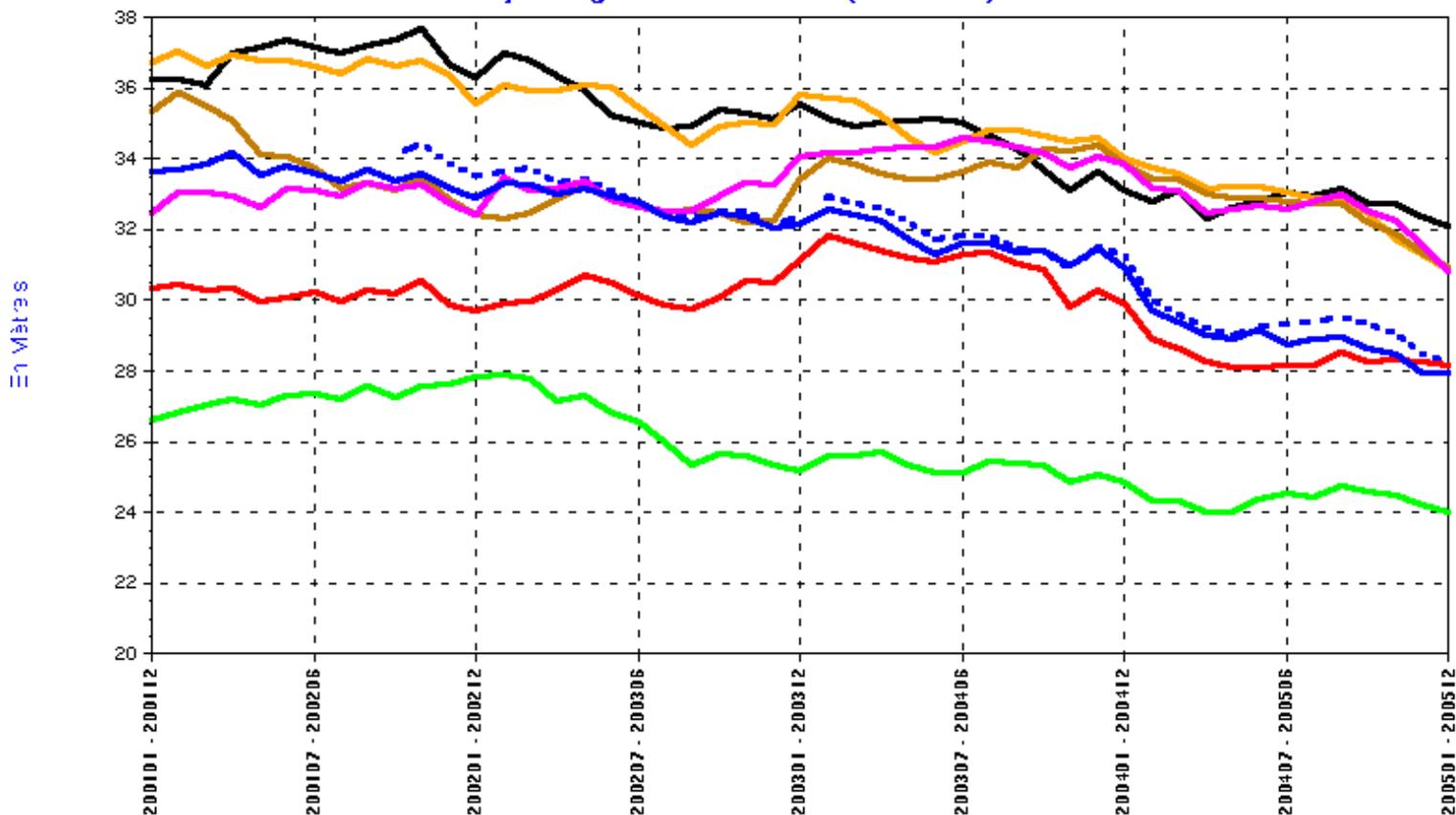


# Evolution de la qualité des prévisions

DPrévi/COMPAS  
09/01/06

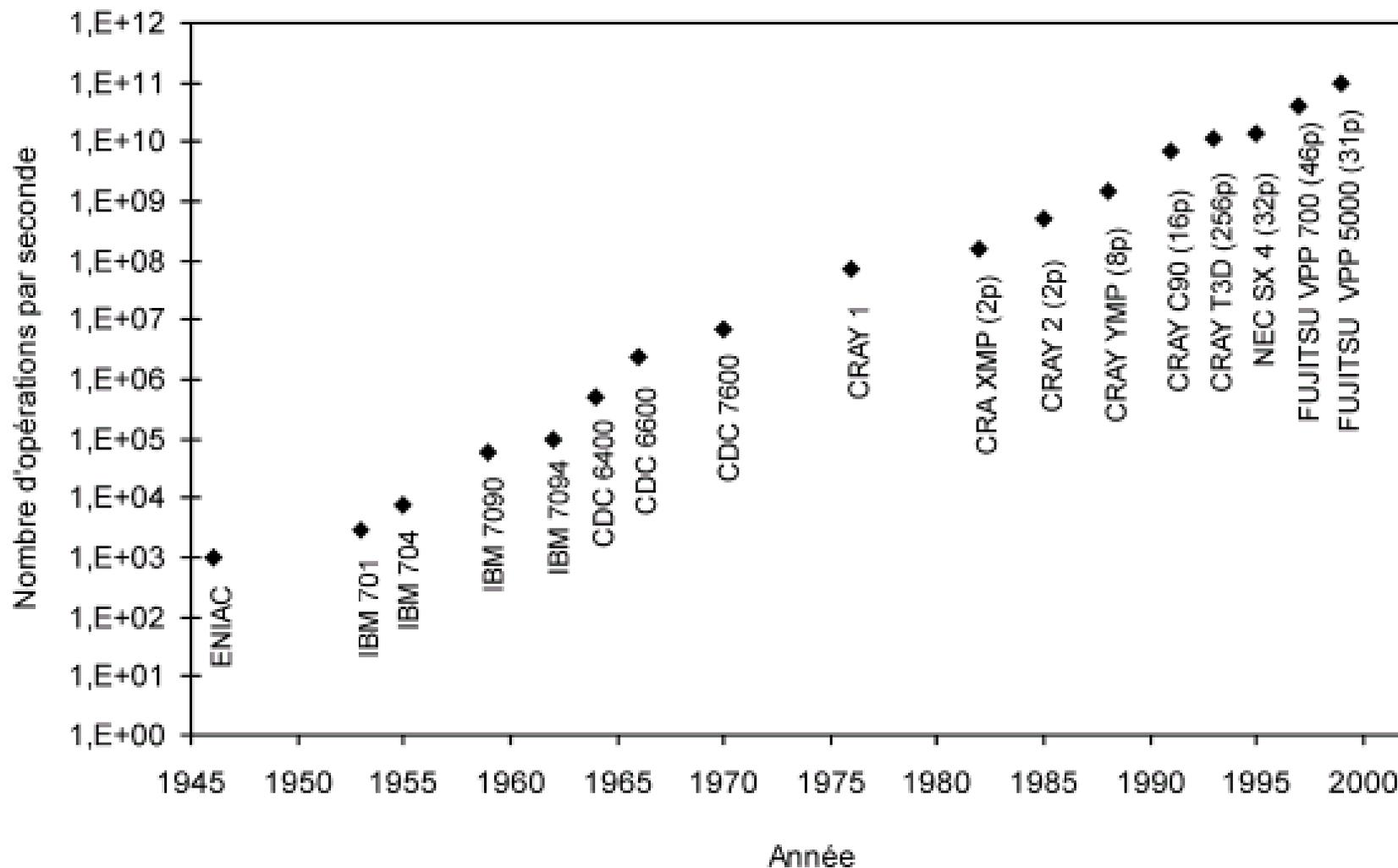
## Erreur Quadratique Moyenne de prévision à 72 heures par rapport aux radiosondages

GÉOPOTENTIEL à 500 hPa - Domaine EUROPE  
Moyenne glissante sur un an (M-5 à M+6)





# Les moyens de calcul





## Précision et incertitude

« un orage s'abattra Dimanche prochain sur La Rochelle entre 15h et 16h »

→ **Irréaliste, on ne peut avoir aucune confiance dans cette prévision**

« un front pluvieux passera Dimanche après-midi sur la région Poitou-Charentes »

→ **réaliste, on peut avoir une confiance normale dans cette prévision**



# Principe de la prévision d'ensemble

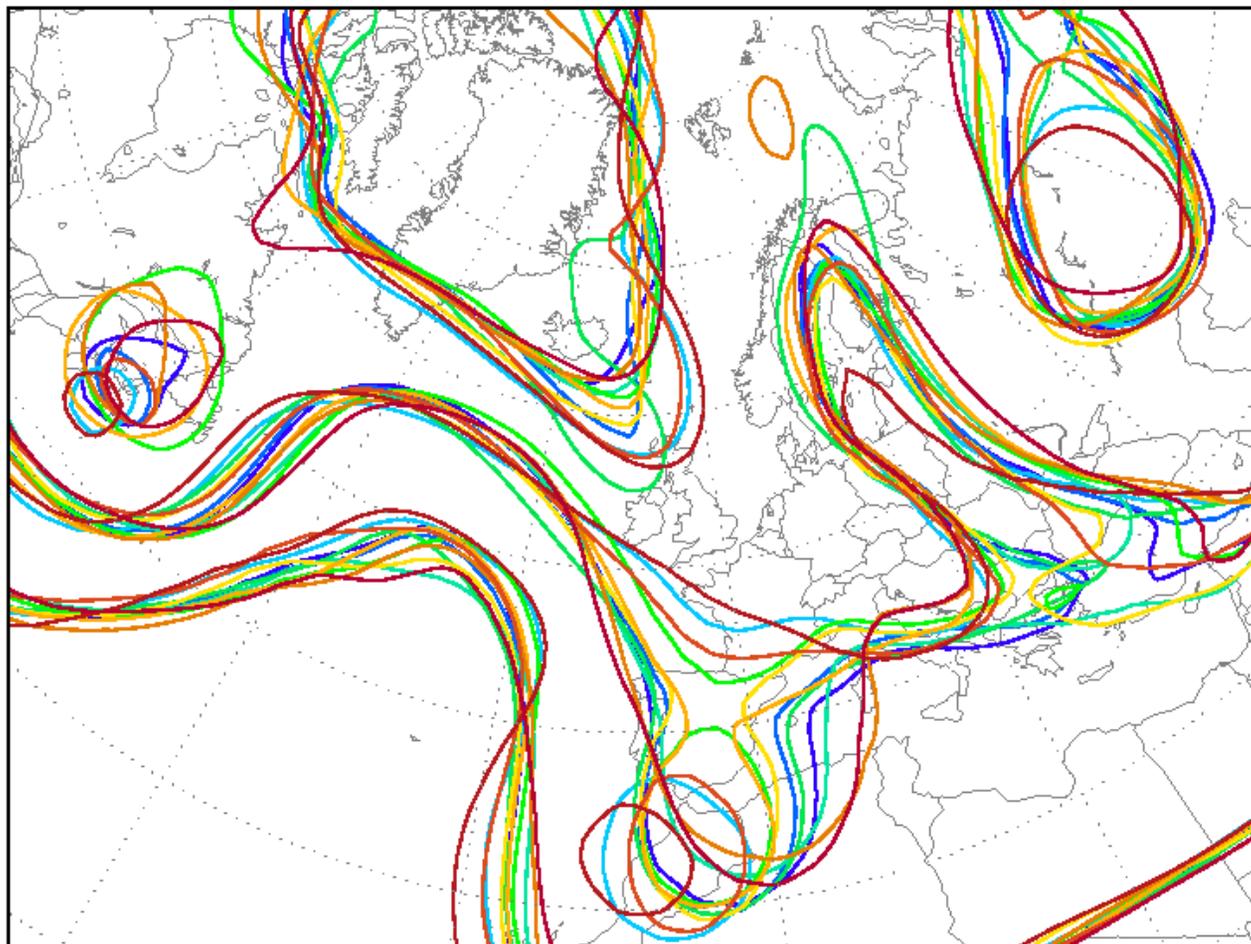
- Causes d'incertitude : état initial, modèle
- On détermine un **ensemble d'états initiaux** compatibles avec les observations, susceptibles de donner le plus de dispersion dans les trajectoires
- On peut utiliser **plusieurs modèles** différant par certains de leurs composants (paramétrisations physiques par exemple)
- On réalise ainsi **N prévisions différentes**
- La prévision ensemble fournit une prévision de la **densité de probabilité** pour chacune des variables



# Dispersion des prévisions

Ini: Sat,14JAN2006 00Z Val: Tue,17JAN2006 00Z

500 hPa Geopotential (Isohypsen: 516 552 576 gpdam)

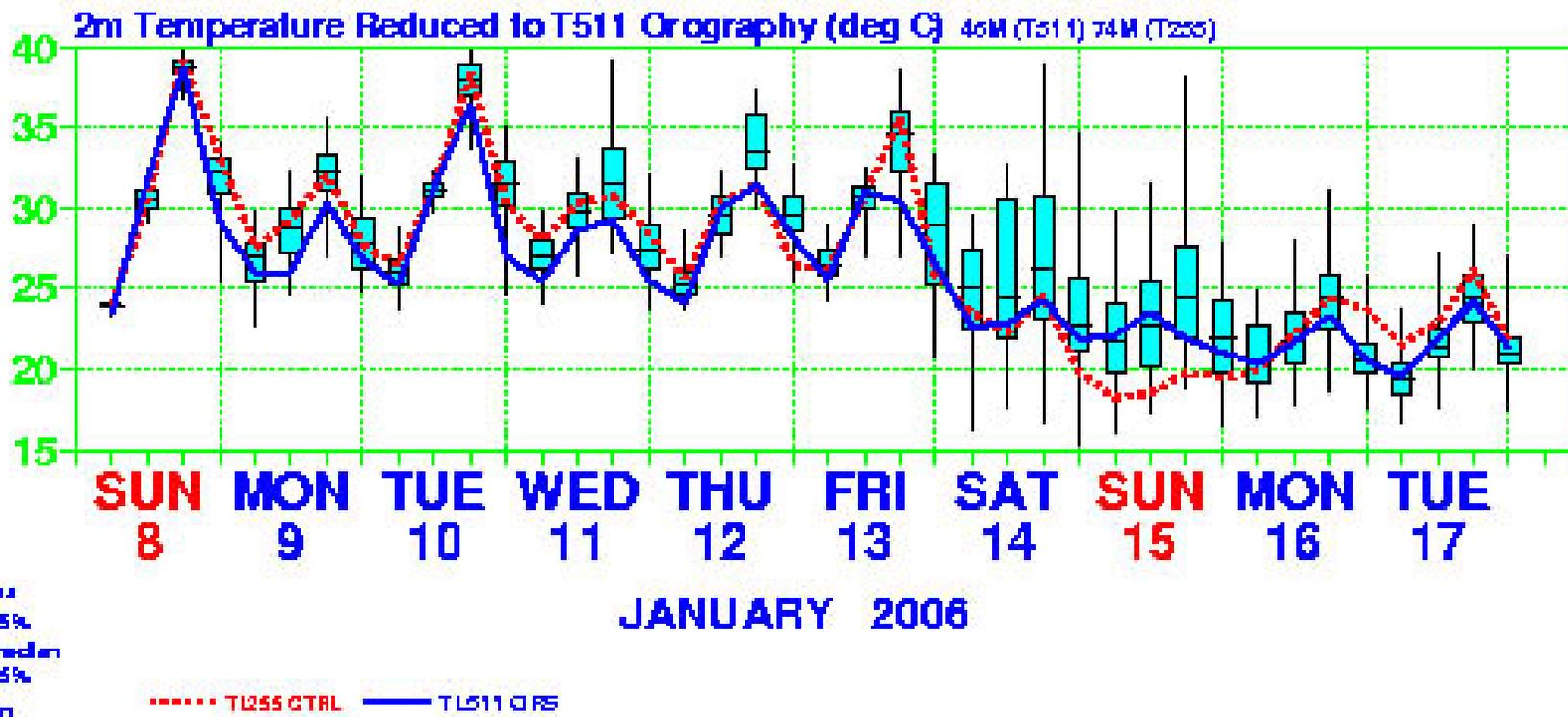


Daten: 00z-Ensembles des GFS von NCEP  
(C) Wetterzentrale  
[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)



# Prévision de température probabiliste

Rio Grande - Brésil





# Perspectives

- **DONNEES**
  - Développement de la **téledétection**
  - Intégration des données **radar Doppler** (petite échelle)
  - **Ciblage** des observations
- **MODELES**
  - Prévision à **petite échelle** (maille fine, modèles non hydrostatiques)
  - Généralisation de la **prévision d'ensemble** (probabilités)



# Bibliographie

## Revue **La Météorologie**

J. Coiffier : Un demi-siècle de prévision numérique du temps, N° 30 (version pdf)

T. N. Palmer, J. Barkmeijer, R. Buizza, E. Klinker et D. Richardson : L'avenir de la prévision d'ensemble, N° 36 (version pdf)

J. Pailleux : Les besoins en observations pour la prévision numérique du temps, N° 39

## Cours et manuels

J. Coiffier : Elements de prévision numérique du temps, Cours et manuels n° 12, Météo-France - 1997 - 84 p. (réédition 2005)

## Sites internet

[www.meteo.fr](http://www.meteo.fr)

[www.cnrm.meteo.fr](http://www.cnrm.meteo.fr)

[www.smf.asso.fr](http://www.smf.asso.fr)