

**Simulation**  
**de la**  
**circulation océanique globale**  
**au 21<sup>ème</sup> Siècle:**  
**enjeux et état de l'art**



**Partie I: Définitions**

**Partie II: Révolutions de la fin du 20<sup>ème</sup>  
et du début du 21<sup>ème</sup>**

**Partie III: Enjeux**

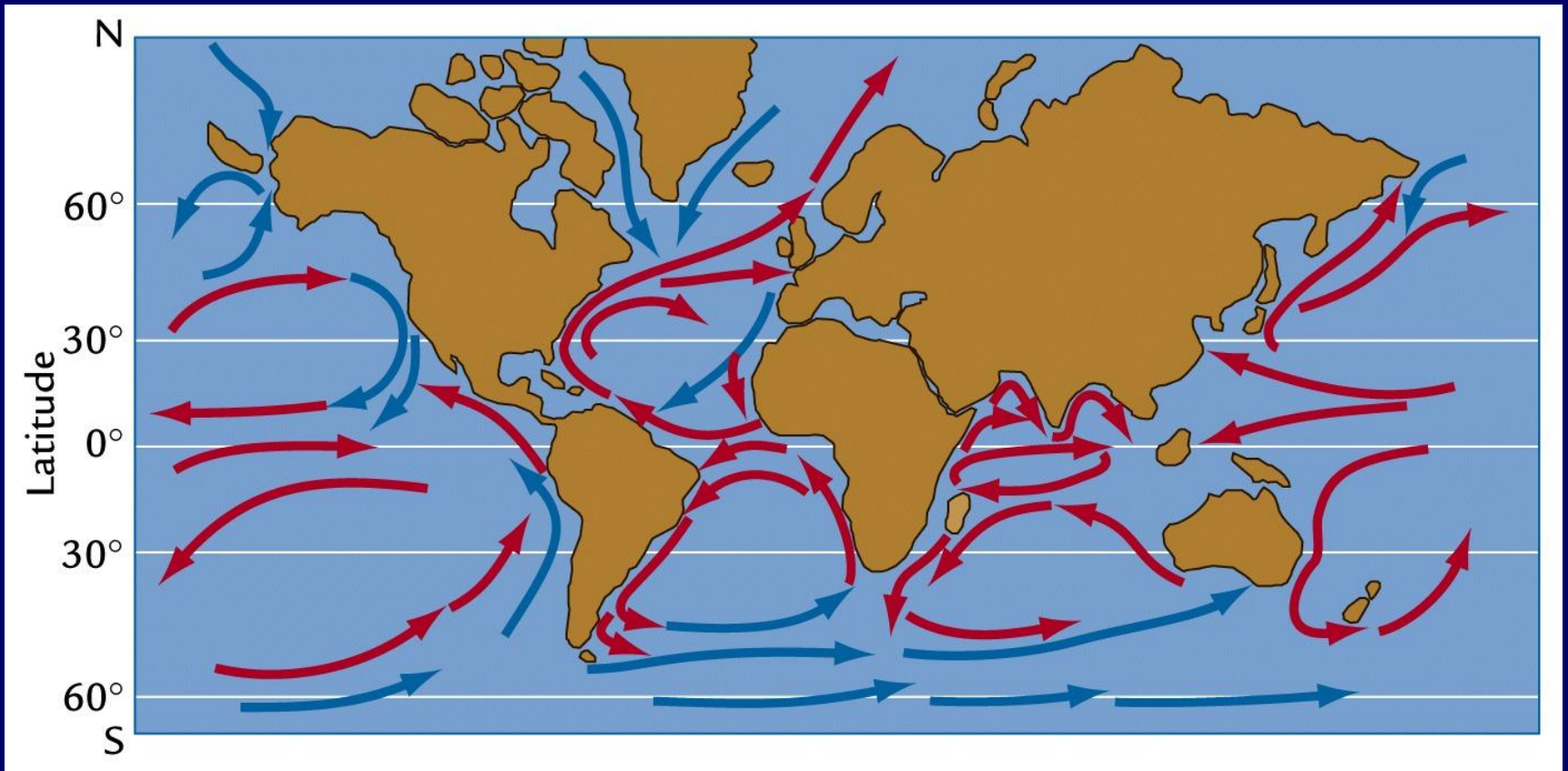
**Partie IV: Etat de l'art et prospective**

# Partie I

## Définitions

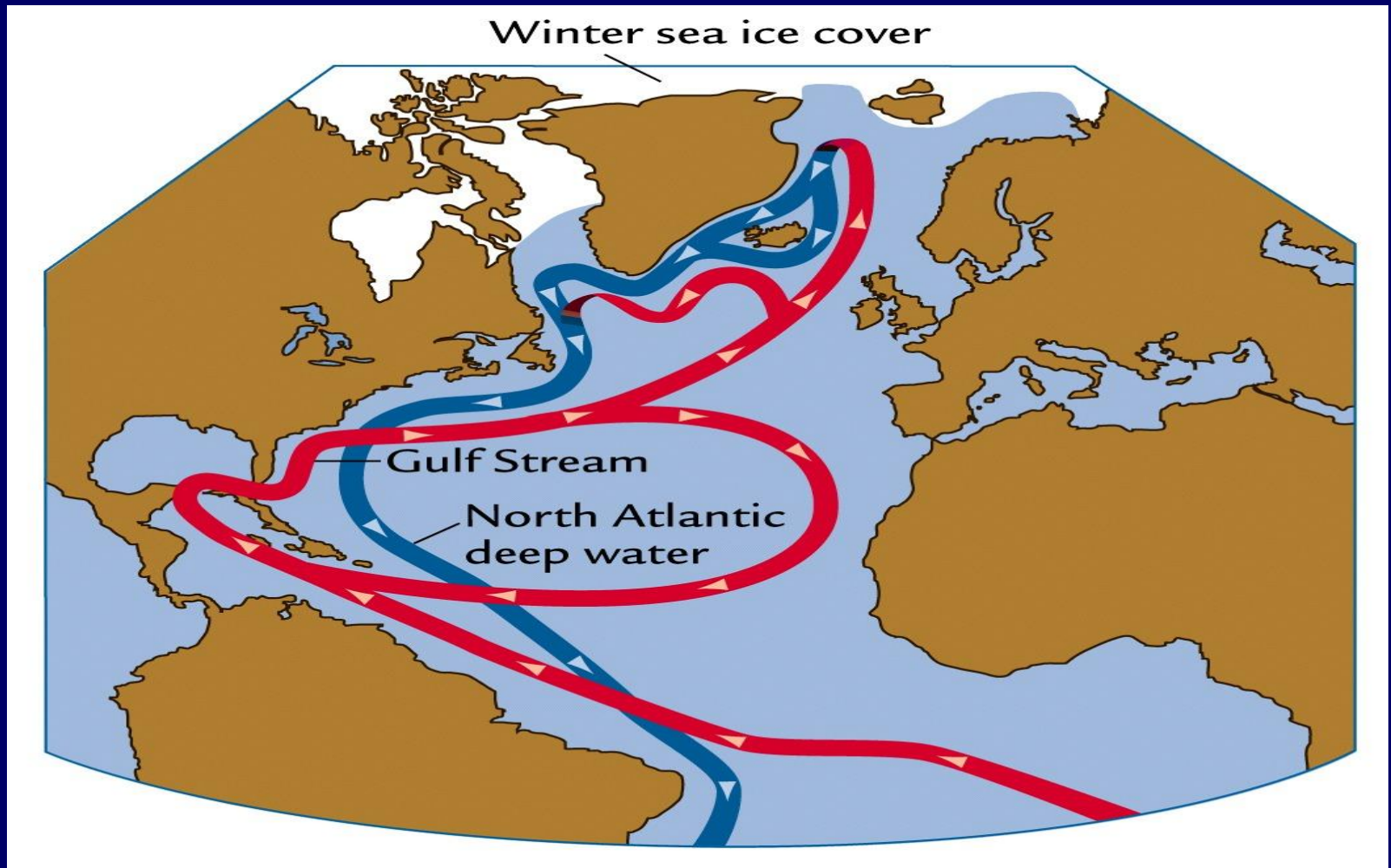
**Simulation**  
de la  
**circulation océanique globale**  
au 21<sup>ème</sup> Siècle:  
enjeux et état de l'art

# circulation océanique globale?



Courants de surface

# circulation océanique globale?



Courants profonds et leur liens avec la surface

# Simulation?

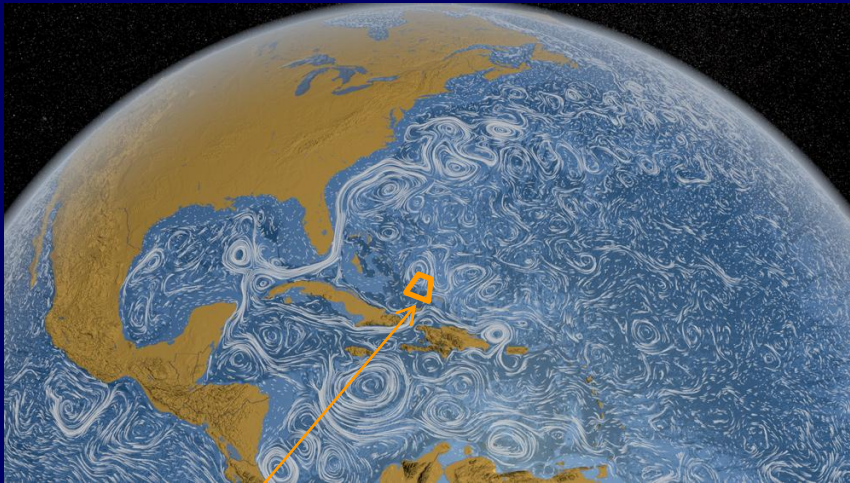
Représentation du comportement d'un système réel (l'océan)

au moyen d'un **modèle** matériel

dont les **paramètres** et les **variables** sont les **images** du système étudié

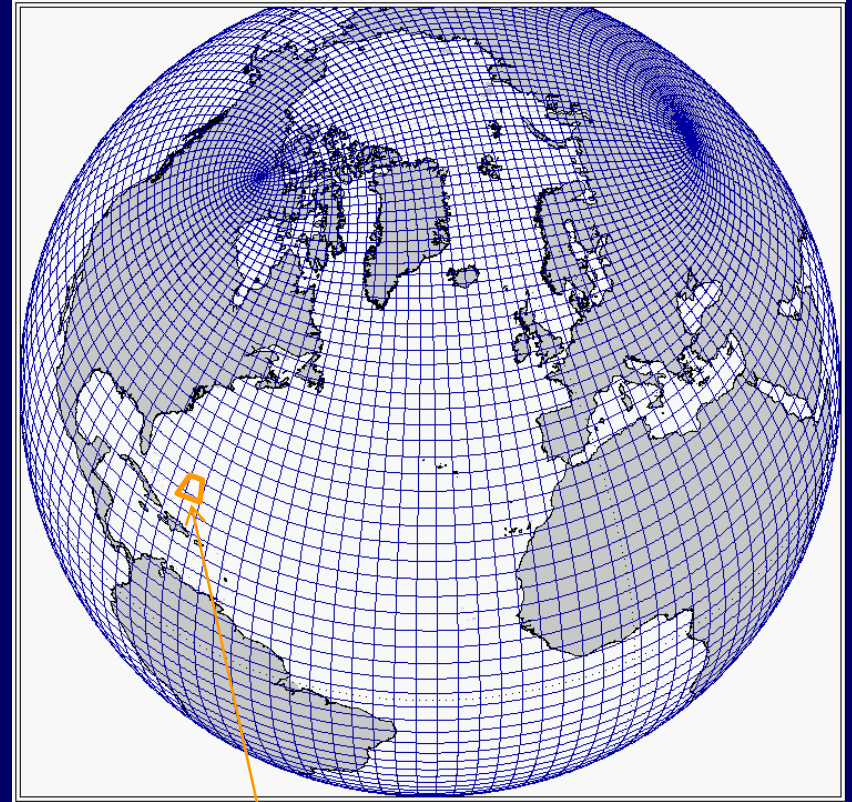
# Simulation?

Océan réel



Vitesse  
Température  
Salinité  
Dénivellation de surface libre

Modèle d'océan



**Représentation**, par des **Valeurs Numériques** de ces variables dans cette grille



# Simulation?

Représentation du comportement d'un système réel (l'océan)

au moyen d'un **modèle** matériel

dont les paramètres et les variables sont

les images du système étudié

# Qu'est ce qu'un modèle de circulation océanique?

- Un système qui va permettre une représentation de :
  - l'ensemble des variables océaniques (Température, Salinité, Courants, ...)
  - et de processus impliquant ces variables et interagissant entre eux
- **Chance:** la physique du système océanique peut être décrite par des équations mathématiques

Equations de Navier-Stokes,

# Equations Primitives pour l'Océan

~~$$\frac{\partial w}{\partial t} + \dots = \dots$$~~

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + D_u + F_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})v + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + D_v + F_v$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

$$\rho = \rho(T, S, P)$$

$$\vec{u} = (u, v, w)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T = D_T + F_T$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} S = D_S + F_S$$

- Incompressible
- Boussinesq
- Eau peu profonde
- Hydrostatique

## Conditions limites de surface

Cinématique  $\left[ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \eta = w \right]_{surf} + P + R - E$

Pas d'effet stérique

Flux

$$K_v \left[ \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{surf} = -\rho C_p Q_{NSOL}$$

$$K_v \left[ \frac{\partial S}{\partial z} \right]_{surf} = 0$$

$$A_v \left[ \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{\rho_0} \tau_x$$

$$A_v \left[ \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{\rho_0} \tau_y$$

# Equations Primitives pour l'Océan

~~$$\frac{\partial w}{\partial t} + \dots = \dots$$~~

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) u$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + D_u + F_u$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

$$+ D_v + F_v$$

$$\vec{\nabla}$$

$$\rho =$$

$$\vec{u} = ($$

IMAGE  
MATHÉMATIQUE DE LA  
CIRCULATION  
Océanique

ressible

sq

peu profonde

•Hydrostatique

Condition

Cinématique

$$-w]_{surf} + P + R - E$$

Pas d'effet stérique

Flux

$$K_v \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{surf} = -\rho C_p Q_{NSOL}$$

$$K_v \left. \frac{\partial S}{\partial z} \right]_{surf} = 0$$

$$A_v \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{\rho_0} \tau_x$$

$$A_v \left. \frac{\partial v}{\partial z} \right]_{z=0} = \frac{1}{\rho_0} \tau_y$$

# Equations Primitives pour l'Océan

~~$$\frac{\partial w}{\partial t} + \dots = \dots$$~~

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + D_u + F_u$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

$$\vec{\nabla}$$

$$\rho =$$

$$\vec{u} = ($$

IMAGE  
MATHÉMATIQUE DE LA  
CIRCULATION  
Océanique

$$+ D_v + F_v$$

compressible

sq

peu profonde

•Hydrostatique

Conditions

Le système est une série d'équations mathématiques que l'on pourra résoudre sur un ordinateur

**Simulation**  
**de la**  
**circulation océanique globale**  
**au 21<sup>ème</sup> Siècle:**  
**enjeux et état de l'art**



# **Partie II**

**Révolutions  
dans les sciences océaniques  
de la fin du 20<sup>ème</sup> et du début du 21<sup>ème</sup>**

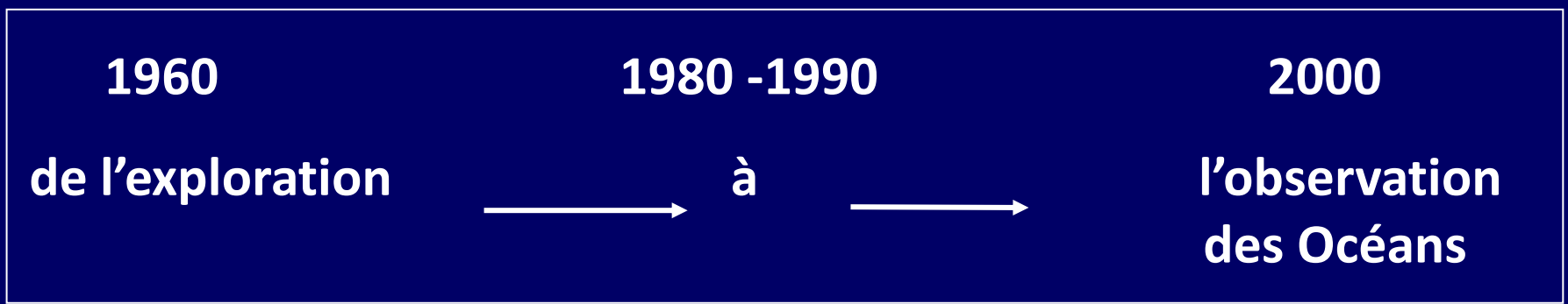
Les sciences océaniques ont connu une véritable **révolution** à partir des années 1990, qui a concerné

- **L'Observation Spatiale**
- **L'Observation In-situ**
- **Le Calcul Haute Performance**

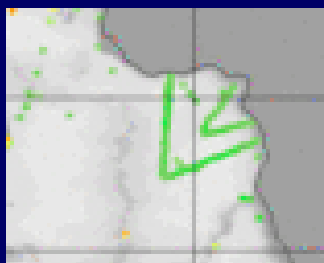
et a largement modifié les **enjeux de la modélisation numérique** et a placé cette discipline au cœur des applications.



# Révolution dans l'Observation des Océans



## Navires



Sections hydrographiques

## Satellites



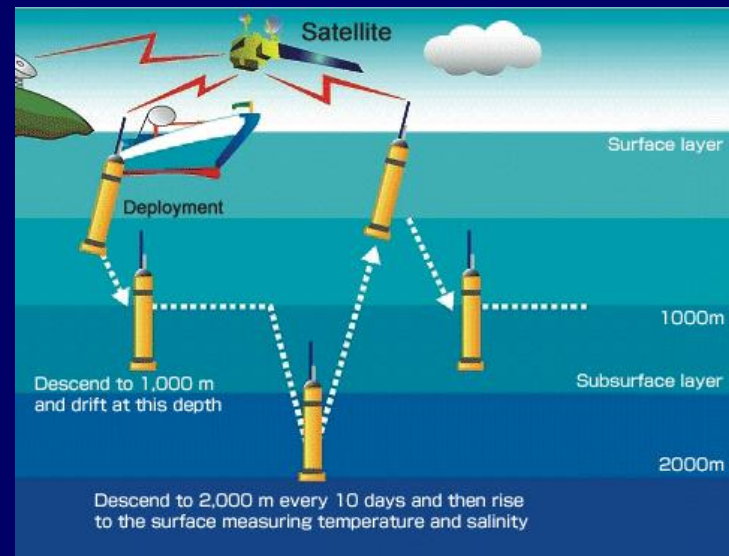
## Altimétrie

Topex/Poseidon, ERS, JASON

Radiométrie, radars  
Température de surface,  
Couleur de l'Eau, vents de surface, ..

## Flotteurs autonomes ARGO

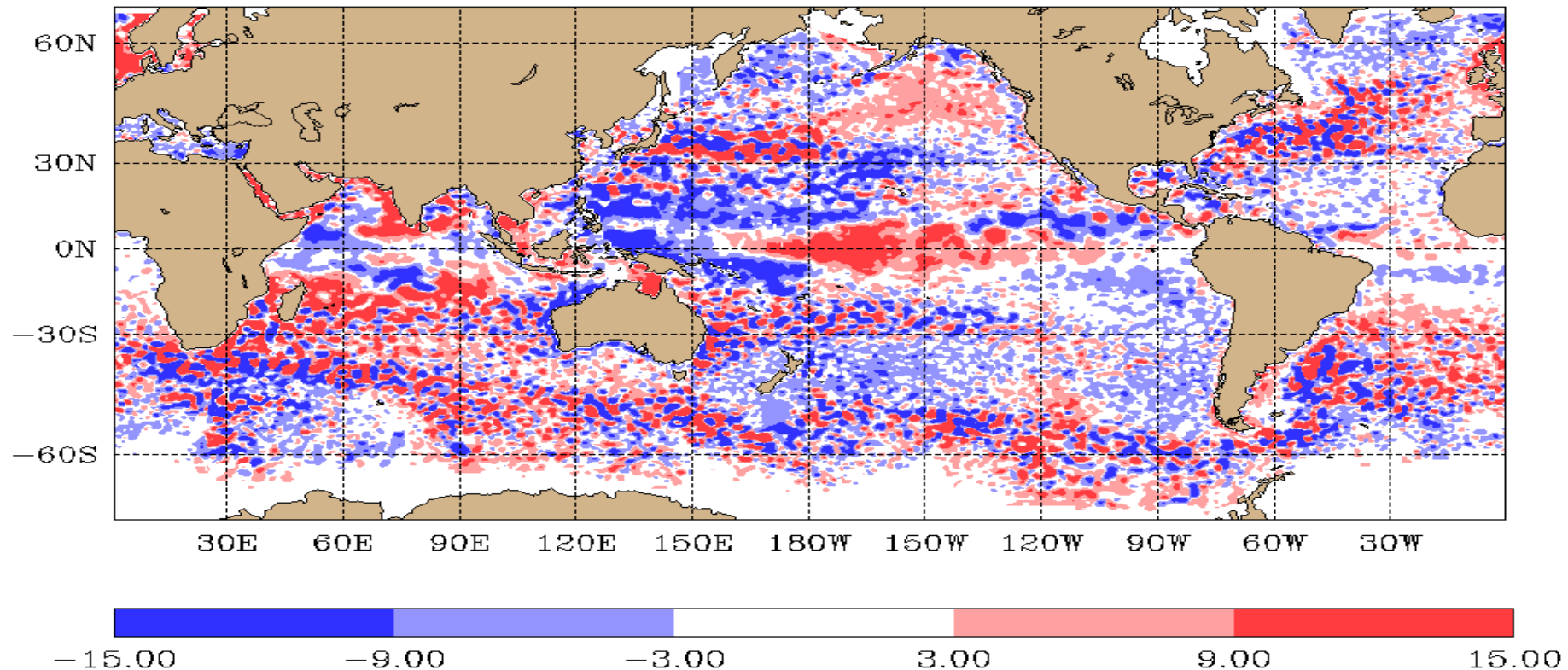
Profils 10m – 2000  
chaque 10 jours



# 1993 .... Observation Spatiale: Altimétrie

## Mesure de la dénivellation de surface océanique

SLA AVISO — 06 / 01 / 1993

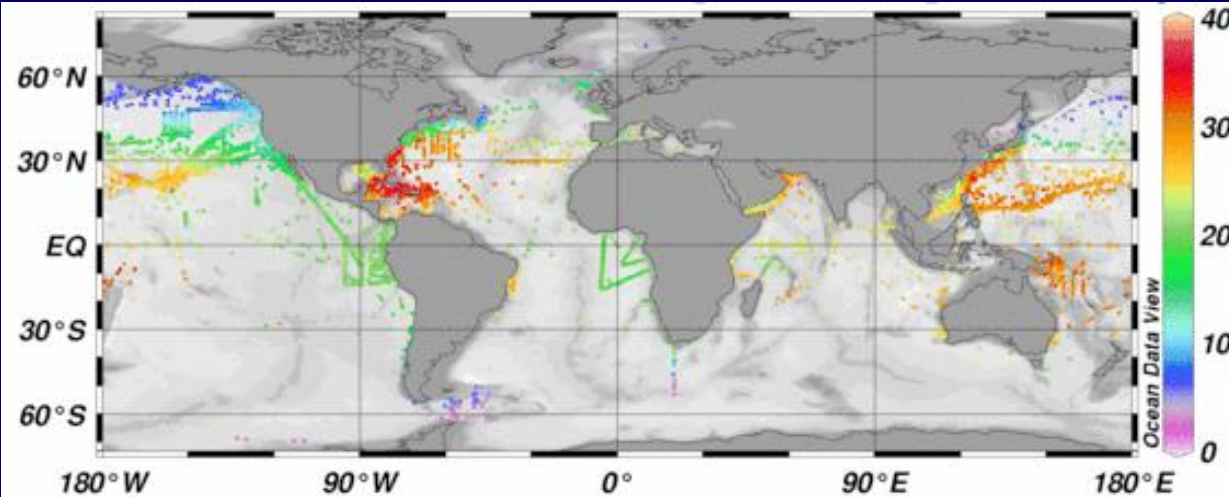


# 2003 .... Observation In-situ:

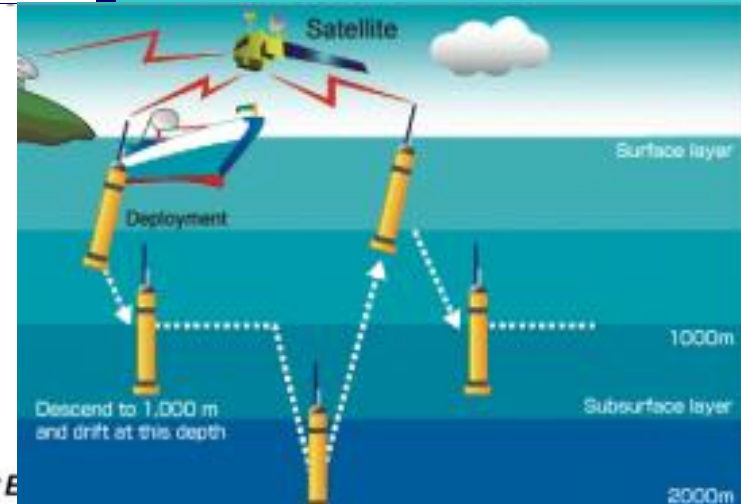
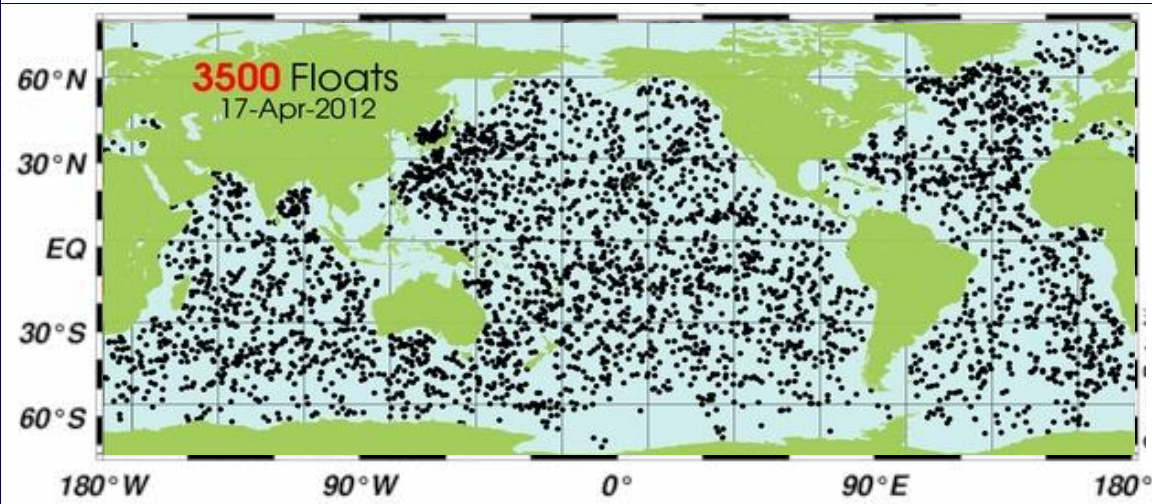


## Les flotteurs autonomes « profilant » ARGO

Profils T (50-400m) en 1975

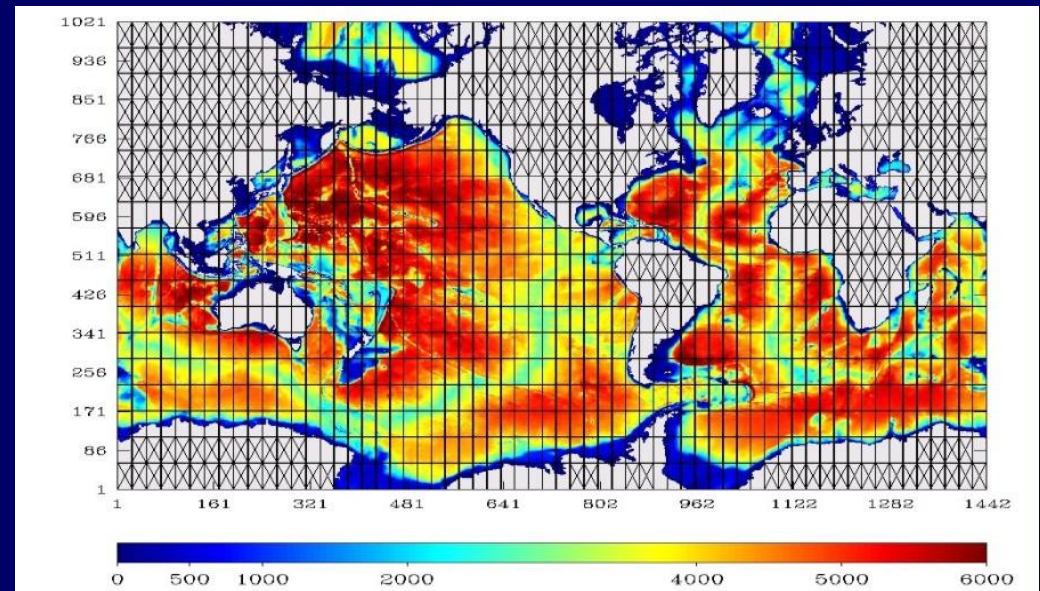


Flotteurs ARGO  
~3000 profils 10m-2000m  
chaque 10 j



# 2000 ... Calcul Haute Performance :

## Les calculateurs massivement parallèles



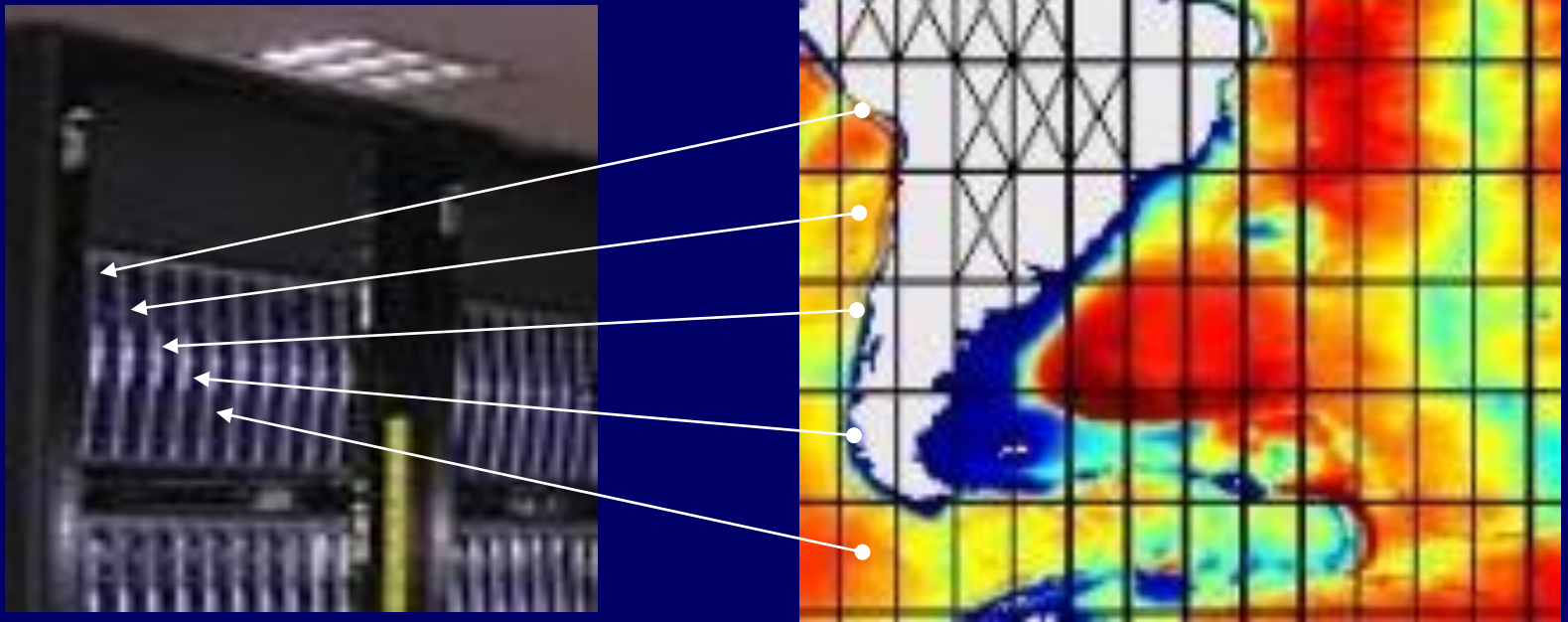
Plus de 10 000 processeurs qui peuvent

- travailler en même temps
- échanger les résultats de leurs calcul

L'océan est divisé en « 1000 » morceaux

# 2000 ... Calcul Haute Performance :

## Les calculateurs massivement parallèles



- Chaque “morceau d’océan” est calculé par un processeur
  - Tous les processeurs travaillent en même temps
- Le temps de calcul pour tout l’océan est le « même » que celui du petit morceau

# Partie III

## Enjeux de la modélisation de l'océan

# ENJEUX de la MODELISATION de l'OCEAN

Avant les « révolutions » des années 1990-2000:

Peu d'observations (océan mal connu)

Puissance de calcul limitée

L'enjeu principal de la modélisation était la recherche fondamentale

Génération de connaissances nouvelles

Compréhension de processus océaniques et de leurs interactions

Depuis les années 2000, les enjeux « sociétaux » se sont multipliés .....

# Enjeux de la Modélisation de l'Océan au 21<sup>ème</sup> siècle

- **Recherche fondamentale**

  - Génération de connaissances nouvelles

  - Compréhension fine des processus océaniques et de leurs interactions

- **Océanographie opérationnelle**

  - Description en temps réel de l'état instantané de l'océan

  - Prévision de son évolution à court et moyen terme

- **Climat**

  - Interprétation des observations « climatiques »

  - Prévision des changements climatiques

  - Etudes d'impact



# Enjeux de la Modélisation de l'Océan au 21<sup>ème</sup> siècle

- **Recherche fondamentale**

  - Génération de connaissances nouvelles

  - Compréhension fine des processus océaniques et de leurs interactions

- **Océanographie opérationnelle**

  - Description en temps réel

  - Prévision

- **Climat**

  - Interprétation des observations « climatiques »

  - Prévision des changements climatiques

  - Etudes d'impact

**Le modèle utilisé est-il le même selon les enjeux?**

**A priori NON**

**Le modèle utilisé est-il le même selon les enjeux?**

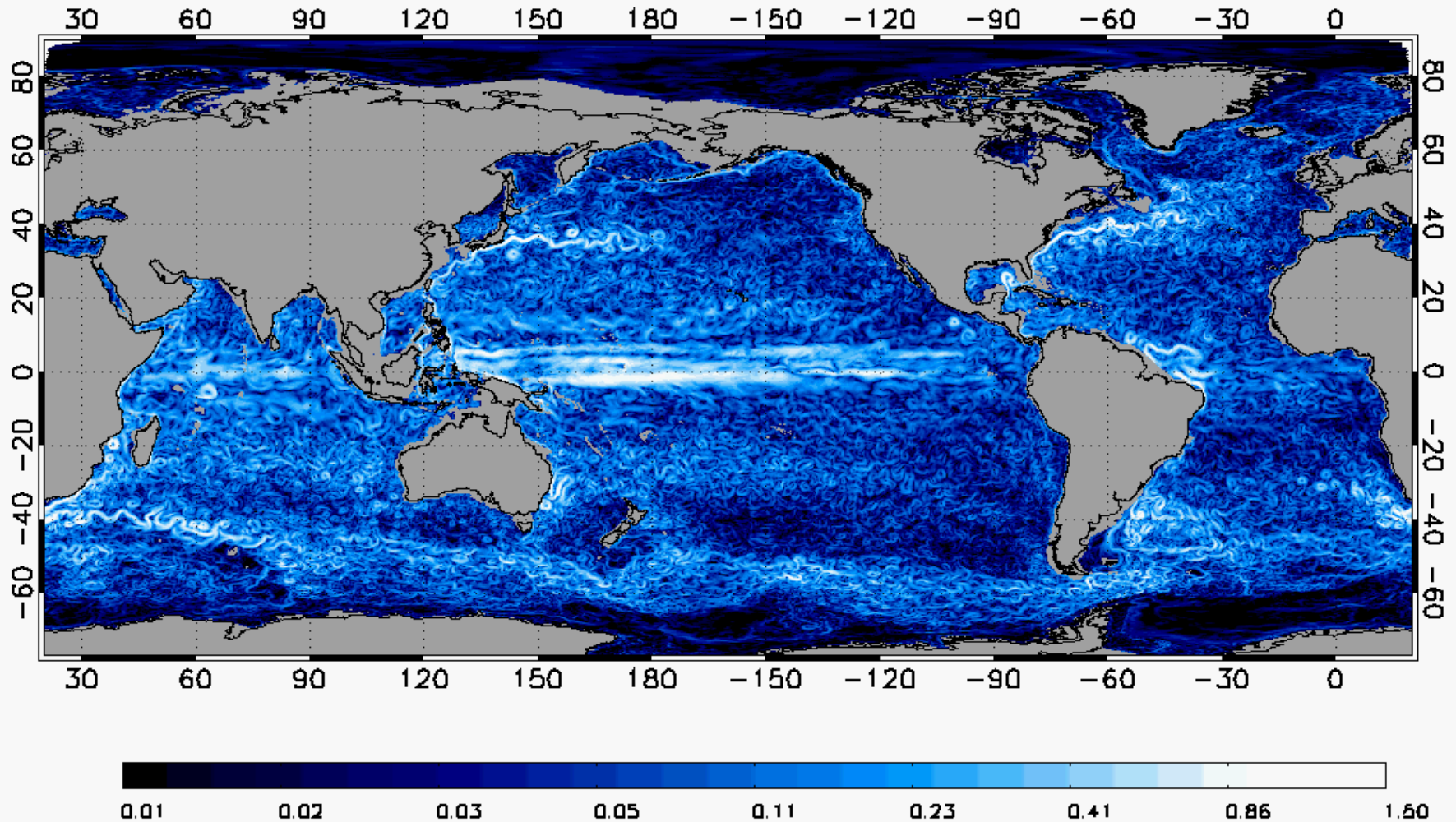
**Exemple: Climat / Opérationnel**

# Exemple: Climat / Opérationnel

**Opérationnel:** prévision du «temps qu'il fait» dans l'océan

**Climat:** prévision des changements à long terme (30 ans) dans le transport méridien de chaleur et sa redistribution à l'échelle globale

GLOBAL 1/4 REANA. 20030103 module velocity 97 m



# Exemple: Climat / Opérationnel

Modèles de climat

Modèles Opérationnels

Résolvent les mêmes équations  
sur des grilles de calcul différentes

100 à 200 km  
100 à 1000 ans

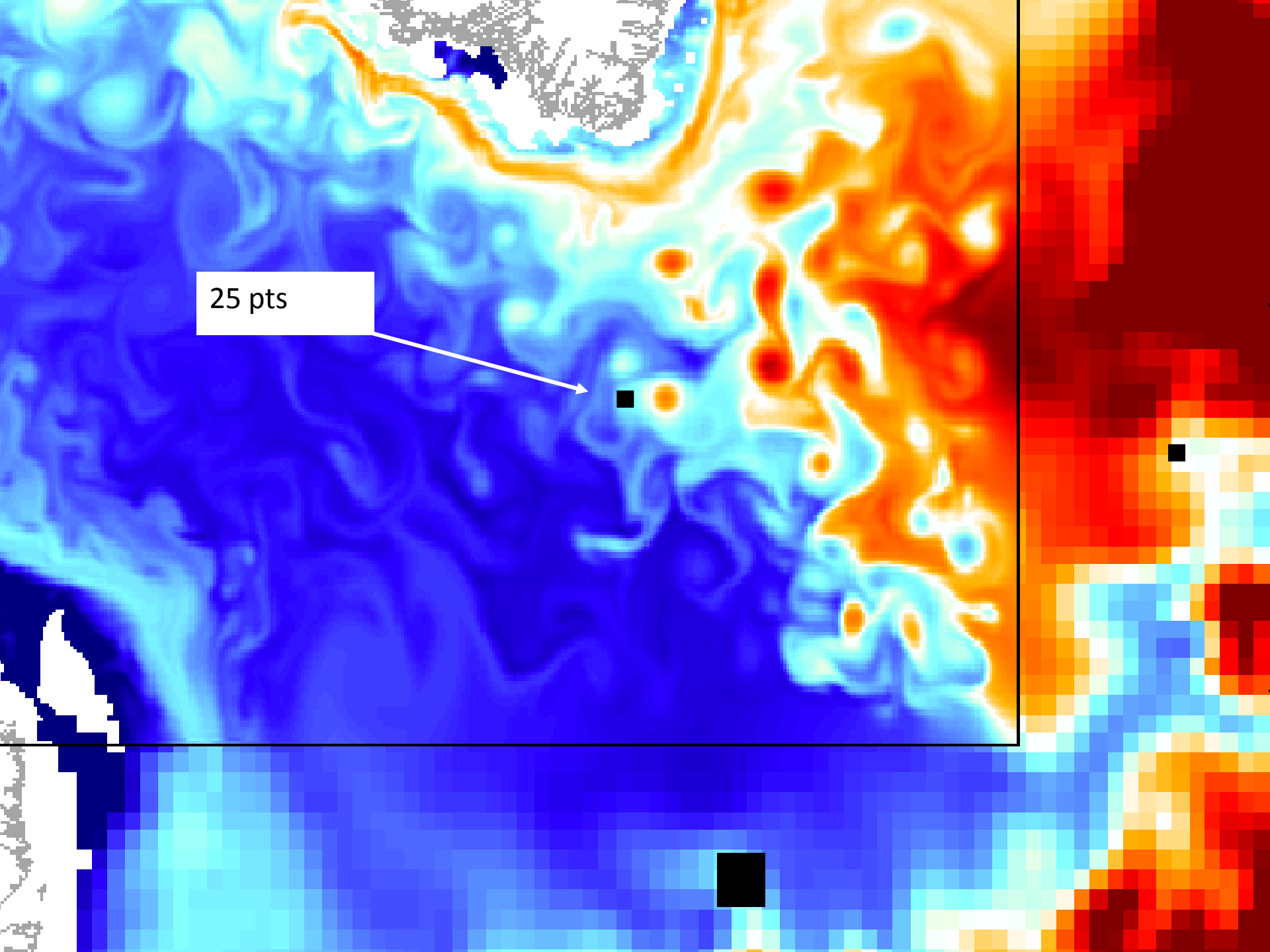
5 à 10 km  
1 à 10 ans

Conséquences

Les processus de « taille » plus petite que la « maille »  
ne seront pas représentés

Ici, le « temps océanique »  
(tourbillons de méso-échelle)

ici , les très petites échelles du  
mouvement

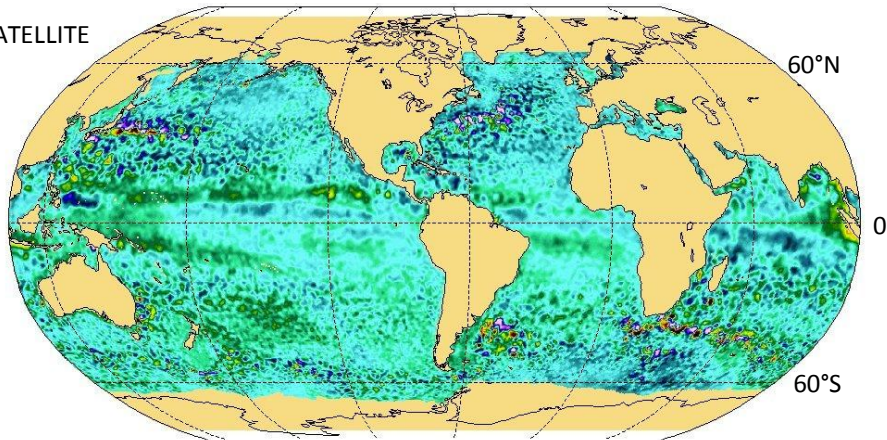


25 pts



240°W 120°W 0°E

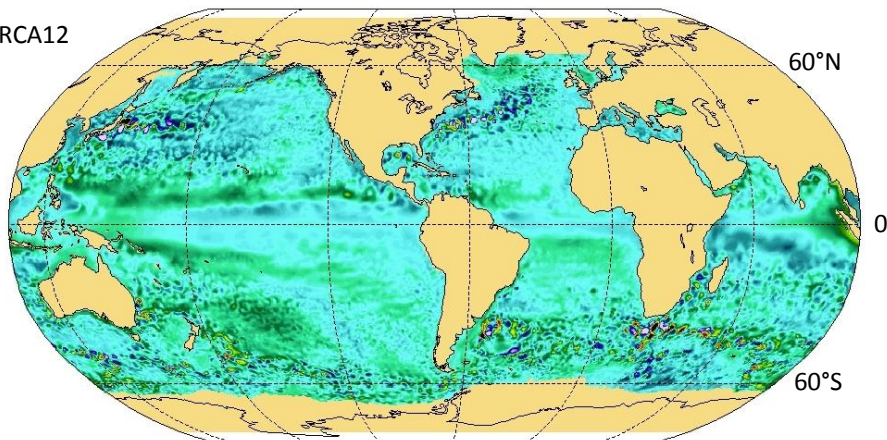
SATELLITE



# Anomalies de dénivellation de surface le 19 Mai 2005

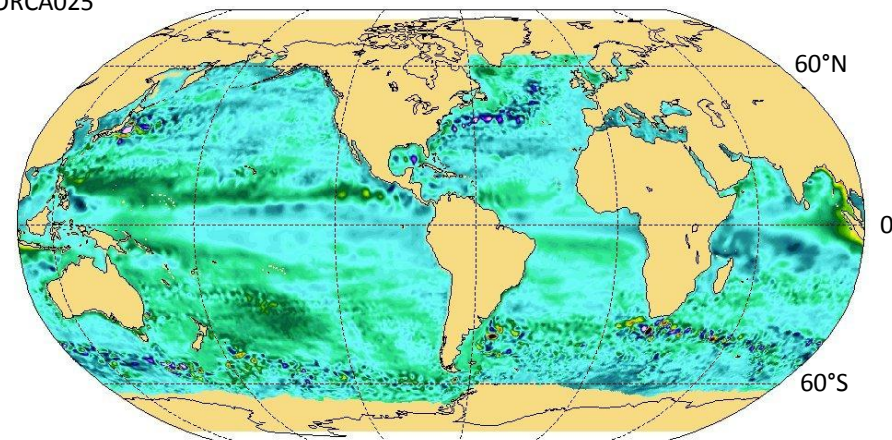
Les sorties du modèle ont été co-localisées avec le produit satellite AVISO

ORCA12

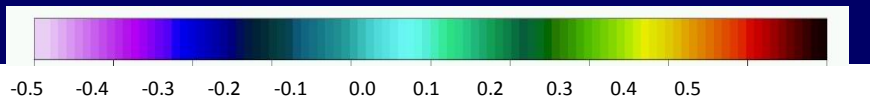
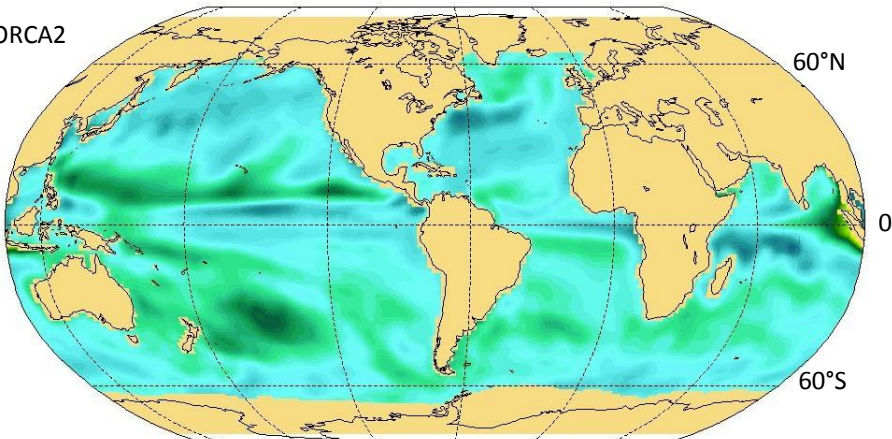


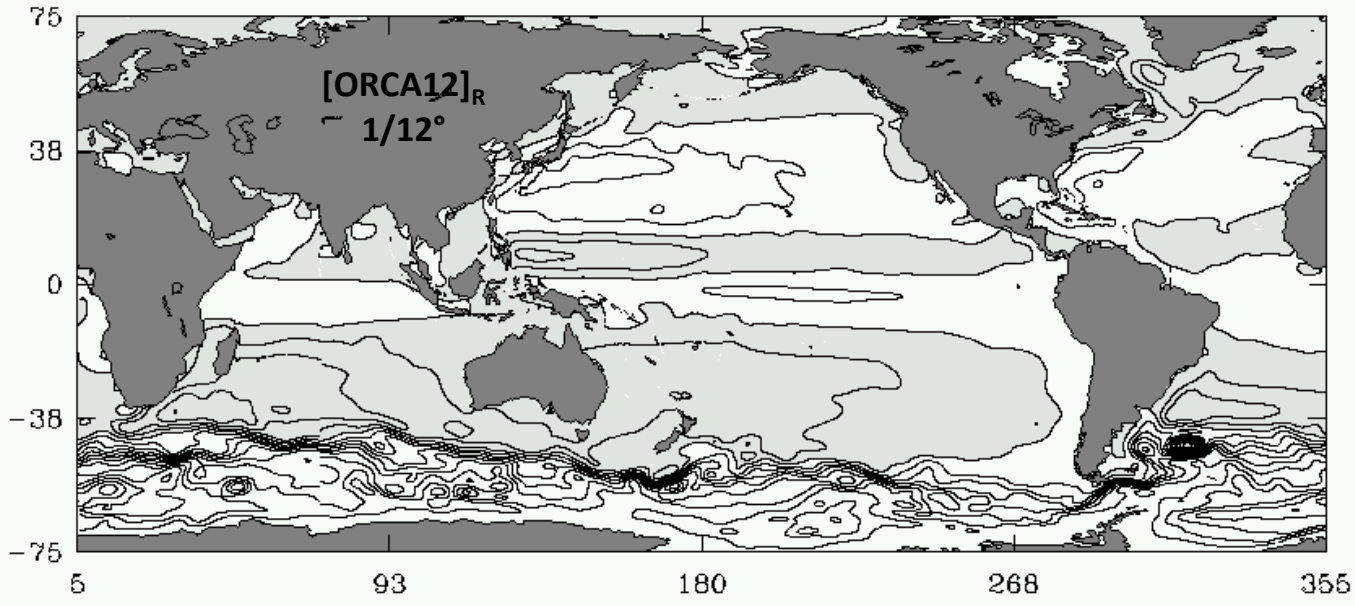
ORCA025

240°W 120°W 0°E

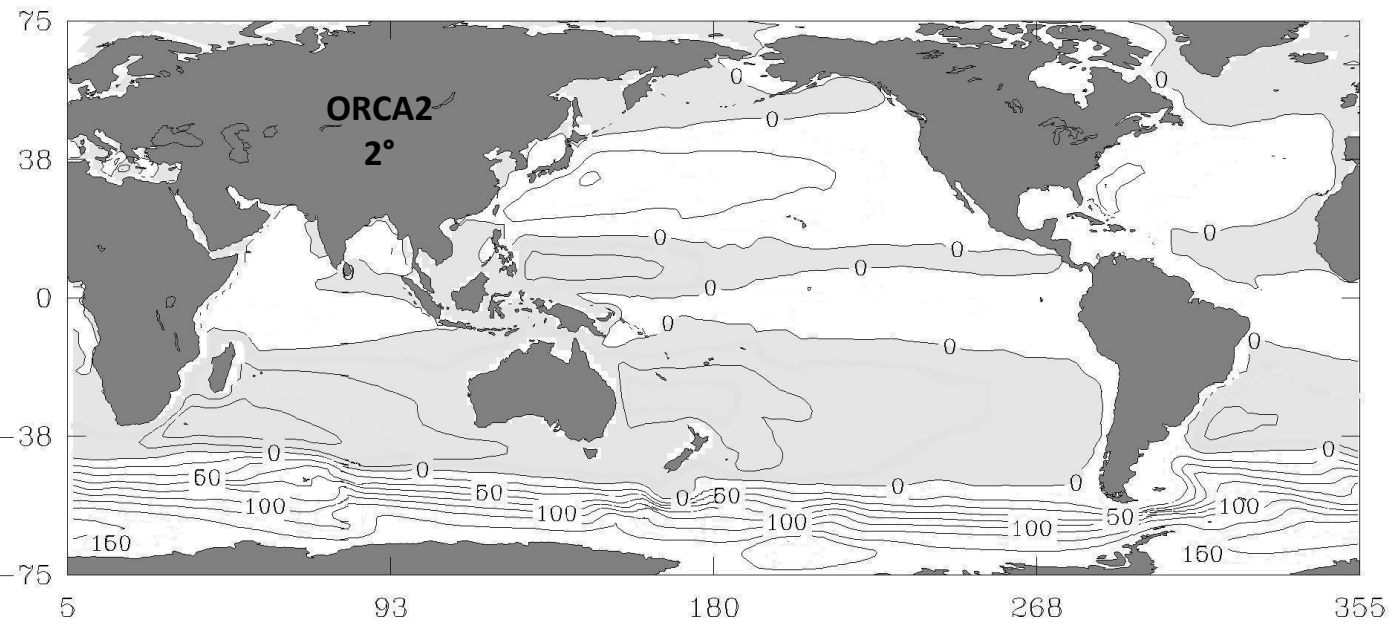


ORCA2





CI: 20 SV



CI: 20 SV



# Partie IV

## Etat de l'Art & Prospective

**La modélisation à très haute résolution  
pour le climat?**

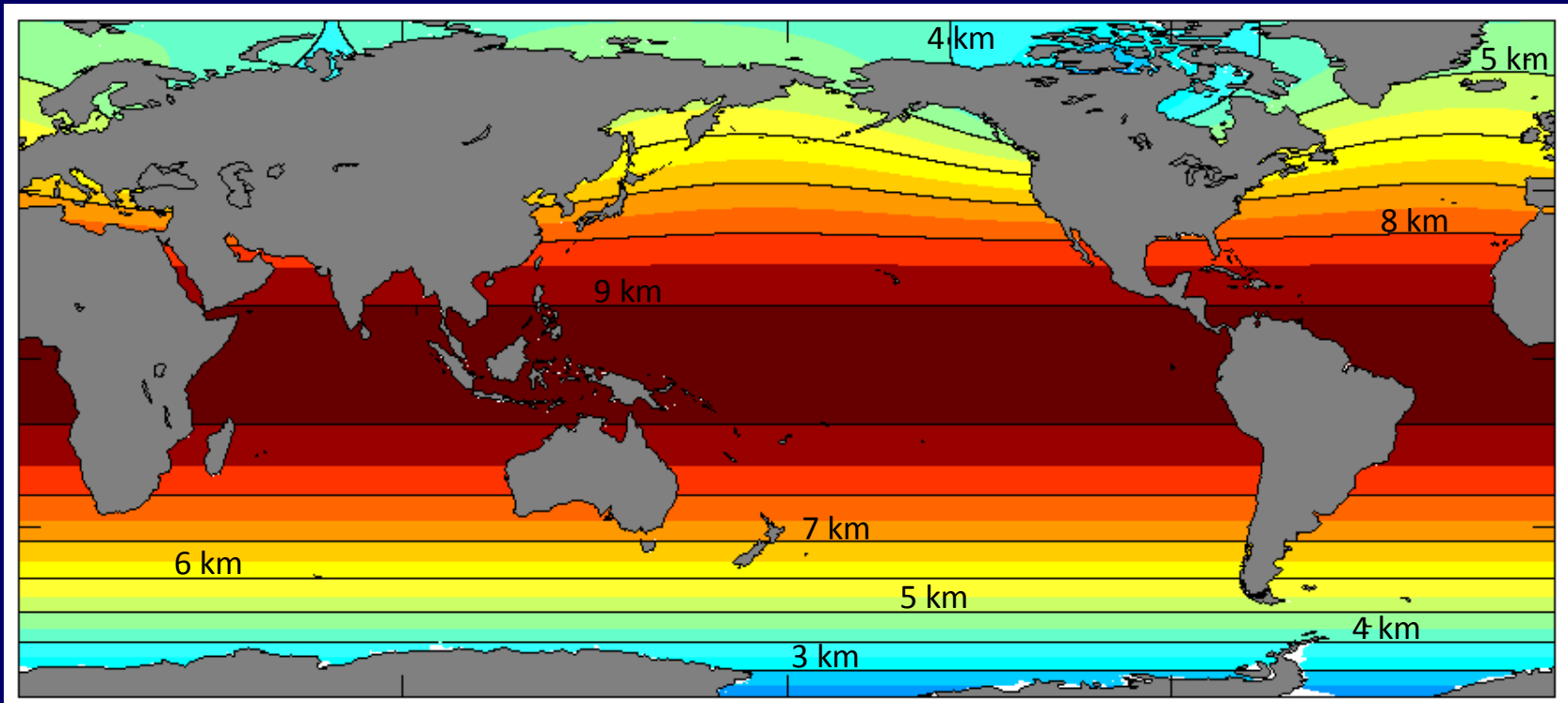
**Vers une convergence Climat et  
Opérationnel?**

# ORCA12: Le modèle opérationnel à 1/12° de MERCATOR-Océan et du consortium DRAKKAR (recherche Climat).

Grille horizontale : de 9km à 3 km Grille verticale: 46, 50 or 75 niveaux

Nb de points de calcul : 4326x3061x46 (~610 millions à ~1 milliard)

Pas de temps : 360 sec.



Taille de la grille du modèle en km

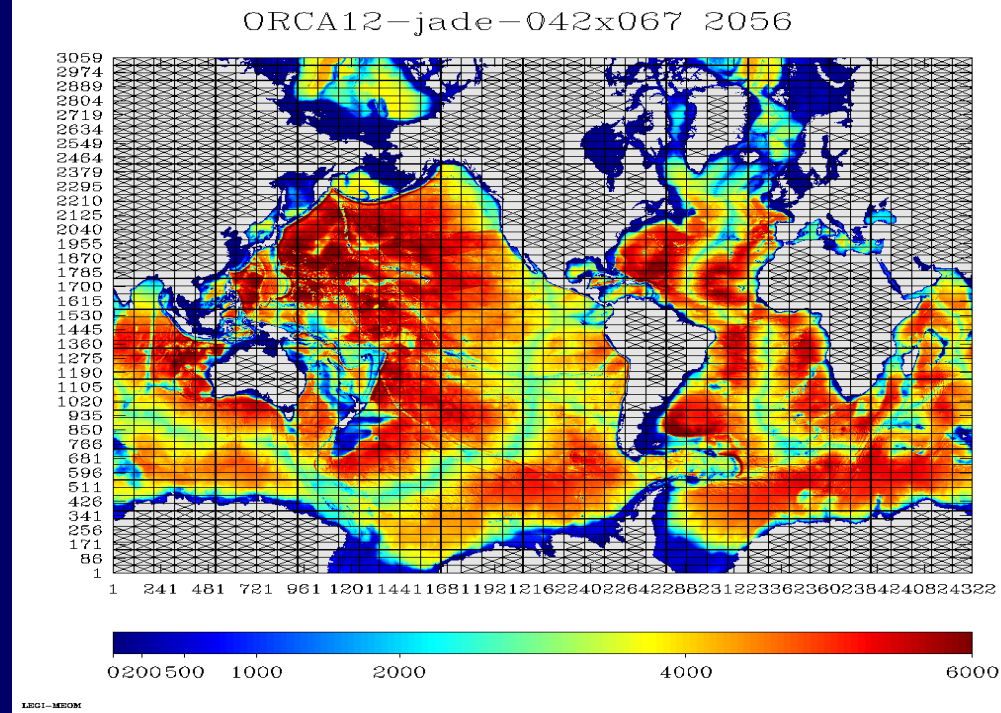
# ORCA12: le coût

Découpage en 2056 morceaux d'océans

Utilisation de 2056 processeurs de JADE2

Calcul de la solution du modèle sur pour chaque morceau en même temps

Reconstitution de la solution globale

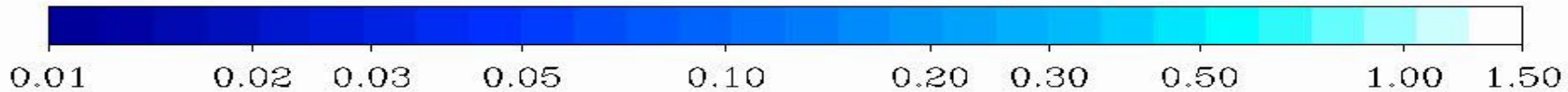
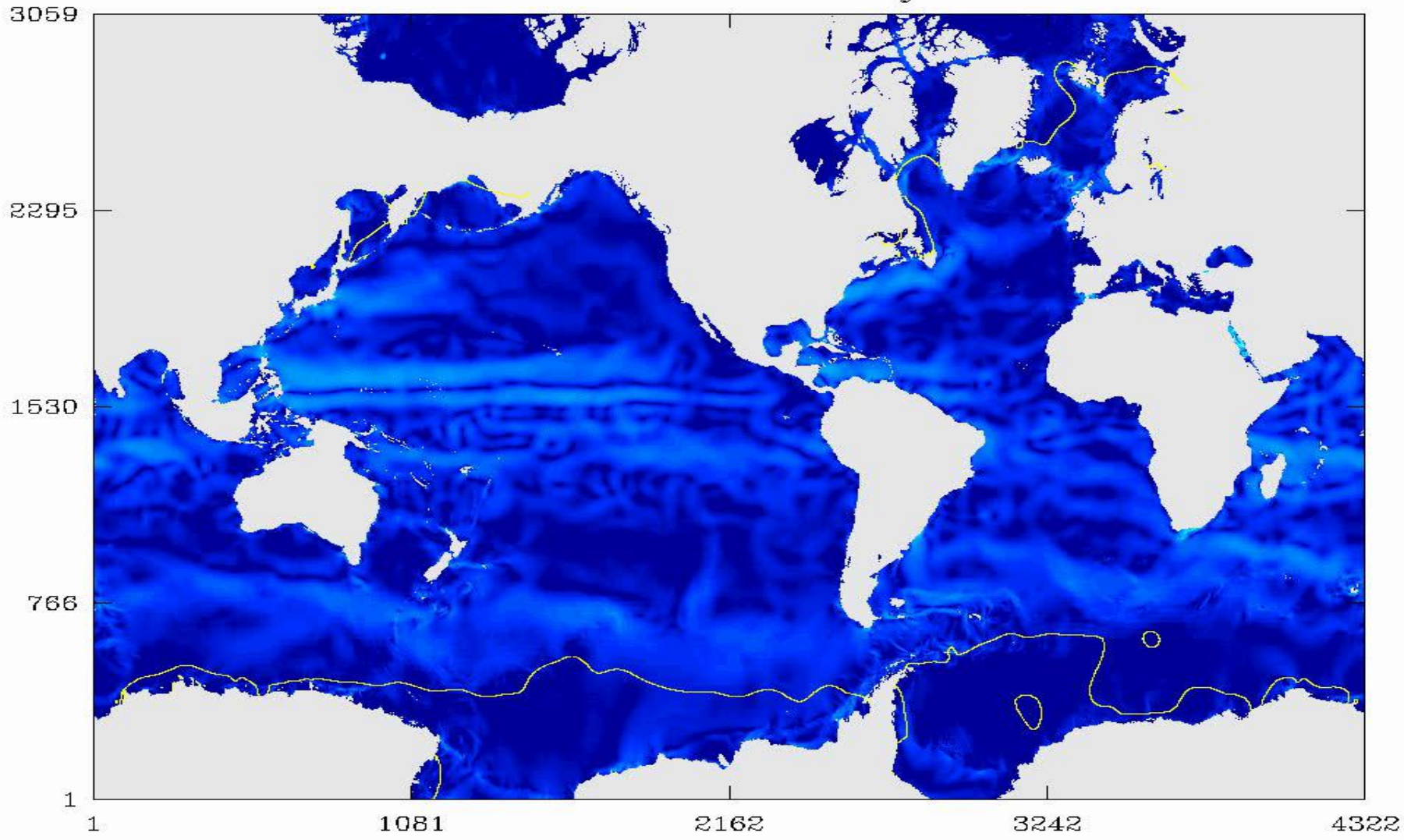


## Bilan pour 50 ans de simulation:

- 2 mois en machine
- 2 750 000 heures de cpu
- 170 TerraOctets

**Possibilité de réaliser des simulations de l'ordre de 100 ans**

ORCA12.L46-MAL84 93.59m y1978m01d01



# ORCA12: Le modèle opérationnel à 1/12° de MERCATOR-Océan et du consortium DRAKKAR (recherche Climat).

Reste un modèle « coûteux »

Exige une « équipe de pilotage » professionnelle et entraînée

Modèle nouveau, dont la sensibilité dans l'espace des paramètres mal connue

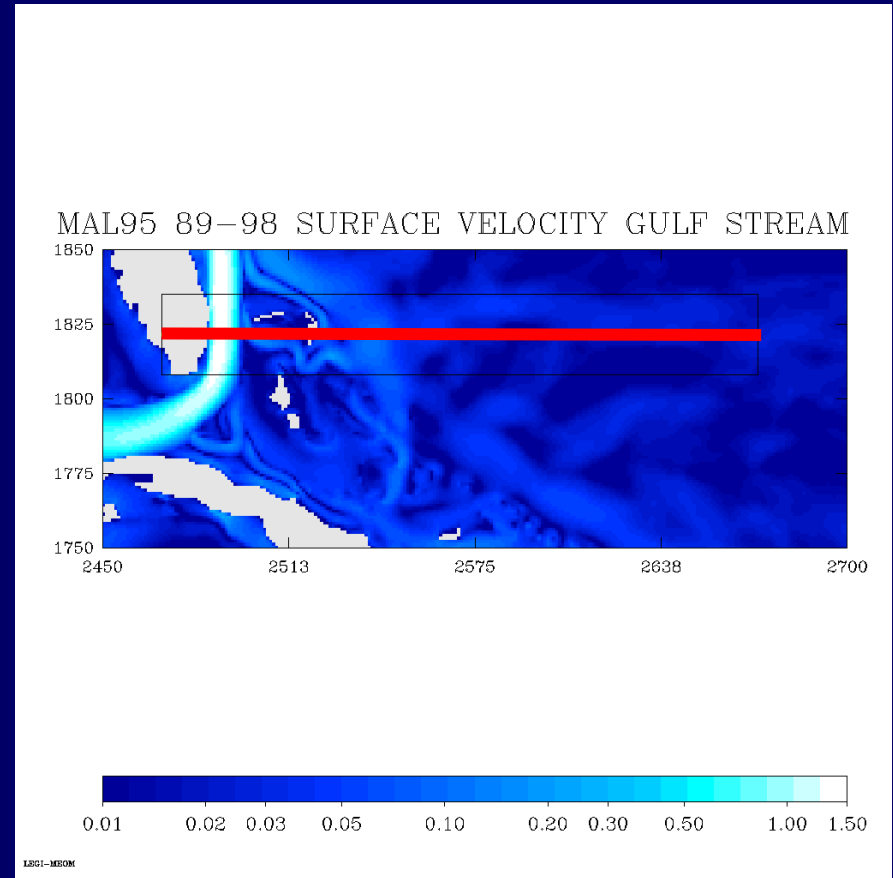
Le futur (à 10-15 ans) des modèles de climat?

# ORCA12: Sensibilité aux paramètres « numériques »

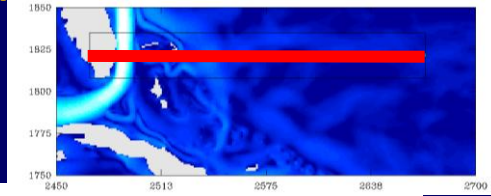
Deux paramètres particuliers

Le schéma numérique pour  
l'advection de quantité de  
mouvement  
(Calcul des vitesses)

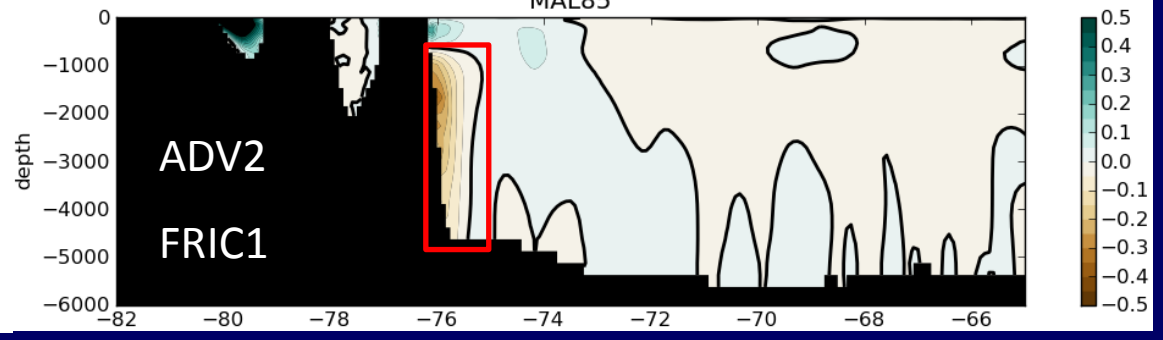
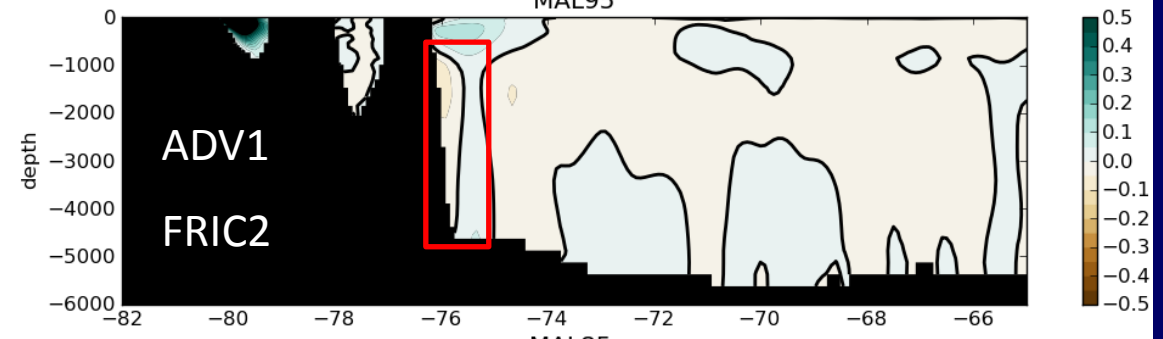
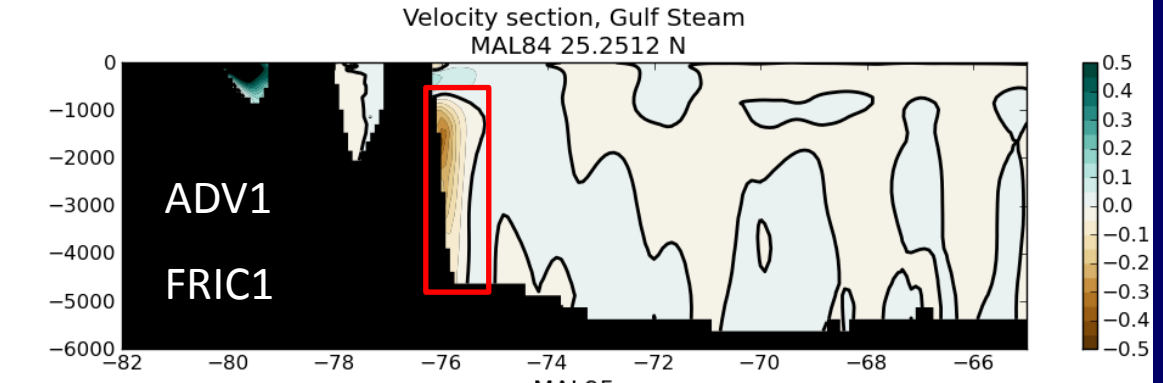
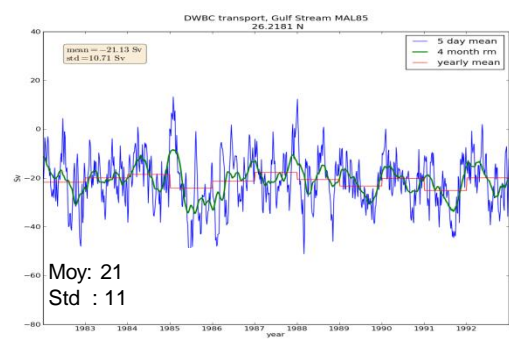
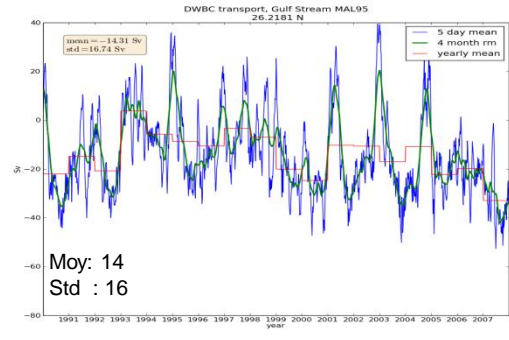
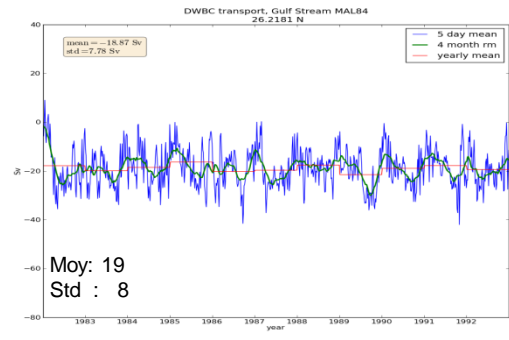
La friction à la côte



# ORCA12: Sensibilité aux paramètres « numériques »



Unité: million de m<sup>3</sup>/s



m/s



# Perspectives

**Le Couplage avec l'atmosphère des  
modèles d'océan à très haute résolution**



# Vitesse des courants de surface

## Films:

Film Réanalyses océaniques:

MERCATOR/LEGI-CNRS

Romain Bourdallé-Badie, Nicolas Ferry, Albanne Lecointre, Jean Marc Molines

Film ORCA12:

LEGI-CNRS

Albanne Lecointre, Jean Marc Molines

Film Cyclones tropicaux

LOCEAN-IPSL

Sébastien Masson