

La modélisation numérique de l'océan

Anne Marie Treguier (CNRS, Laboratoire de physique des océans,
Laboratoire CNRS-Ifremer-IRD-UBO, Brest)

C'est quoi?

Un peu d'histoire, en commençant par la prévision météo...

... pour arriver à la prévision de l'océan!

Naissance de la prévision de l'océan en France: Réunion de la Chapelle Aubareil juin 1995



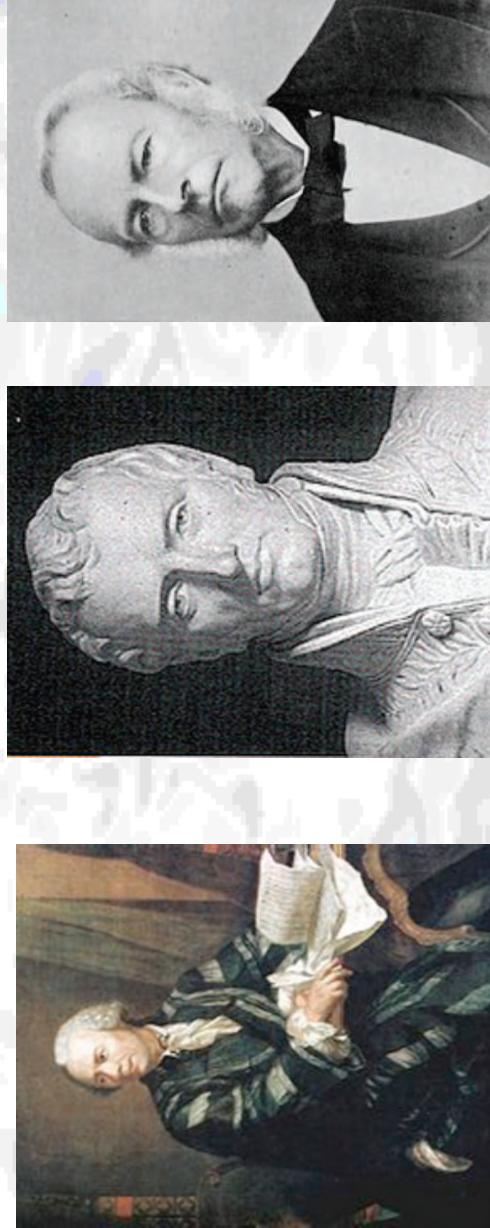
Tout commence par les
lois de la physique



$$F = m \gamma$$
$$\gamma = dv/dt = -g$$

Isaac Newton, 1686

Équations pour une particule d'eau

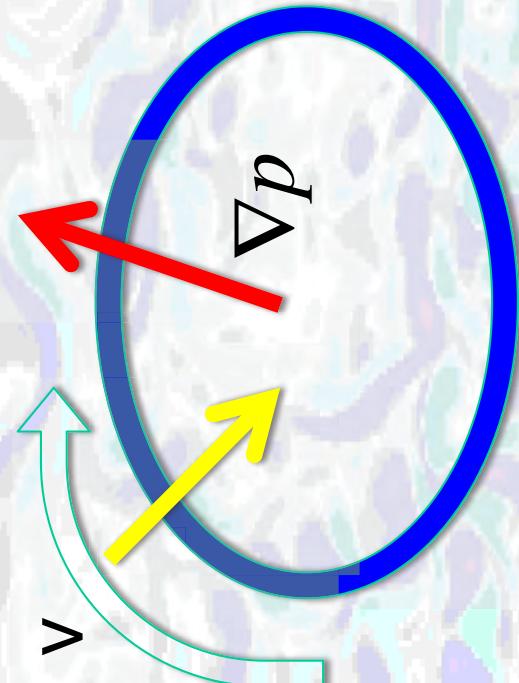
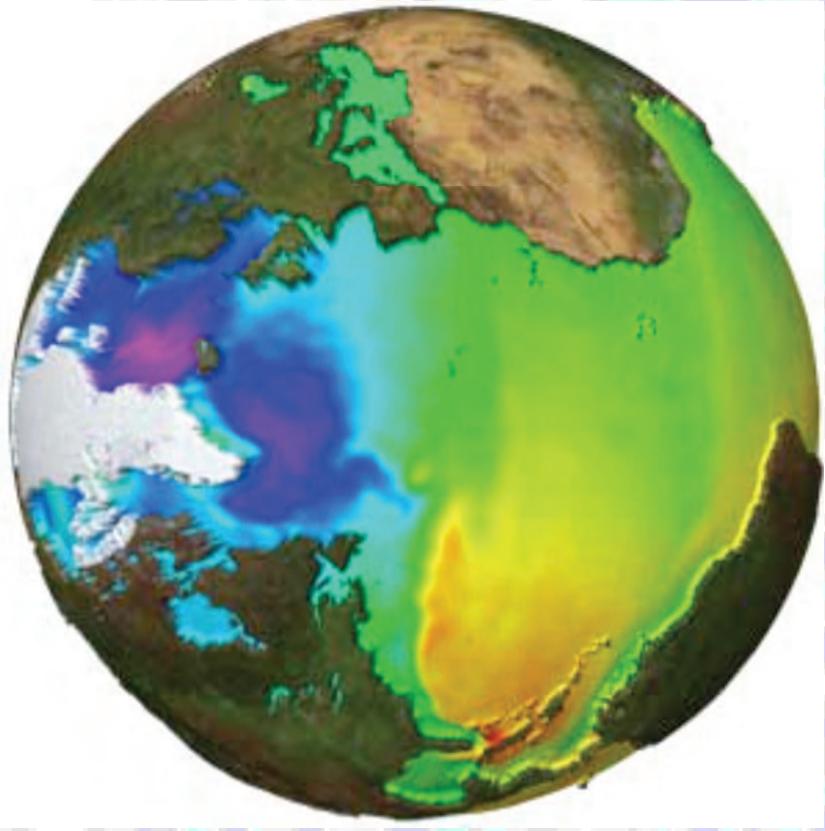


L'eau et l'air sont des fluides: équations des fluides,
Euler (1757), Navier and Stockes (1822).

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v \right) = \mu \nabla^2 v - \nabla p + F$$

La terre tourne!

Gaspar Gustave Coriolis, 1835.



Hauteur de surface de la mer (AVISO, CLS)

Les équations sont connues...

Cela suffit-il à prévoir l'océan (ou le temps?)

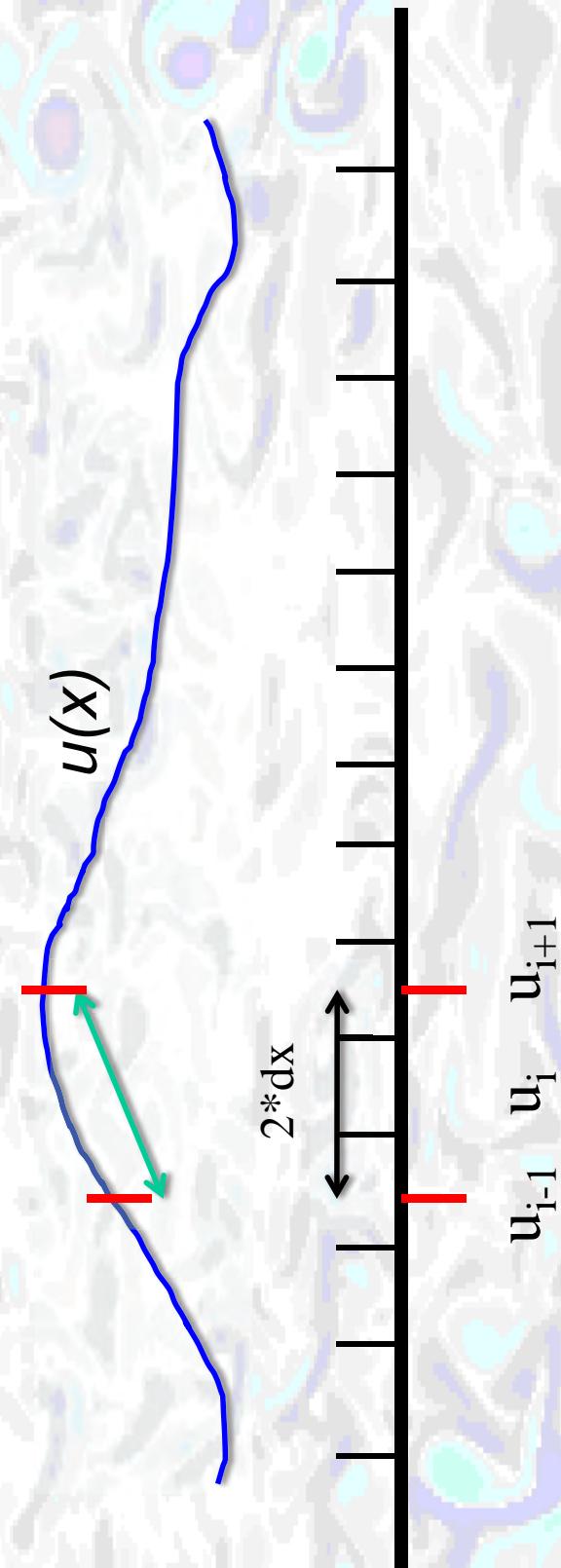
Primitive equations

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + Lu - fv &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + Fu \\ \frac{\partial v}{\partial t} + Lv + fu &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + Fv \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= -\frac{\rho}{\rho_0} g \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + L\theta &= F\theta \\ \frac{\partial S}{\partial t} + LS &= Fs \\ \rho &= \rho(S, \theta, P)\end{aligned}$$

S salinity, θ potential temperature, ρ_0 the average density and L is the advection operator:

$$La = u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} + w \frac{\partial a}{\partial z}.$$

Discretisation

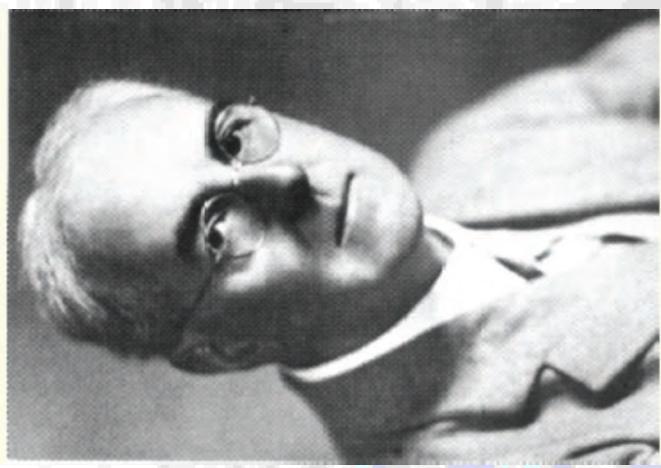
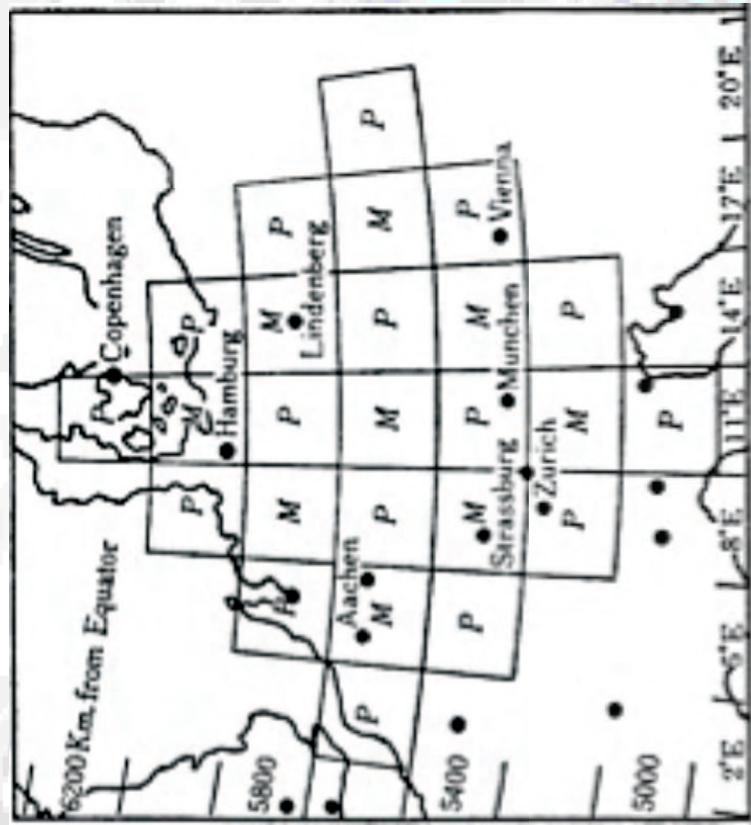


L'expression mathématique complexe devient une série d'opérations simples.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{(u_{i+1} - u_{i-1})}{2dx}$$

Prévoir le temps numériquement

Lewis Fry Richardson (1881-1953).
Ambulancier en France en 1916...

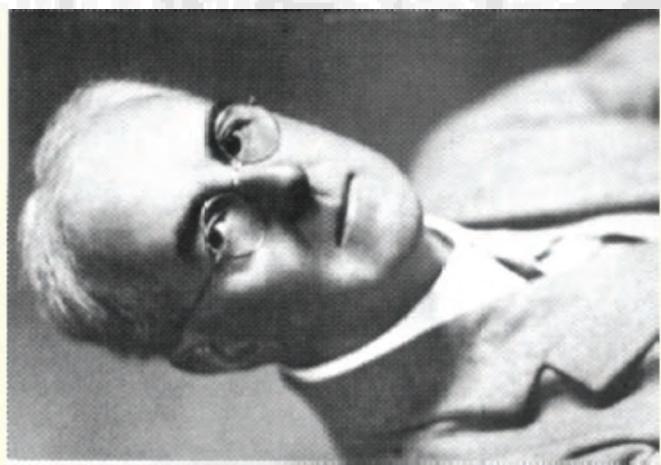


Prévision météo numérique en 1922?

« After so much hard reasoning, may one play with a fantasy? Imagine a large hall like a theatre, except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. The ceiling represents the north polar regions, England is in the gallery, the tropics in the upper circle, Australia on the dress circle and the Antarctic in the pit.

A myriad computers are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each computer attends only to one equation or part of an equation.... »

L.F. Richardson, 1922



Les ordinateurs à la rescouisse

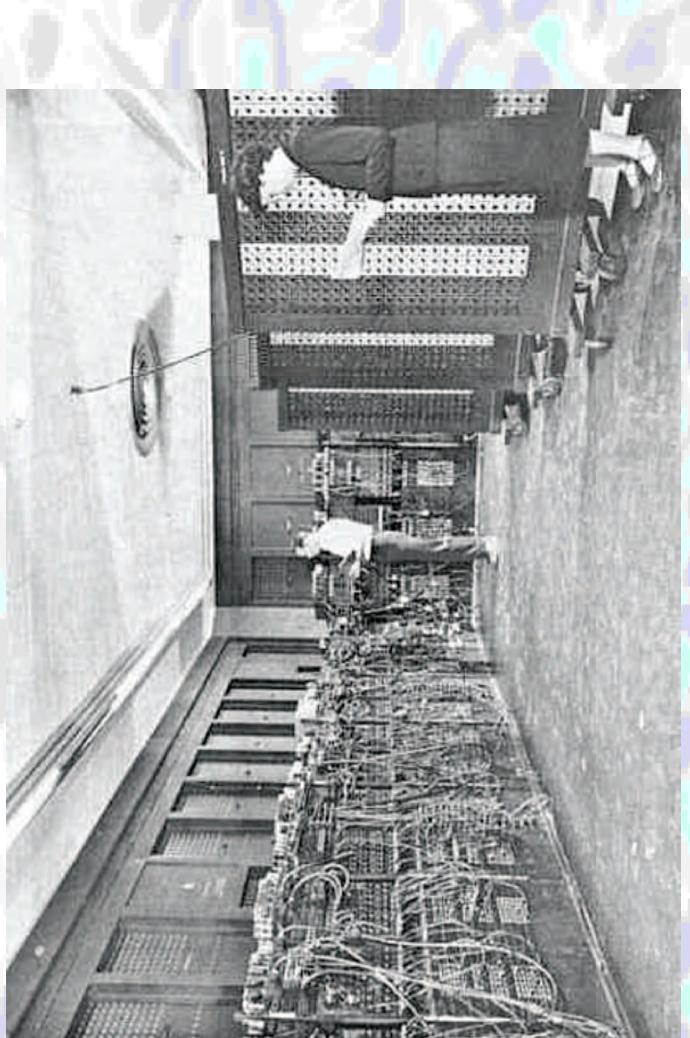


D'abord trouver la bonne équation

(J. Charney, équation quasigéostrophique 2D)



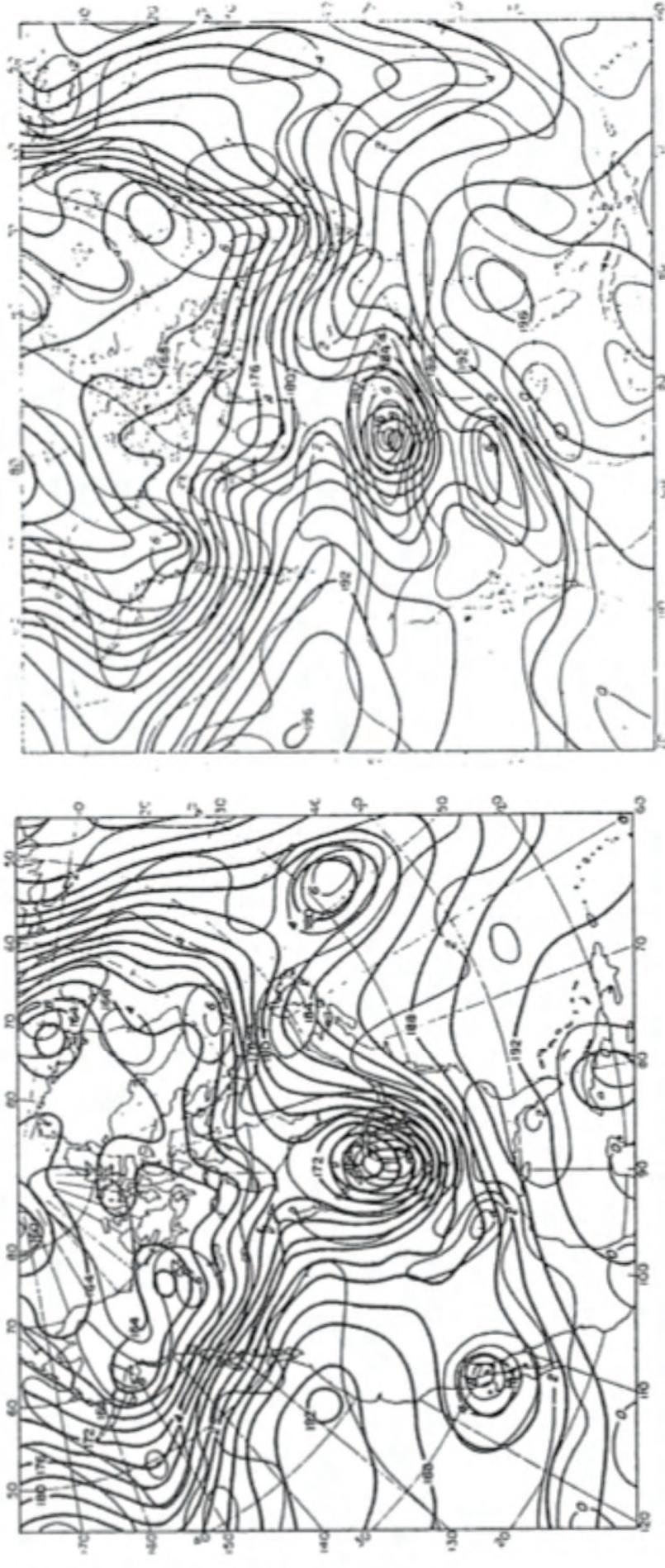
Puis trouver
un ordinateur:
J Von
Neumann
(ENIAC,
1950)



Première prévision météo numérique réussie

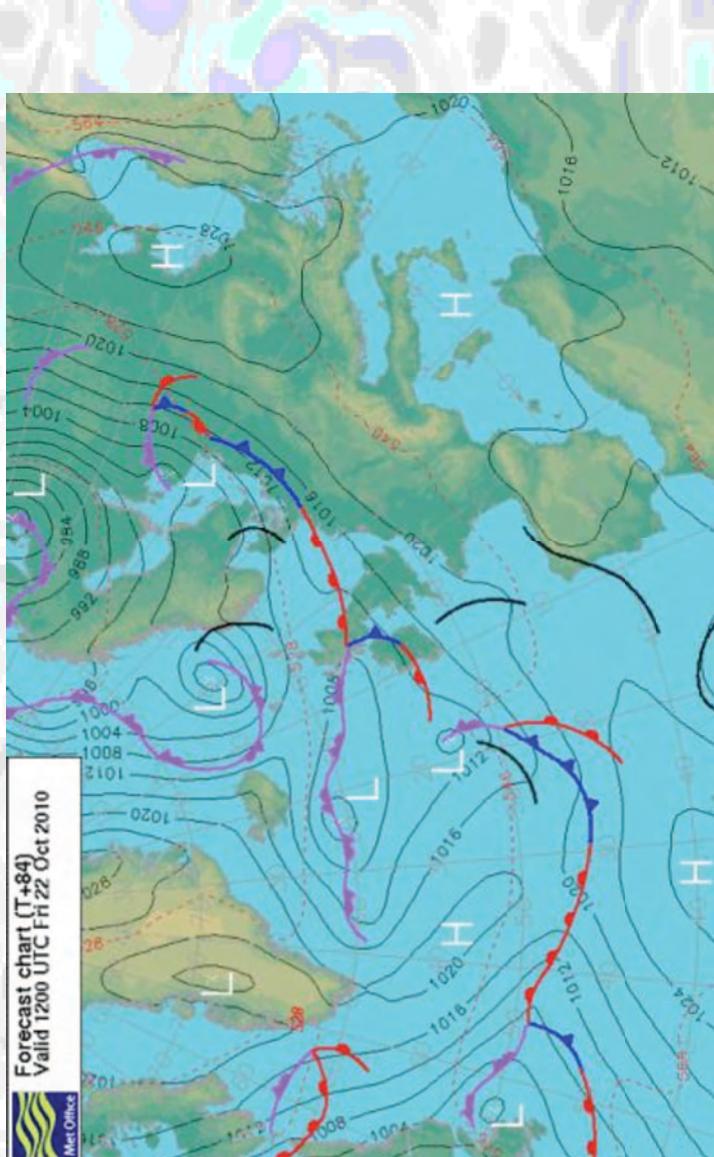
Observation 6 janvier 1949 - prévision 24h

$Dx = 736 \text{ km}$, 15×18 points, $dt = 1\text{h} \text{ à } 3\text{ h}$.



La prévision météo aujourd’hui

Vendredi 12h :
prévision de mardi

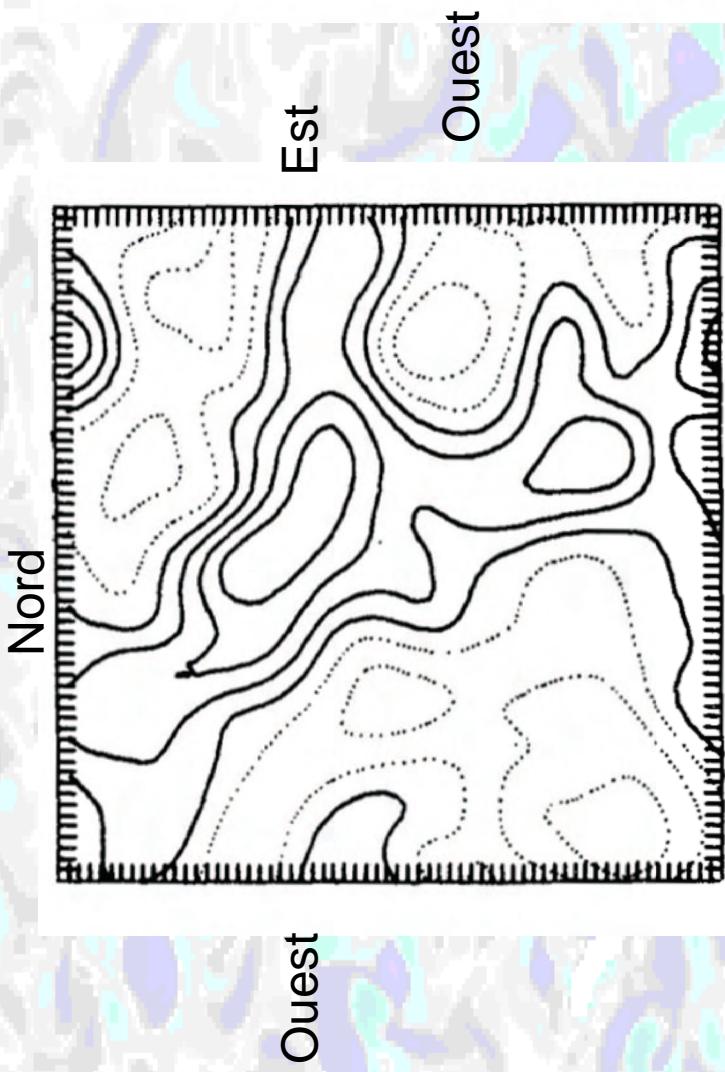


Modélisation numérique de l'océan

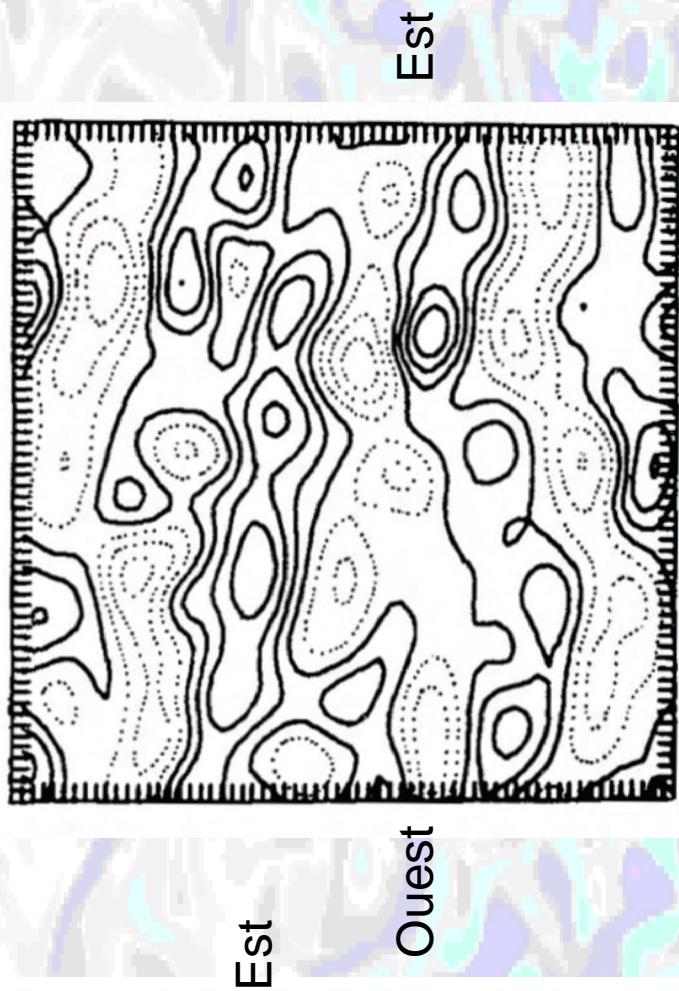


1975: Equation quasi-géostrophique de Charney + une discréétisation+ un ordinateur: Comment la rotation de la terre modifie les courant océaniques (Rhines, 1975)

Force de Coriolis constante: f

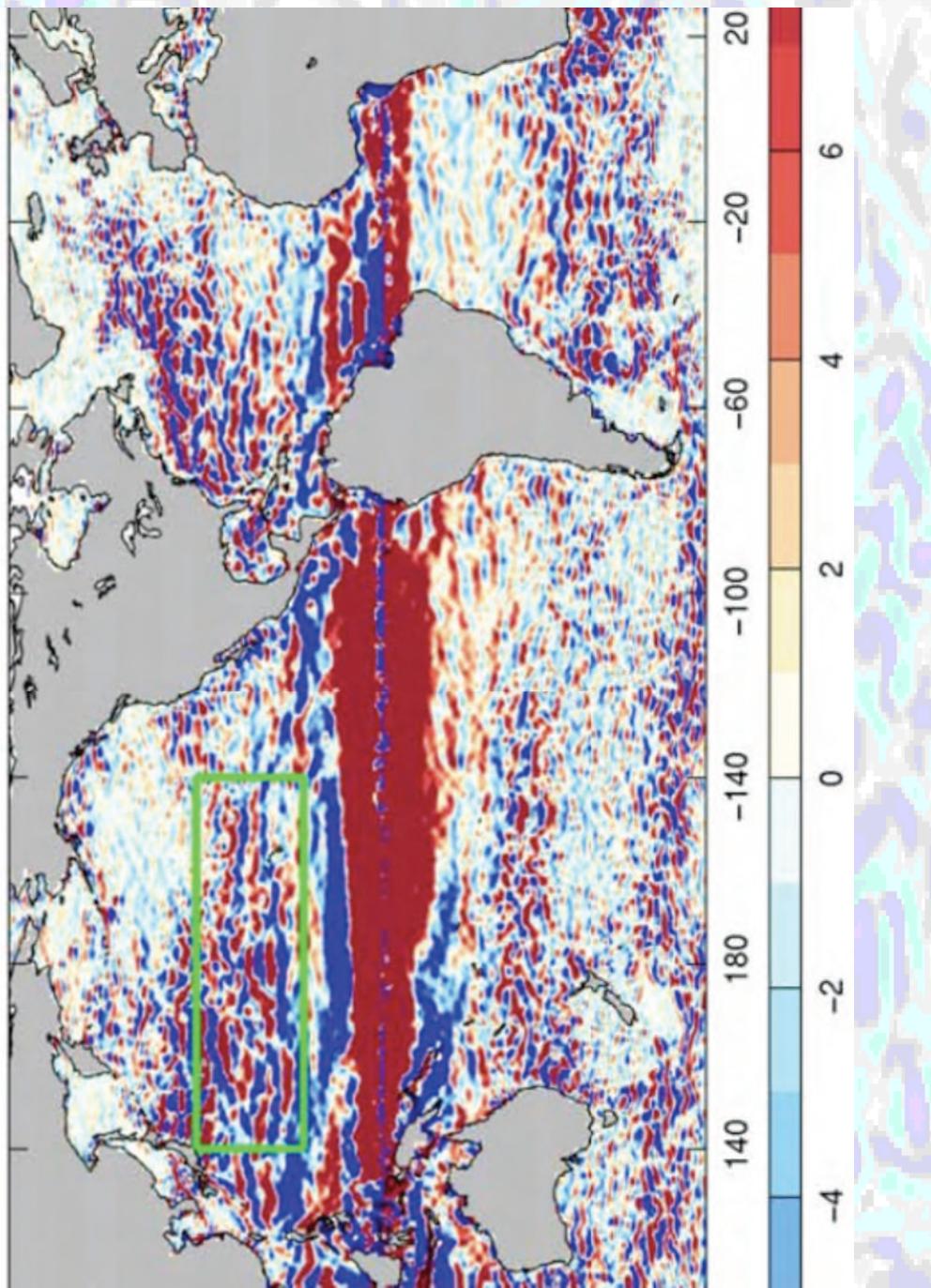


Force de Coriolis variable: $f(\text{latitude})$

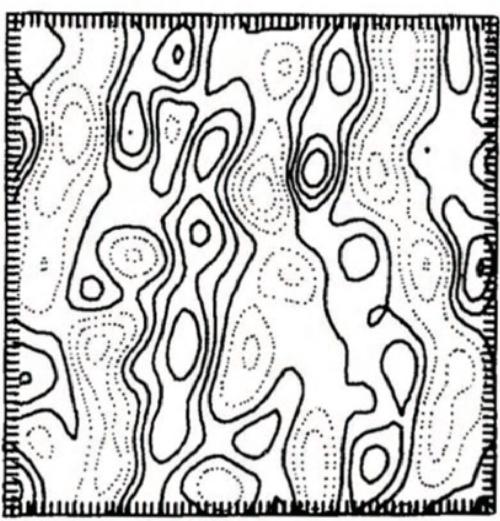


Courants zonaux dans l'océan

L'existence de courants zonaux tels que prédicts par Rhines est démontrée par les mesures d'altimétrie satellite (Maximenko et al, GRL 2005)



Anomalies de
vitesses
géostrophiques de
surface (cm/s),
moyenne sur 10 ans



Christian le PROVOST et les modèles QG

Discretisation: quadrillage régulier, ou éléments finis?

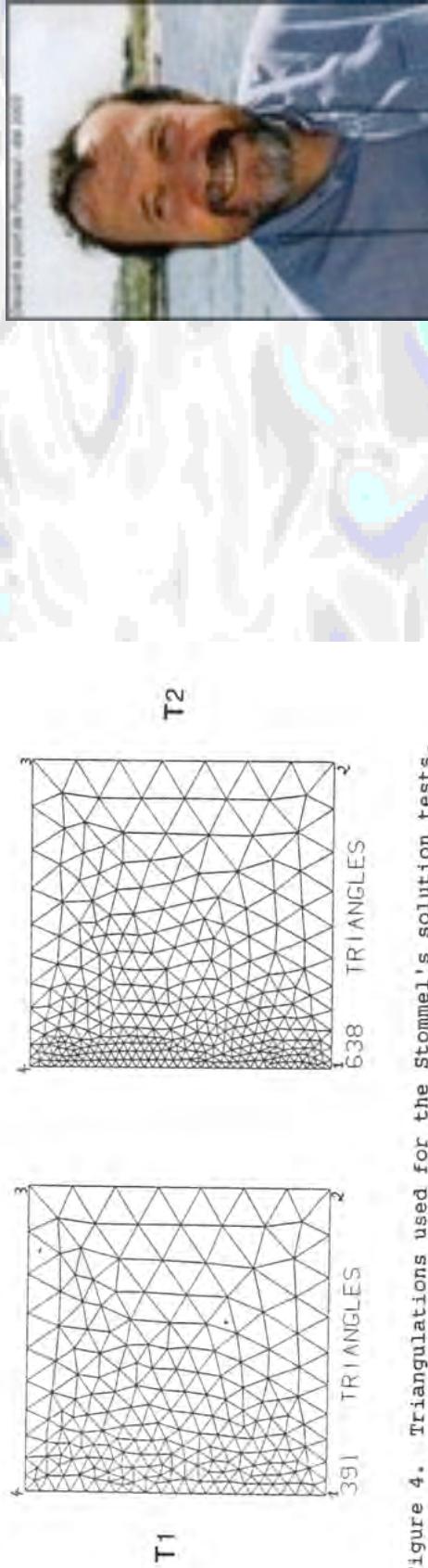
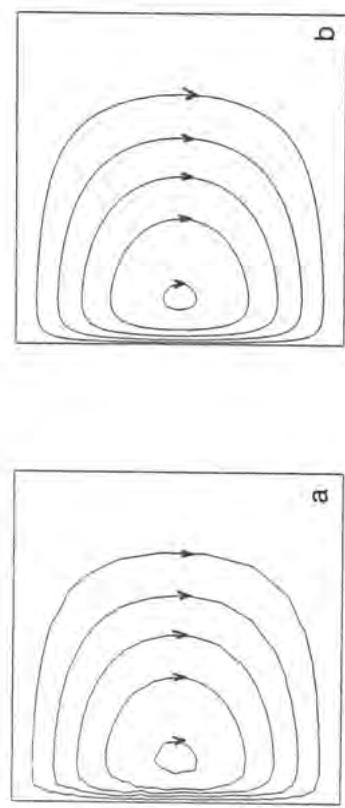


Figure 4. Triangulations used for the Stommel's solution tests.
T1 (391 triangles - 220 nodes with P1 - 830 nodes with P2) and
T2 (638 triangles - 353 nodes with P1 - 1340 nodes with P2).
Typical size of the mesh: on the left 0.15, on the right 0.05 for T1
and 0.02 for T2 .



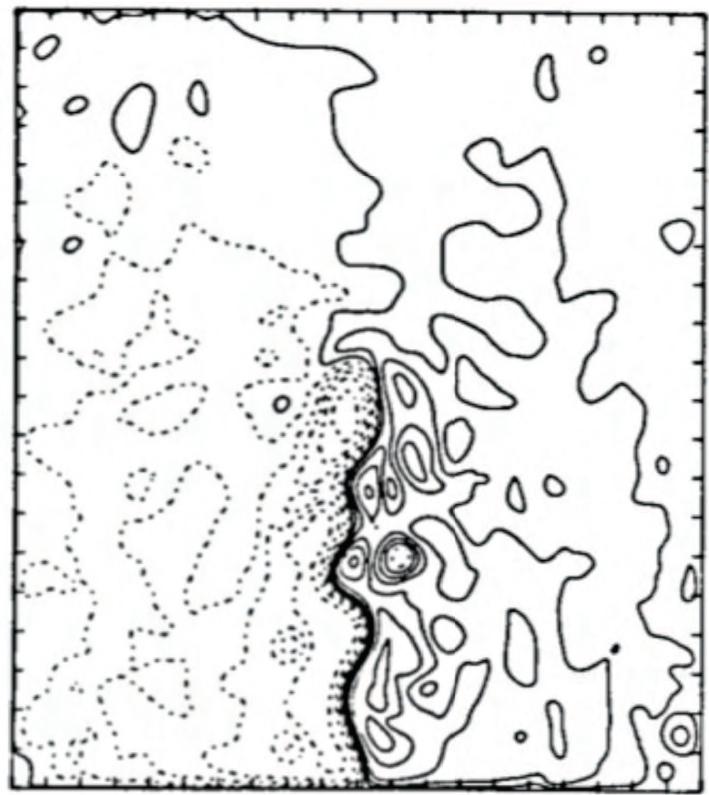
Modélisation numérique d'un
grand tourbillon océanique,
semblable au tourbillon
subtropical de l'Atlantique
Nord (Le Provost, 1981)

Christian le Provost et les modèles QG

Le Gulf Stream est instable

Nord

STREAMFUNCTION LAYER 1
68 DAYS

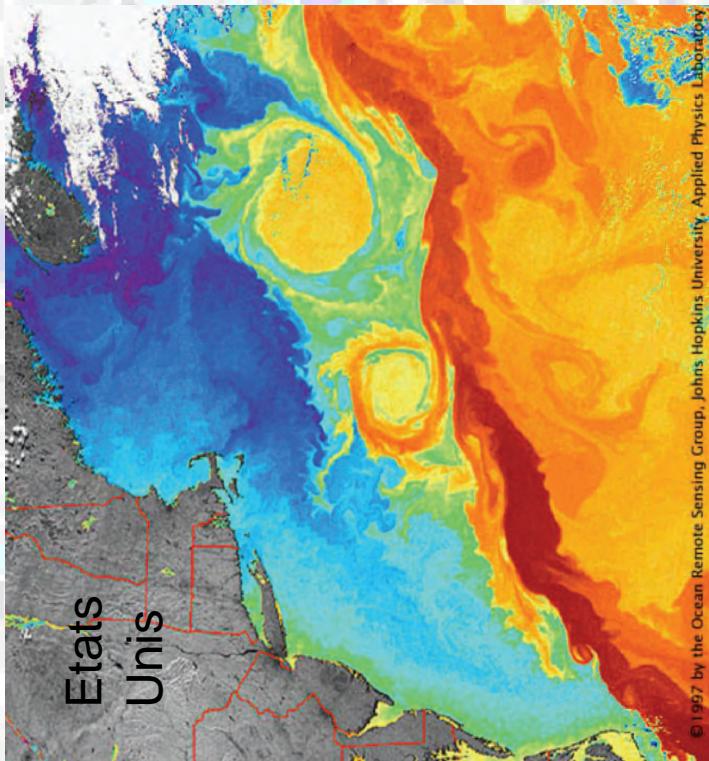


Ouest

Est

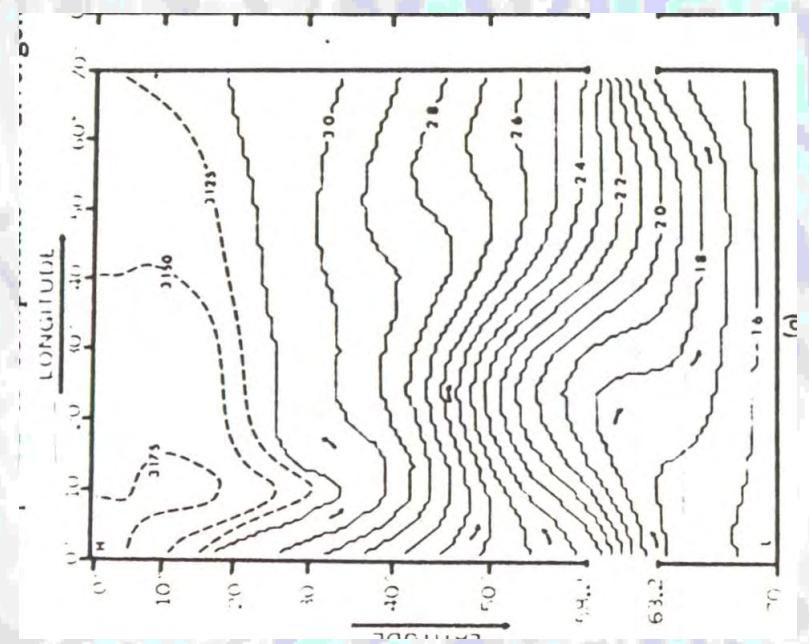
Image de température de surface au large des Etats Unis (Gulf Stream)

Barnier, Hua, Le Provost, 1991



Vers des modèles d'océan plus performants

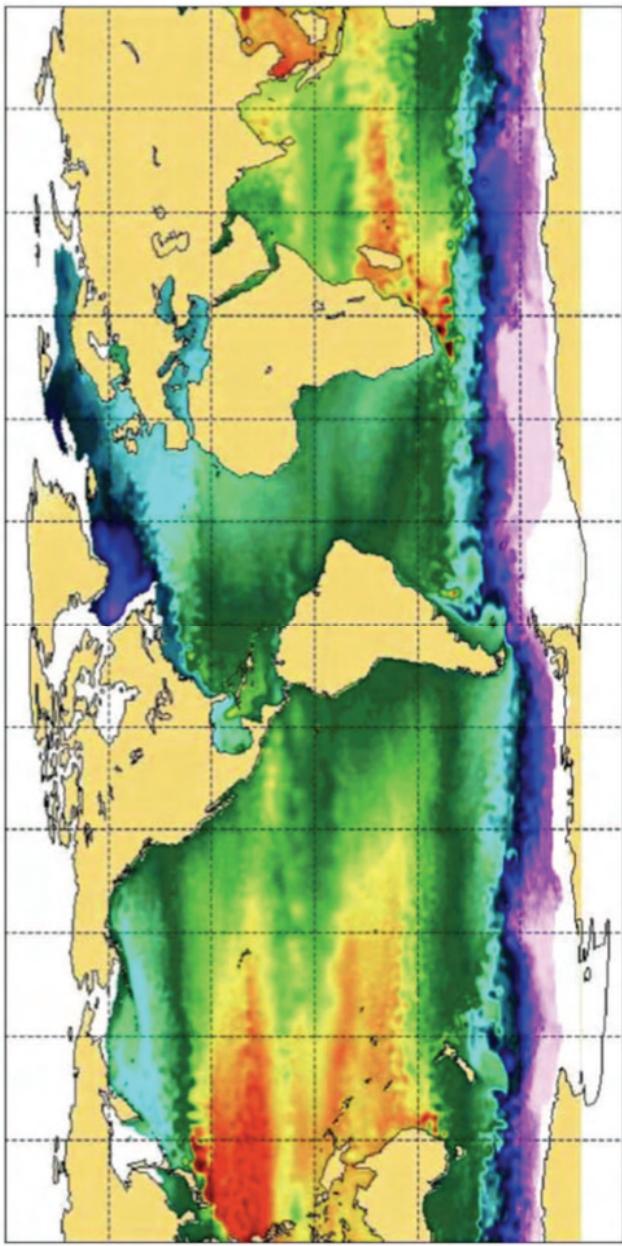
Premier modèle 3D de l'océan, 1969,
équations primitives, K. Bryan, GFDL



Un analogue du courant antarctique
circumpolaire dans une « boîte ».
20x30x8 points, $dx=100\text{km}$, Gill et Bryan
1971.

Vers des modèles d'océan plus performants

Modèle global du
projet DRAKKAR
(Barnier et al 2006)
 $1442 \times 1021 \times 46$
points.



Modèle numérique
NEMO (www.nemo-ocean.eu)

Ballade raquette
annuelle du projet
DRAKKAR
(Grenoble, février
2010)

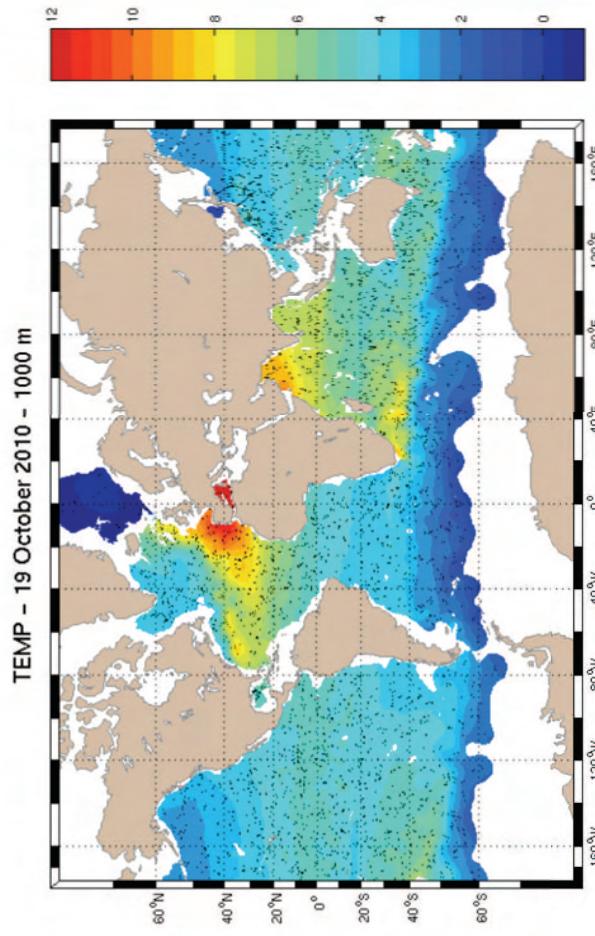


Modèle global $1/4^\circ$: recette pour une prévision de l'océan

Le contenu: la topographie du fond de l'océan.



La matière première: valeurs initiales de la température et de la salinité.
Climatologie.



min = -2.08 max = 21.79 count = 4847 last update : 19/10/2010

Coriolis

www.coriolis.eu.org

Modèle global $1/4^\circ$ recette (suite)

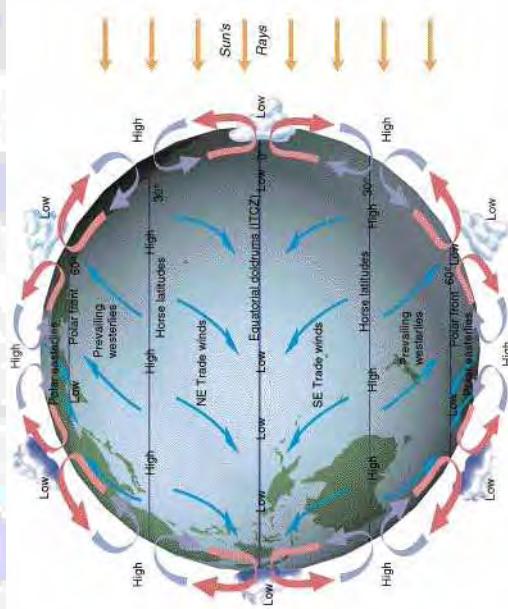
Mettre l'océan en mouvement: les vents, les flux de chaleur et d'eau douce (évaporation, précipitations)

Calculer la solution:

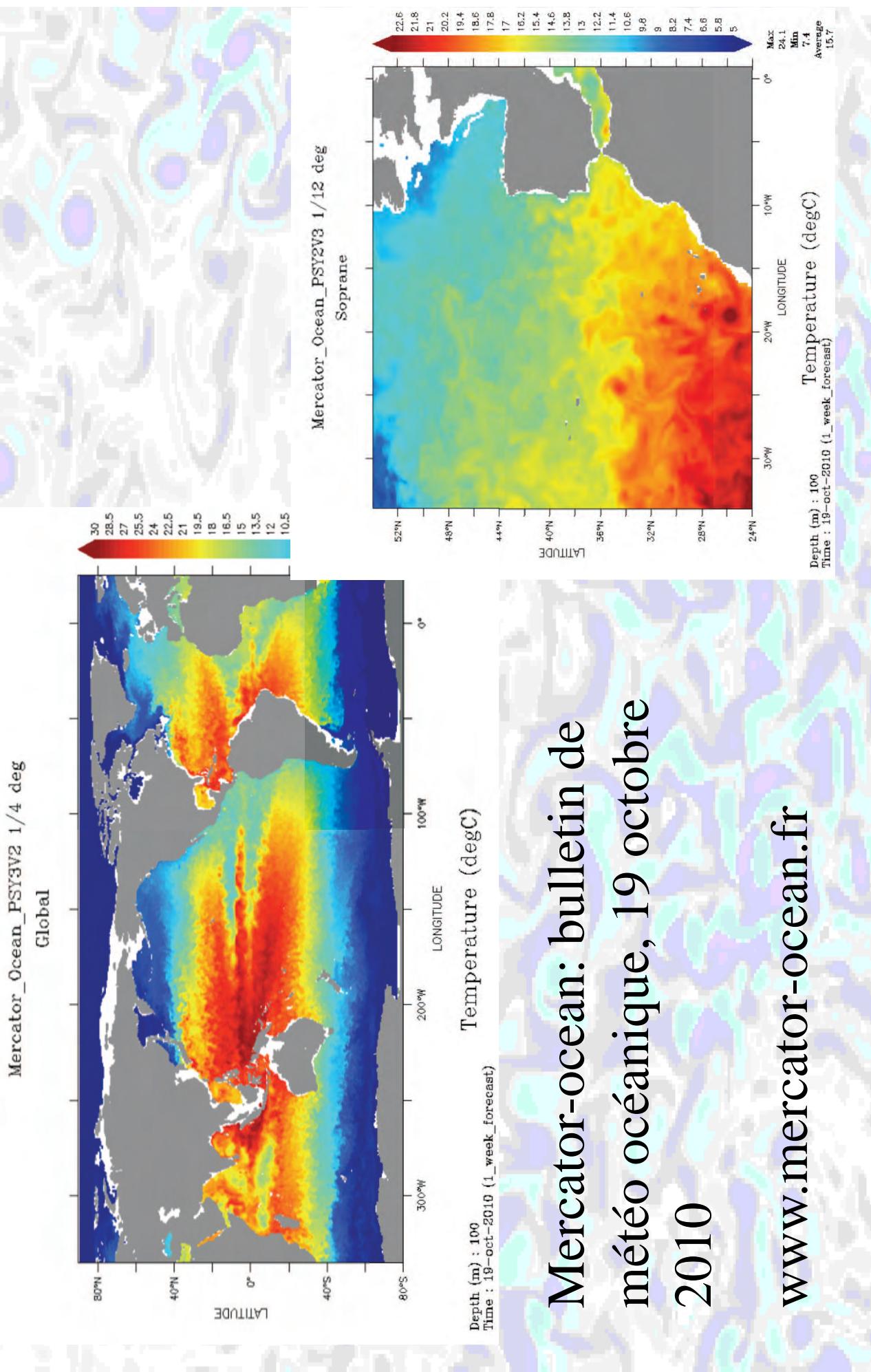
- Un programme informatique pour résoudre les équations

- Un ordinateur puissant

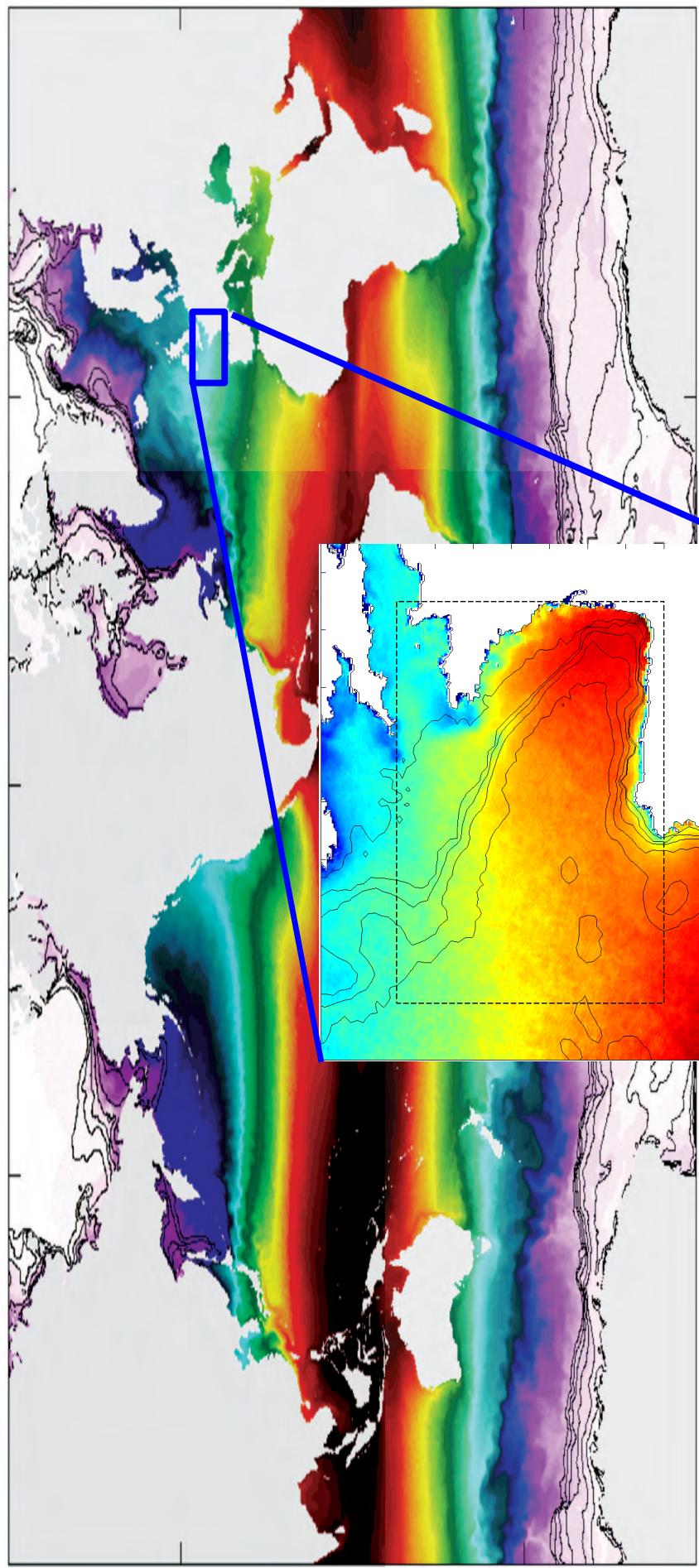
Supercalculateur de l'IDRIS (Orsay), plusieurs milliers de processeurs



La prévision océanique



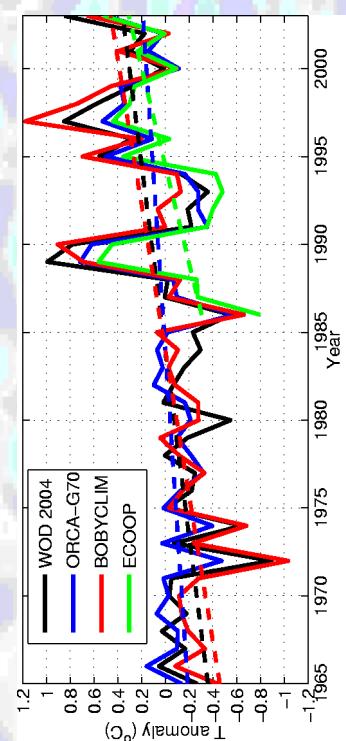
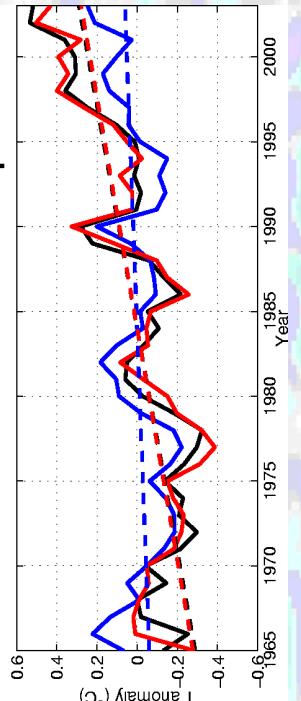
Prévision à rebours: application régionale



Température de surface

Température à 200m

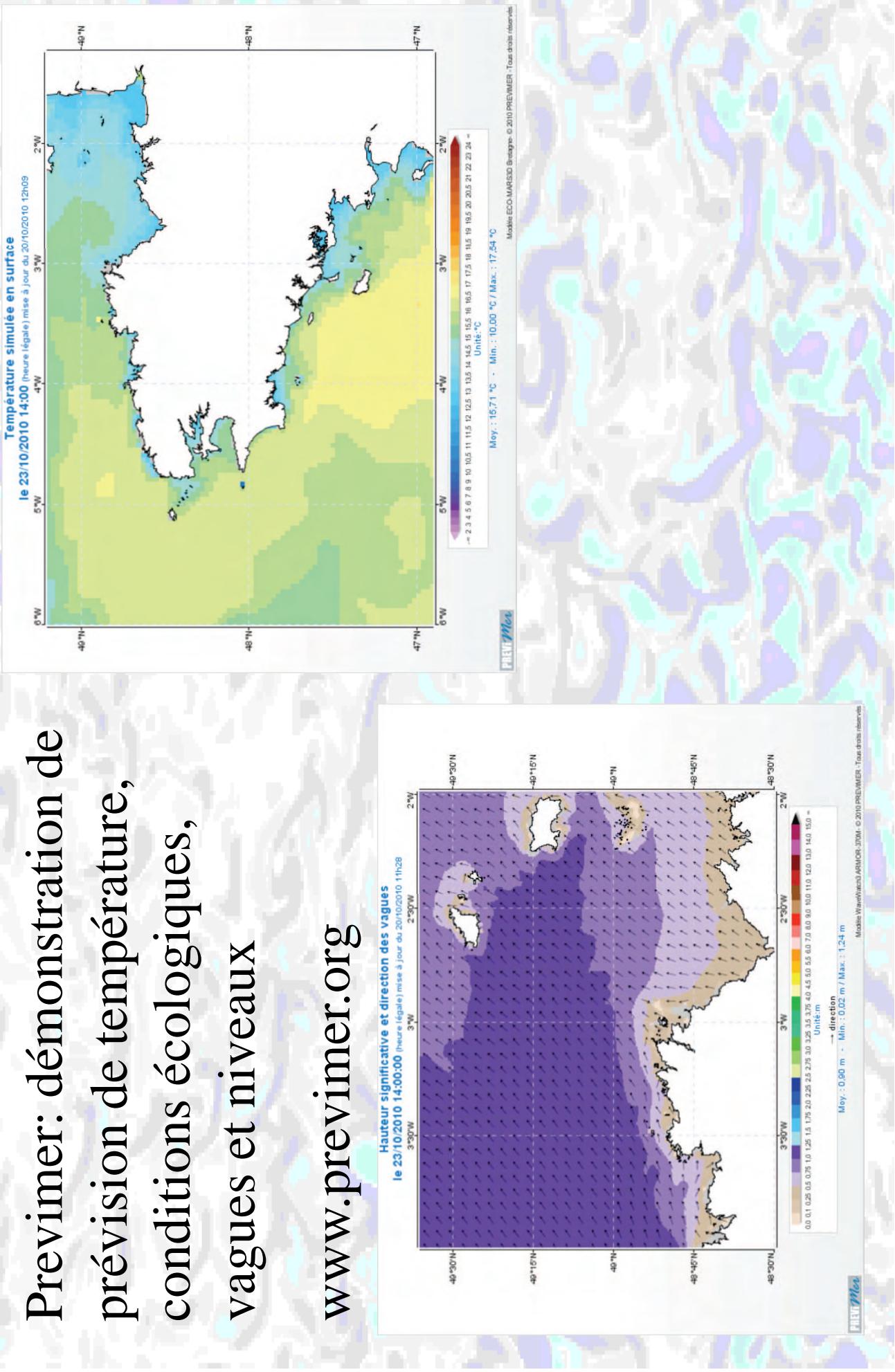
Michel et al, 2009



La prévision océanique en Bretagne

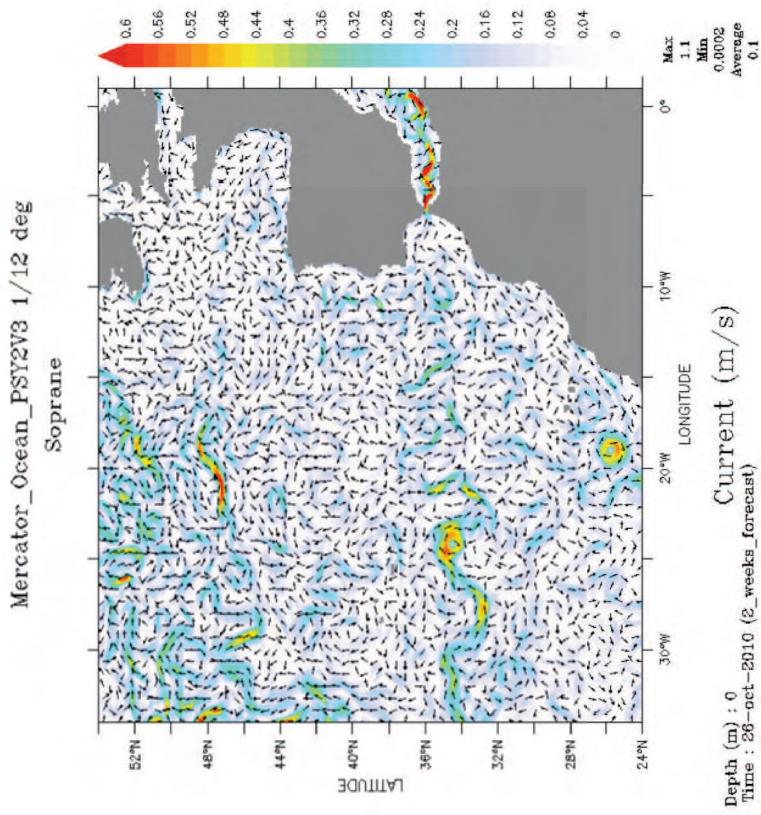
Previmer: démonstration de
prévision de température,
conditions écologiques,
vagues et niveaux

www.previmer.org



La prévision de l’océan...

Comme la prévision météo, elle devra faire ses preuves!
On a besoin de meilleurs modèles,
On a besoin de mieux observer
l’océan.



« In a neighbouring building there is a research department, where they invent improvements. But these is much experimenting on a small scale before any change is made in the complex routine of the computing theatre. In a basement an enthusiast is observing eddies in the liquid lining of a huge spinning bowl, but so far the arithmetic proves the better way. In another building are all the usual financial, correspondence and administrative offices. Outside are playing fields, houses, mountains and lakes, for it was thought that those who compute the weather should breathe of it freely.”

(Richardson 1922)