

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Historique

#### ❖ Vilhelm Bjerknes (1904)



Vilhelm Bjerknes (1862-1951)  
Photo Météo-France

« 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. »

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Historique

#### ❖ Lewis Fry Richardson

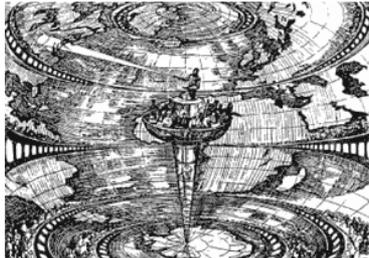
Entre 1916 et 1922 tentative de résolution des équations de prévision du temps : prévision à 6h d'échéance

« 64000 calculateurs seraient nécessaires pour prendre de vitesse l'évolution du temps sur l'ensemble du globe »

Usine à prévisions météorologiques



Lewis Fry Richardson  
(1881-1953)  
Photo National  
Meteorological Library,  
Lafayette



Alf Lannerbaeck, 1984



François Schuiten, 2000

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Historique

- ❖ Courant, Friedrichs et Lewy, 1928  
Contraintes à respecter lors de la numérisation
- ❖ Carl-Gustav Rossby, 1939  
Équation de conservation du tourbillon absolu : déplacement observé des centres d'action atmosphériques
- ❖ John von Neumann, 1946  
1er ordinateur électronique : Eniac (Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer)
- ❖ Jule Charney, 1948  
Approximation quasi géostrophique (Rossby)



Jule Charney  
(1917-1981)

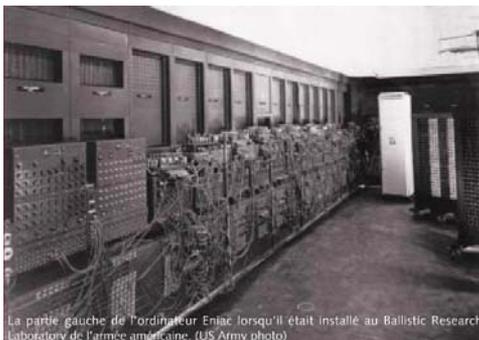


John von Neumann  
(1903-1957)

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Historique

- ❖ Charney, Fjörtoft, von Neumann, 1950  
1ère prévision numérique du temps (équation de conservation du tourbillon absolu) sur Eniac => 3 prévisions à 24 heures de l'écoulement à grande échelle sur la surface 500 hPa encourageantes en 33 jours et 33 nuits ininterrompues  
Félicitations de Richardson



La partie gauche de l'ordinateur Eniac lorsqu'il était installé au Ballistic Research Laboratory de l'armée américaine. (US Army photo)

42 armoires bourrées de près de 6000 relais, 18000 tubes électroniques, ... Une multitude d'interrupteurs répartis sur divers panneaux de contrôle doivent être manipulés

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Le système d'équations à résoudre

- ❖ Equation de conservation de la masse ou équation de continuité

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

- ❖ Equation de conservation de la chaleur

$$\rho.c.v. \frac{dT}{dt} = -P \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu_{\theta} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

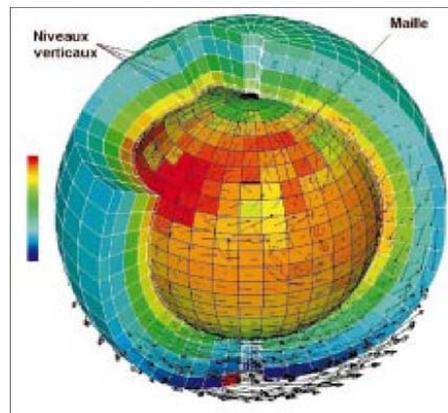
- ❖ Equations du mouvement

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{du}{dt} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)}_{\text{Viscosité}} - \underbrace{2\rho\omega(w\cos\phi - v\sin\phi)}_{\text{Coriolis}} \\ \rho \frac{dv}{dt} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial y}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)}_{\text{Viscosité}} - \underbrace{2\rho\omega u \sin\phi}_{\text{Coriolis}} \\ \rho \frac{dw}{dt} = \underbrace{\rho g}_{\text{Pesanteur}} - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial z}}_{\text{Pression}} + \underbrace{\mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)}_{\text{Viscosité}} - \underbrace{2\rho\omega u \cos\phi}_{\text{Coriolis}} \end{array} \right.$$

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La simulation numérique : les principales étapes

- ❖ division de l'atmosphère en un grand nombre de boîtes élémentaires
- ❖ état initial fourni par les données observées (ou prévision)
- ❖ numérisation des équations mathématiques et choix des approximations
- ❖ après calcul : nouvelles valeurs des différentes variables dans chacune des boîtes



Laurent Fairhead, LMD (CNRS)

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La simulation numérique : rapidité et précision

- ❖ Richardson : course entre processus de calcul et évolution de l'atmosphère
- caractéristiques du modèle de prévision
  - Nombre total de variables à traiter = nb de grandeurs x nb de mailles (horizontales et verticales) ( $N_v$ )
  - Nombre de calculs à effectuer par variable en un pas de temps ( $dt$ ) (dépend du degré de simplification des équations) ( $N_c$ )
  - Nombre de pas de temps nécessaires pour atteindre une échéance ( $N_t$ ) ( $dt=f(dx)$ )
- vitesse de calculateur ( $R$ )
- ❖ Temps nécessaire pour une prévision :
  - $T = N_v \cdot N_c \cdot N_t / R$
  - Ex: 1998, prévision à 24h (ARPEGE) ( $600 \times 300$ )pts x 31nv x 4var + 600 x 300 x 1var
  - $N_c = 7 \cdot 10^3$ ,  $N_t = 96$ ,  $R = 20$ Gflops
  - ➔  $T \sim 15$  min

Longueur	Temps		Echelle climatologique		Echelle planétaire et synoptique		Météo-locale		Météo-ville	
	L	T	1 mois	1 jour	1 semaine	1 jour	1 heure	1 minute	1 s	1 y
Méso-météo	10 000 km		Chaleur	Orages	Orages					
Méso-météo	2 000 km		Précipitations	Orages	Orages					
Méso-météo	300 km			Orages	Orages					
Méso-météo	20 km				Orages	Orages				
Méso-météo	2 km					Orages	Orages			
Méso-météo	200 m						Orages	Orages		
Méso-météo	20 m							Orages	Orages	
Méso-météo									Orages	Orages

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

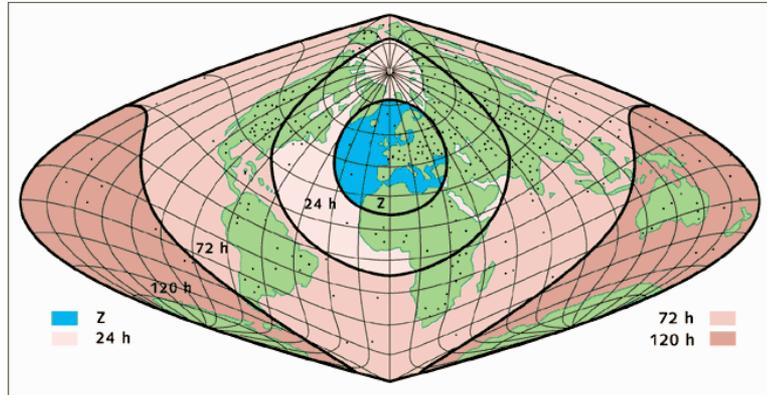
### ◆ La simulation numérique : des modèles simplifiés

- ❖ Les équations filtrées
  - Approximation quasi-géostrophique : relation entre pression et vent indépendante du temps
  - Ondes de Rossby
  - Pas de temps grand
  - 1955 : modèles à 3 niveaux utilisés ➔ 70's
  - Amélioration des performances de calculateurs : extension du domaine d'étude et augmentation de la résolution
- ❖ Les équations primitives
  - Équations générales en équilibre hydrostatique (les forces de pression en équilibre avec les forces de gravité: pas ou peu de mouvements verticaux)
  - Ondes d'inertie-gravité
  - Pas de temps ~6 fois plus faible
  - 1966 : modèle à 6 niveaux verticaux
  - Problèmes liés à l'initialisation

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La simulation numérique

#### ❖ Traitement planétaire



Répartition mondiale des stations de radiosondage et indication des régions sur lesquelles des observations sont nécessaires pour réaliser des prévisions à échéance de 1, 3 et 5 jours sur la zone centrale Z. (Document CEPMMT)

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La simulation numérique : les modèles spectraux

#### ❖ Les modèles en points de grille :

Méthode des différences finies

#### ❖ Les modèles spectraux :

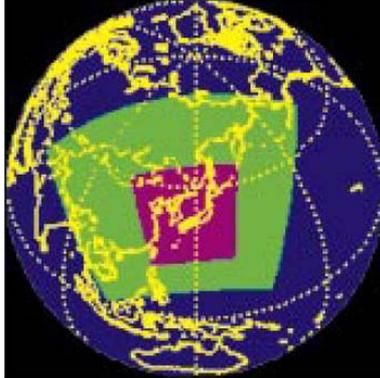
Décomposition des champs sur la sphère sur une base de fonctions orthonormées

- Meilleure évaluation de la vitesse de déplacement de certaines ondes
- Coût élevé des coef de la décomposition des termes non linéaires
- Algorithme de transformation de Fourier discrète rapide a rendu cette méthode compétitive
- La plupart des modèles planétaires dans les années 80

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La simulation numérique : les modèles à aire limitée

- ❖ Échéances courtes (1 ou 2 jours)
  - Domaine restreint avec résolution plus fine
  - Simulation de mouvements de petite échelle
  - Données aux limites fournies par les modèles planétaires → modèles emboîtés



Les trois modèles utilisés pour la prévision opérationnelle par l'Agence Météorologique Japonaise.  
 En bleu, le modèle planétaire  
 En vert, le modèle Asie  
 En mauve, le modèle Japon  
 © Japan Meteorological Agency

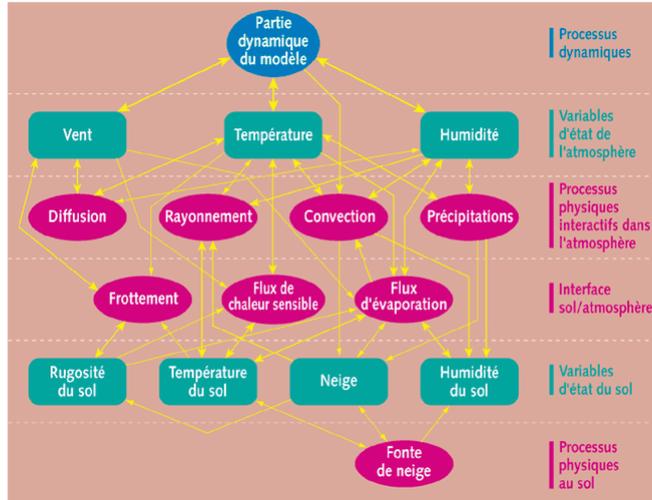
## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La simulation numérique : les modèles non-hydrostatiques

- ❖ équations non-hydrostatiques : phénomènes à l'échelle spatiale de l'ordre du km
  - Pas de temps très faible → difficultés à utiliser en mode opérationnel
  - Modèles très utilisés en recherche pour l'étude des processus
  - Futurs modèles opérationnels (2008 AROME, Météo-France)

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Les processus physiques



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

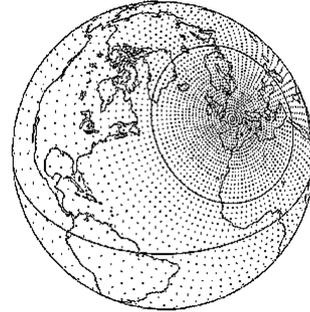
### ◆ En Europe : CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme)

- ❖ organisation internationale financée par 25 pays européens  
 Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Norvège, Portugal, Suisse, Finlande, Norvège, Suède, Turquie et Angleterre + Croatie, République Tchèque, Islande, Hongrie, Roumanie, Slovaquie, Serbie et Montenegro
- ❖ Les supers calculateurs :  
 1977 : Cray 1-A : 50 MegaFlops  
 Aujourd'hui : 2 clusters IBM ~ 20000 Cray
- ❖ modèle IFS (Integrated Forecast System)  
 Modèle global et spectral  
 Résolution horizontale : 50 km  
 Niveaux verticaux : 31

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

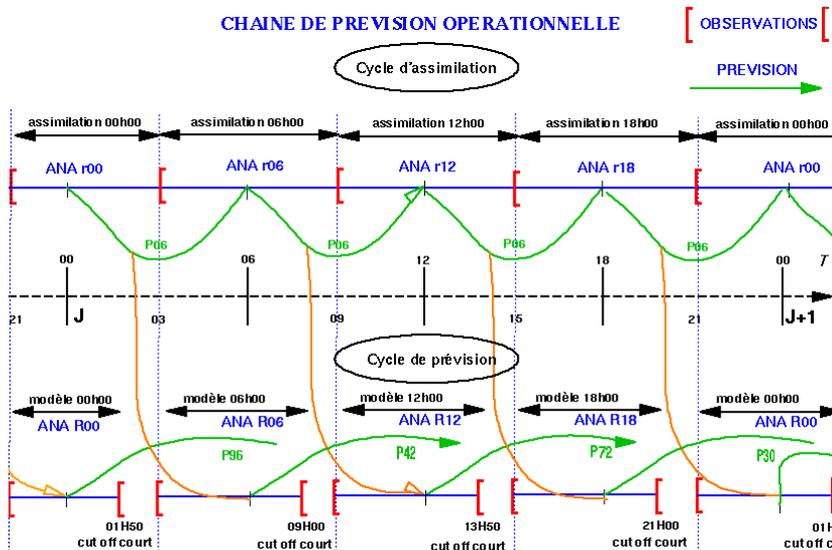
### ◆ En France : Météo-France

- ❖ Le super ordinateur
  - Fujitsu VPP 7000
- ❖ Le modèle ARPEGE
  - (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle)
  - Modèle global et spectral, à mailles variables centré sur la France
  - Résolution horizontale : France 20 km  
antipodes 250 km
  - Niveaux verticaux : 41
- ❖ Le modèle ALADIN
  - (Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement International)
  - Modèle à aire limitée
  - Résolution horizontale : 9.9 km
  - Utilisé aussi par la Belgique, le Maroc, pays Europe de l'est



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La prévision opérationnelle en France



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Les limites de la prévision déterministe

- ❖ prévisibilité
  - Échéance
  - Conditions initiales
  - Modèles imparfaits

### ◆ La prévision d'ensemble

- ❖ état initial modifié par de petites perturbations correspondantes aux incertitudes sur notre connaissance de l'atmosphère
- ❖ modifications des équations pour tenir compte de l'incertitude sur leur représentation des phénomènes physiques réels
- ❖ ensemble de prévisions rangées en différentes classes
- indice de confiance de la prévision

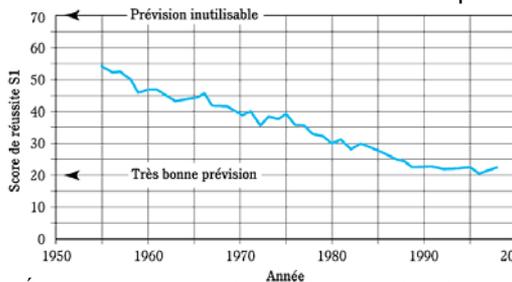
## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ La qualité des prévisions

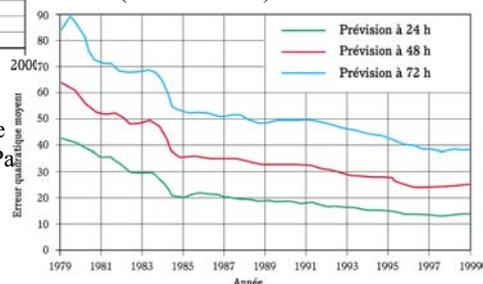
- ❖ Les scores ou calculs d'erreurs

Erreur quadratique moyenne sur un champ particulier

Coefficient de corrélation spatio-temporelle



Evolution de la qualité des prévisions sur l'Europe et l'Atlantique Nord fournies par les modèles opérationnels français. Erreur quadratique moyenne glissante sur 12 mois de la prévision du géopotential à 500hPa (Météo-France)



Évolution de la qualité des prévisions réalisées aux EU. Erreur quadratique moyenne normalisée calculée sur le champs de géopotentiels à 500 hPa à 36h d'échéance sur l'Amérique du Nord. (NCEP)

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Les cartes synoptiques

#### ❖ Le champ de pression

**A** : anticyclone (système d'isobares fermées dont la pression croît vers l'intérieur)

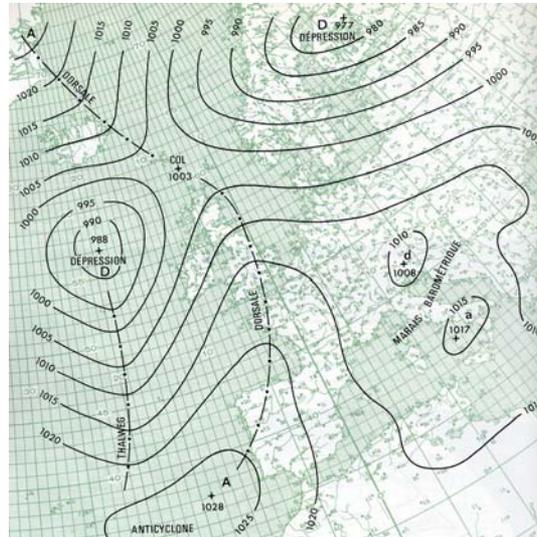
**D** : dépression : le contraire

**dorsale** : excroissance des hautes pressions

**thalweg** : le contraire

**col** : région située entre 2 A ou dorsales et 2 D ou thalwegs

**marais barométrique** : région de la carte où les isobares sont espacées et mal organisées



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ L'analyse en surface



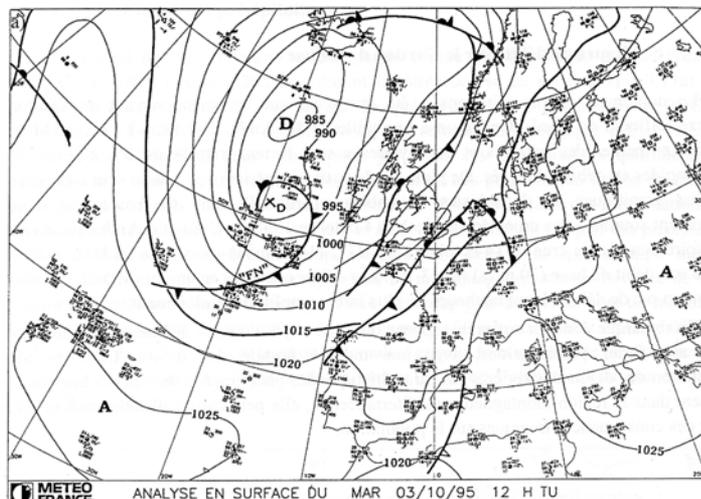
front chaud



front froid



occlusion

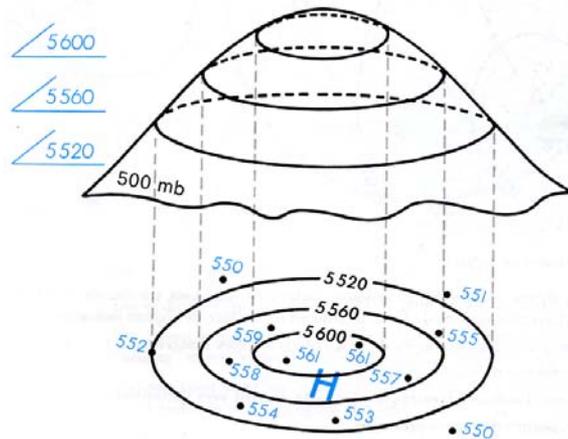


## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ L'analyse en altitude : géopotentiels

En altitude, on se place sur une surface isobare (généralement, à 500hPa), et on place les isohypses : c'est à dire les lignes d'égale altitude (ou encore lignes de niveau).

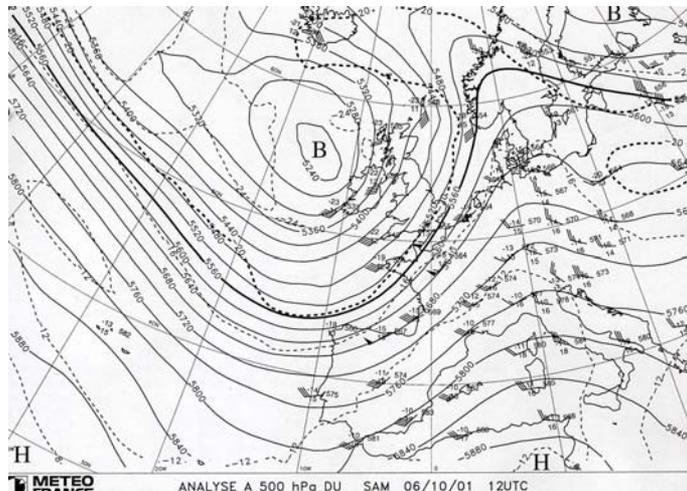
Les bosses (H) correspondent aux anticyclones, les creux (B) aux dépressions.



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

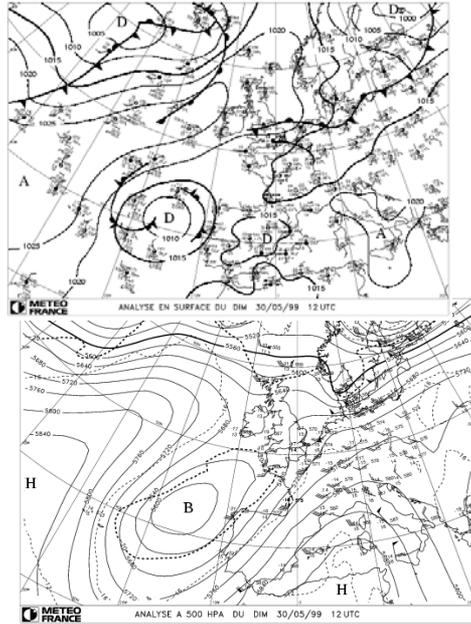
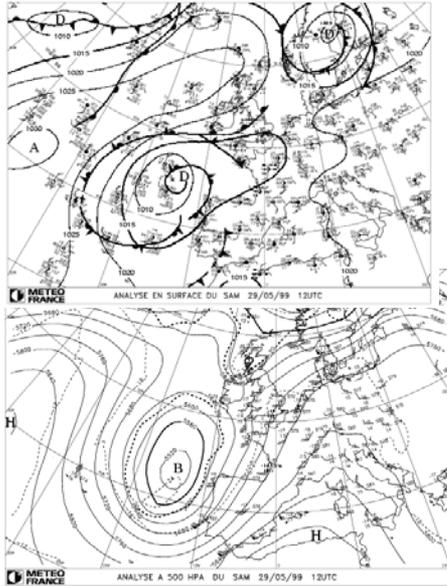
### ◆ L'analyse en altitude

- ❖ Sur les isohypses (traits pleins), les isothermes sont superposées (pointillés) et le vent est aussi indiqué



# LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

## ◆ Le cas du 30 mai 1999

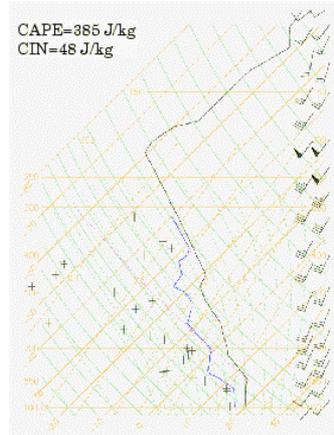
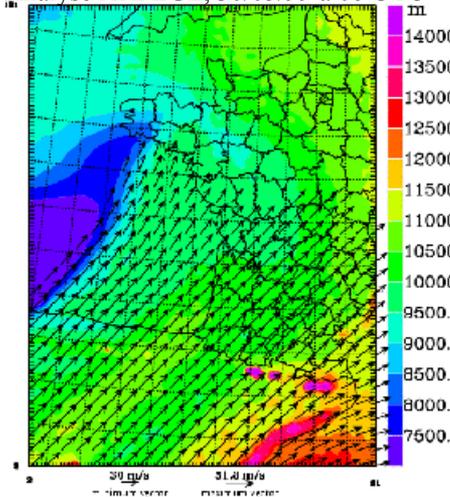


# LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

## ◆ Le cas du 30 mai 1999

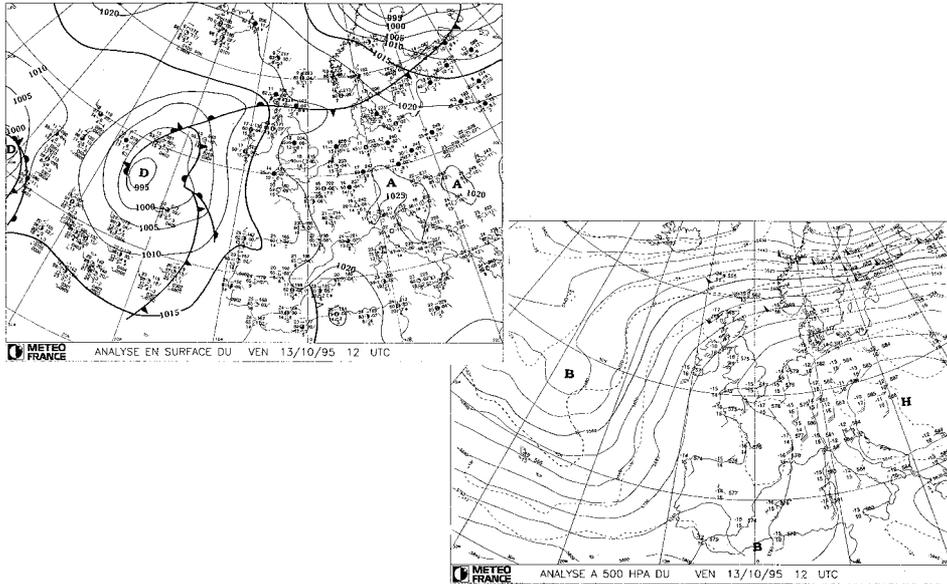
Altitude de la surface du tourbillon potentiel égal à 1.5 PVU et vent (>30m/s).

Analyse ARPEGE, 30/05/99 à 06 UTC



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

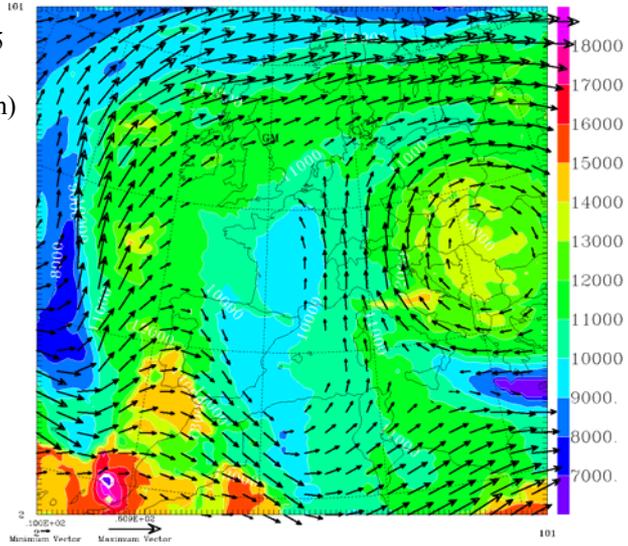
### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995 Ricard (2002)

L'analyse en surface de 12 UTC, le 13 octobre 1995 montre que les centres d'actions sont assez éloignés de la France. En effet, en surface, une dépression est située sur l'Atlantique Nord bien au large de la France et un anticyclone est centré sur l'Europe Centrale; les conditions sont anticycloniques sur une bonne partie de la France, le champ d'isobares est assez lâche. Le haut géopotential H, situé à l'est de la France, induit un flux de sud en altitude sur la France. Pour la situation convective, il n'y a donc pas de net forçage synoptique. Cependant, on note la présence d'un thalweg de courte longueur d'onde (noté B) sur la Méditerranée au niveau des côtes algériennes associé à un front froid d'altitude et marqué par une baisse de l'altitude de la tropopause dynamique (figure suivante). Cette baisse de pression en altitude favorise l'instabilité sur la Méditerranée. Cette masse d'air instable canalisée entre le bas géopotential B et le haut géopotential H remonte dans un flux de sud, vers le sud-est de la France. La plage d'air froid en altitude sur la France est propice également aux développements convectifs.

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

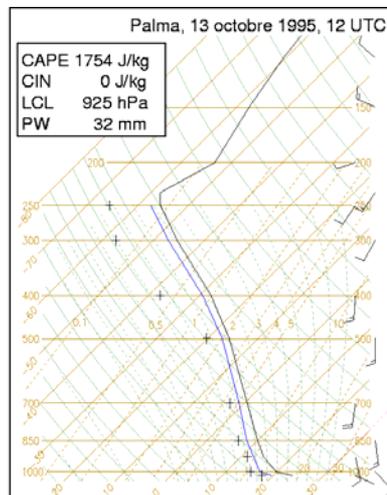
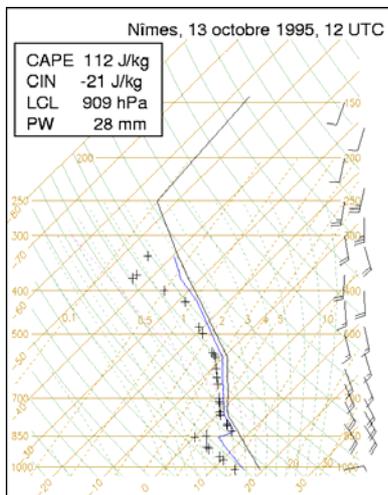
### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995

Analyse ARPEGE 13/10/95  
à 12 UTC  
Géopotential (couleurs en m)  
vent > 10m/s (flèches)  
sur la surface 1.5 PVU



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

---

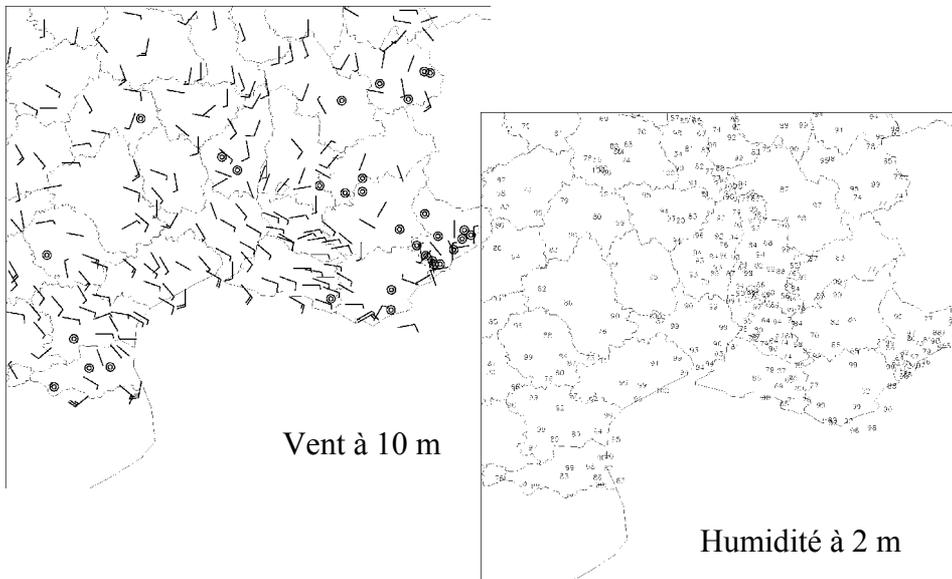
### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995

Les sondages de Nîmes et Palma à 12UTC le 13 octobre sont très humides avec un total d'au précipitable respectivement de 28 et 32 mm. Ces sondages traduisent une certaine instabilité, le sondage de Palma étant beaucoup plus instable que celui de Nîmes. Les niveaux de condensation sont bas. Le sondage de Palma peut-être considéré comme représentatif de l'atmosphère en amont de la convection.

## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

---

### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995



## LA PREVISION NUMERIQUE METEOROLOGIQUE

---

### ◆ Le cas du 13-14 octobre 1995

Le flux de sud-sud-est dans les basses couches amène sur le sud-est de la France de l'air chaud et humide en provenance de la Méditerranée. Cette configuration d'air froid en altitude avec un flux d'air chaud et humide dans les basses couches est propice au déclenchement de système convectif de meso-échelle. Juste avant le développement du système convectif, le vent à 10m a une orientation sud-est sur le Gard et les Bouches-du-Rhône, et une composante plus sud sur l'Hérault. Le vent a une intensité de 5-10 kt (nœuds) à l'intérieur des terres et plus de 15 kt sur les côtes.