

Simulation
de la
circulation océanique globale
au 21^{ème} Siècle:
enjeux et état de l'art



Partie I: Définitions

**Partie II: Révolutions de la fin du 20^{ème}
et du début du 21^{ème}**

Partie III: Enjeux

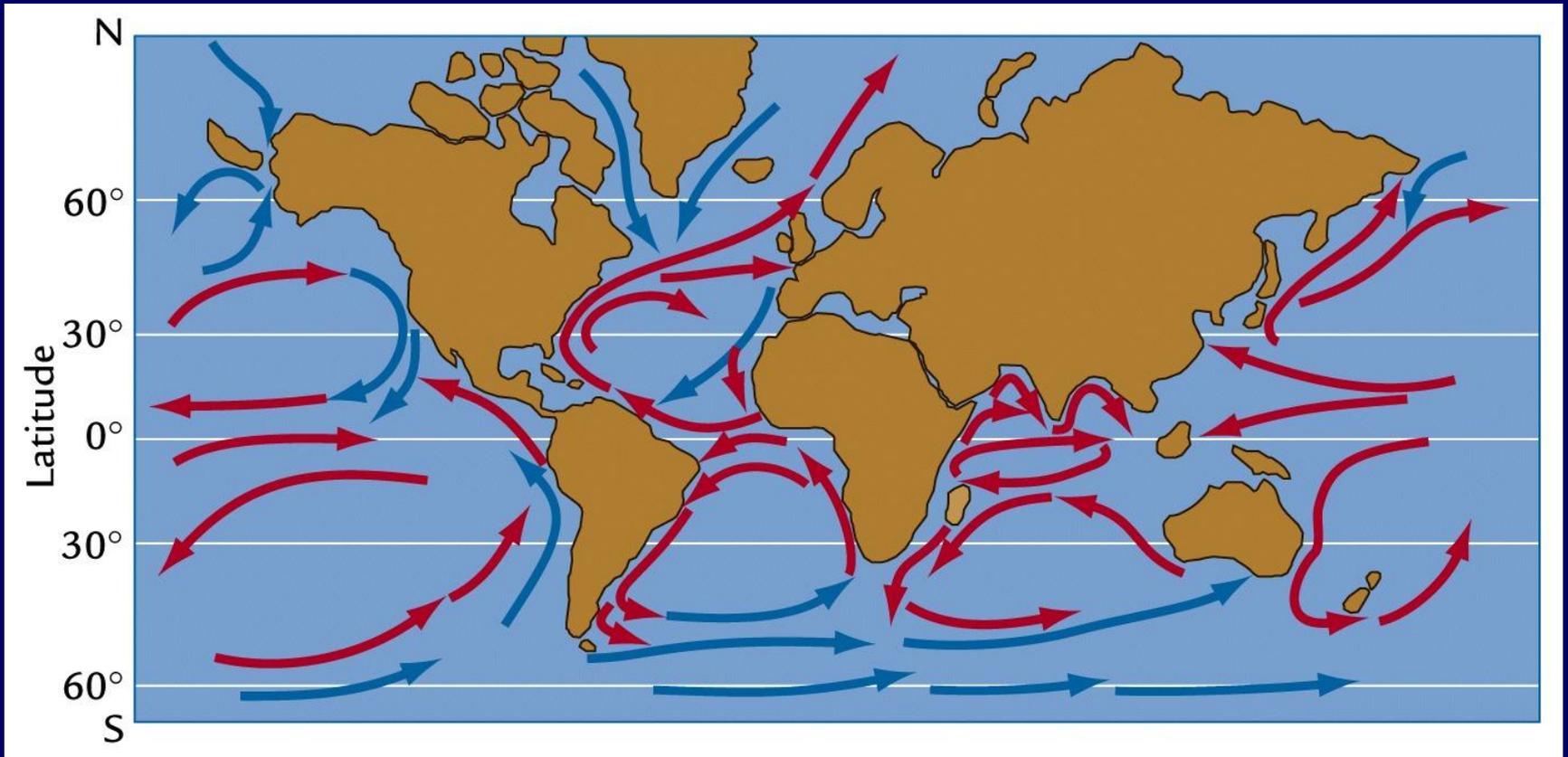
Partie IV: Etat de l'art et prospective

Partie I

Définitions

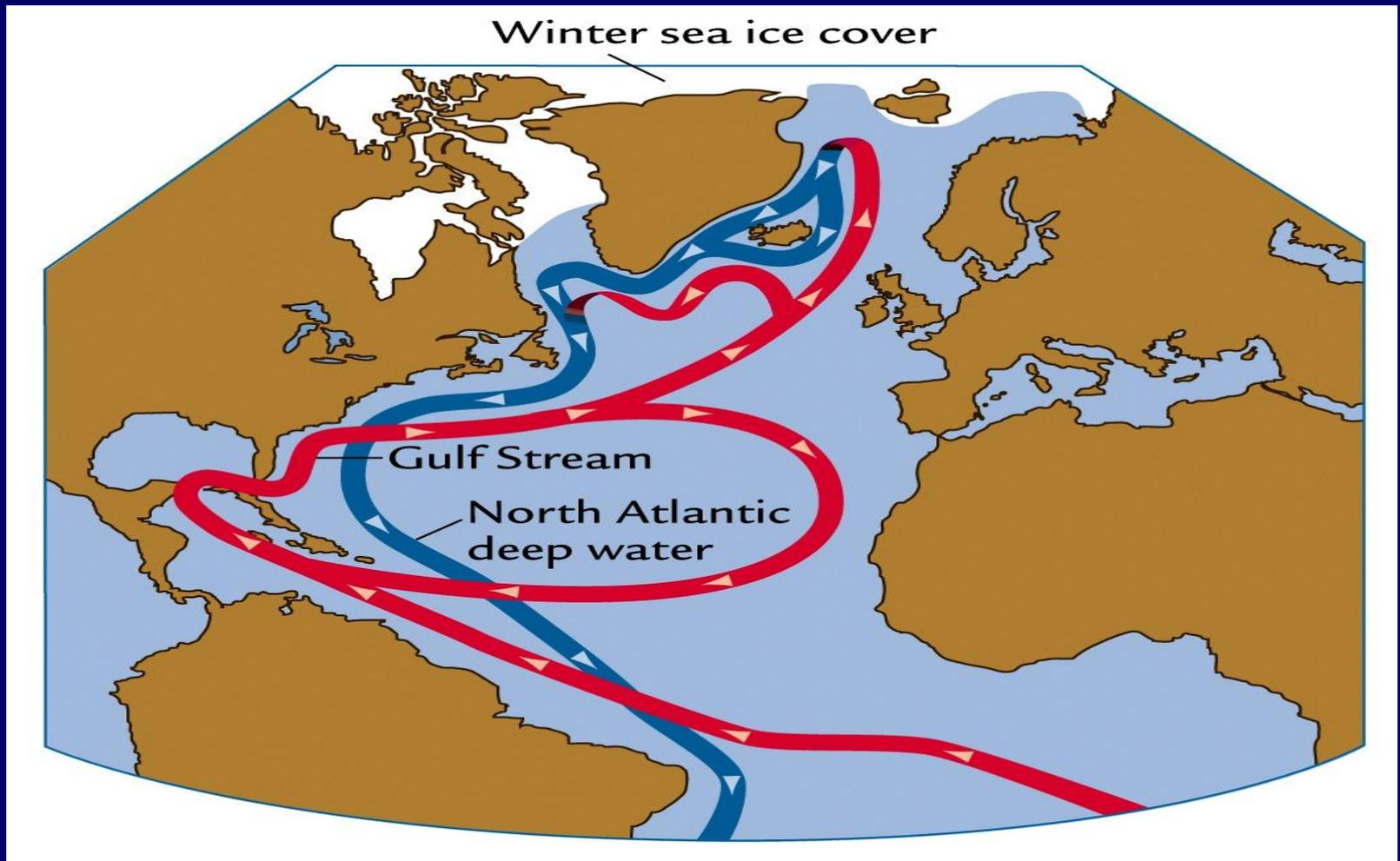
Simulation
de la
circulation océanique globale
au 21^{ème} Siècle:
enjeux et état de l'art

circulation océanique globale?



Courants de surface

circulation océanique globale?



Courants profonds et leur liens avec la surface

Simulation?

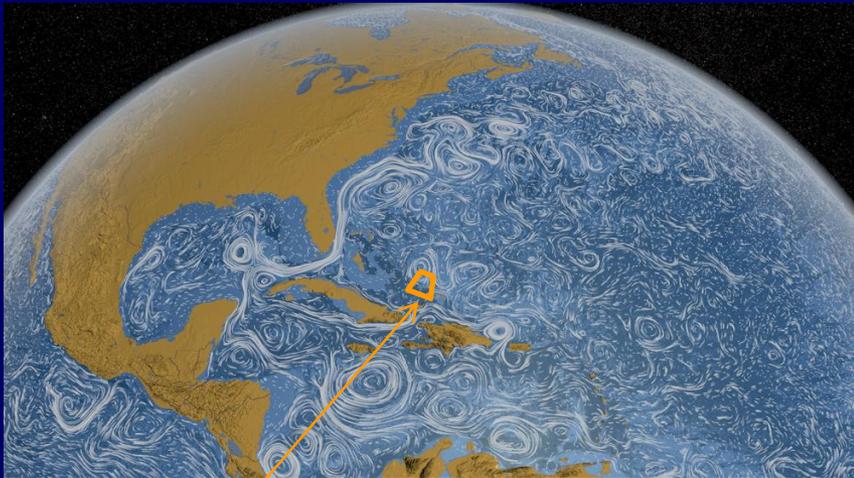
Représentation du comportement d'un système réel (l'océan)

au moyen d'un **modèle** matériel

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

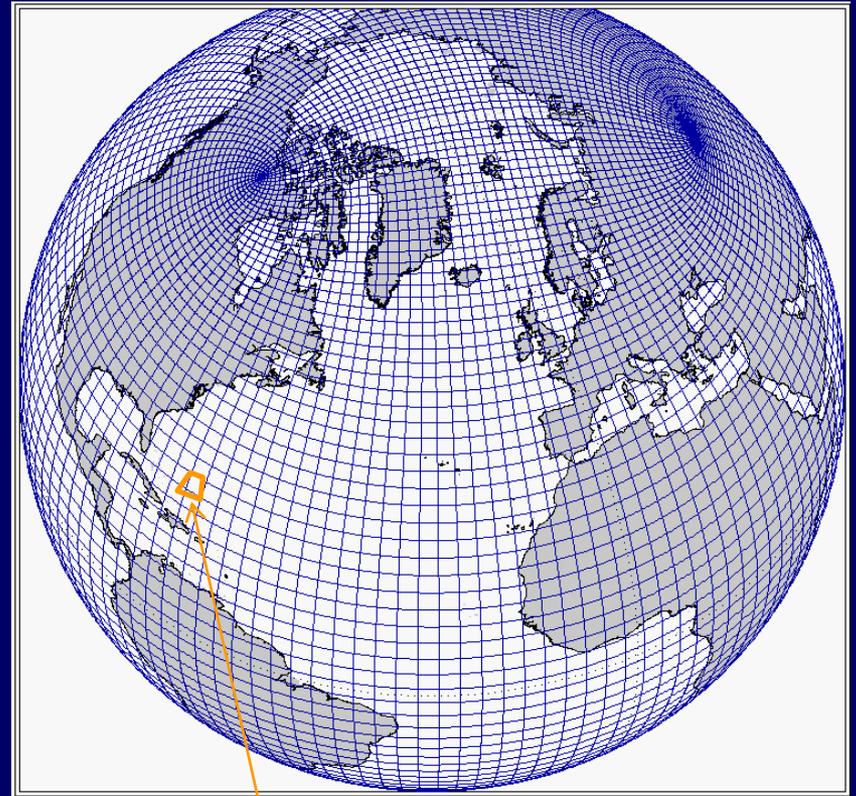
Simulation?

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

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

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

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

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

Equations Primitives pour l'Océan

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

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

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

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

$$+ D_v + F_v$$

IMAGE
MATHÉMATIQUE DE LA
CIRCULATION
Océanique

$$\vec{\nabla}$$

$$\rho =$$

$$\vec{u} = ($$

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^{ème} Siècle:
enjeux et état de l'art



Partie II

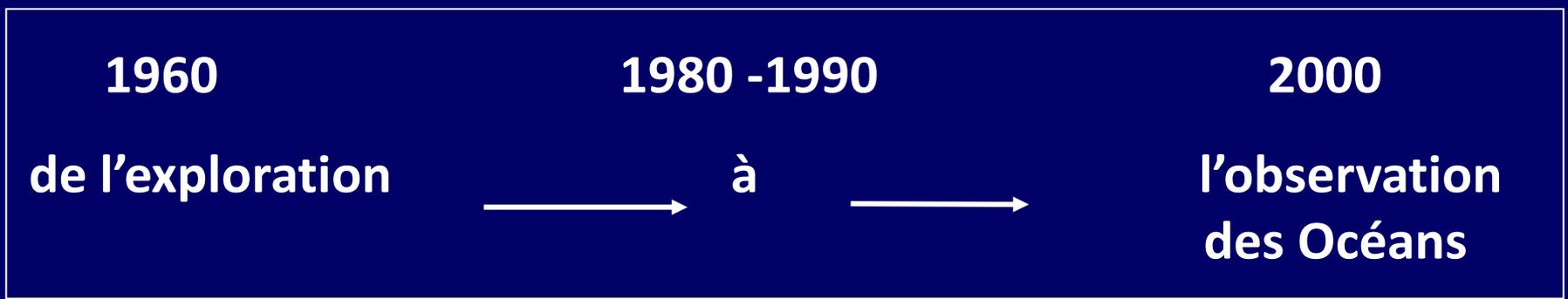
**Révolutions
dans les sciences océaniques
de la fin du 20^{ème} et du début du 21^{ème}**

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

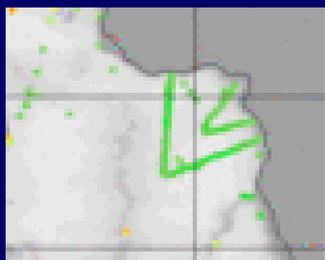
- **L'Observation Spatiale**
- **L'Observation In-situ**
- **Le Calcul Haute Performance**

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

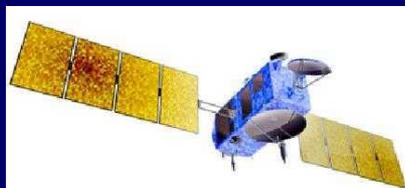


Navires



Sections hydrographiques

Satellites



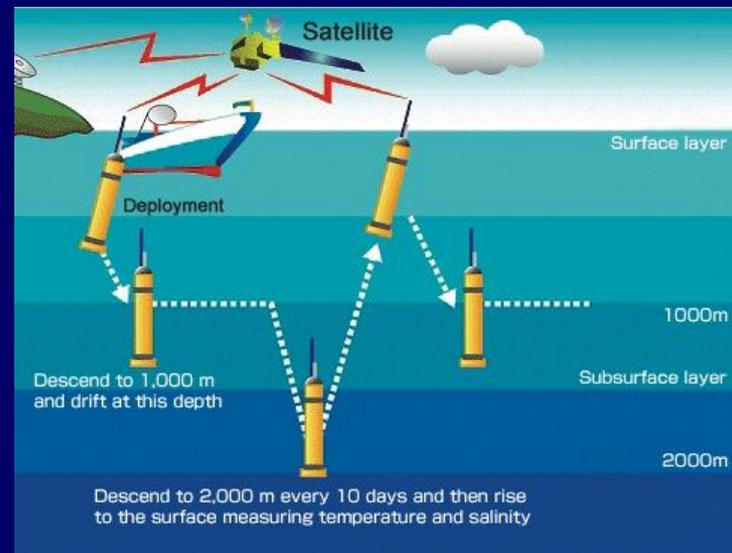
Altimétrie

Topex/Poseidon, ERS, JASON

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

Flotteurs autonomes ARGO

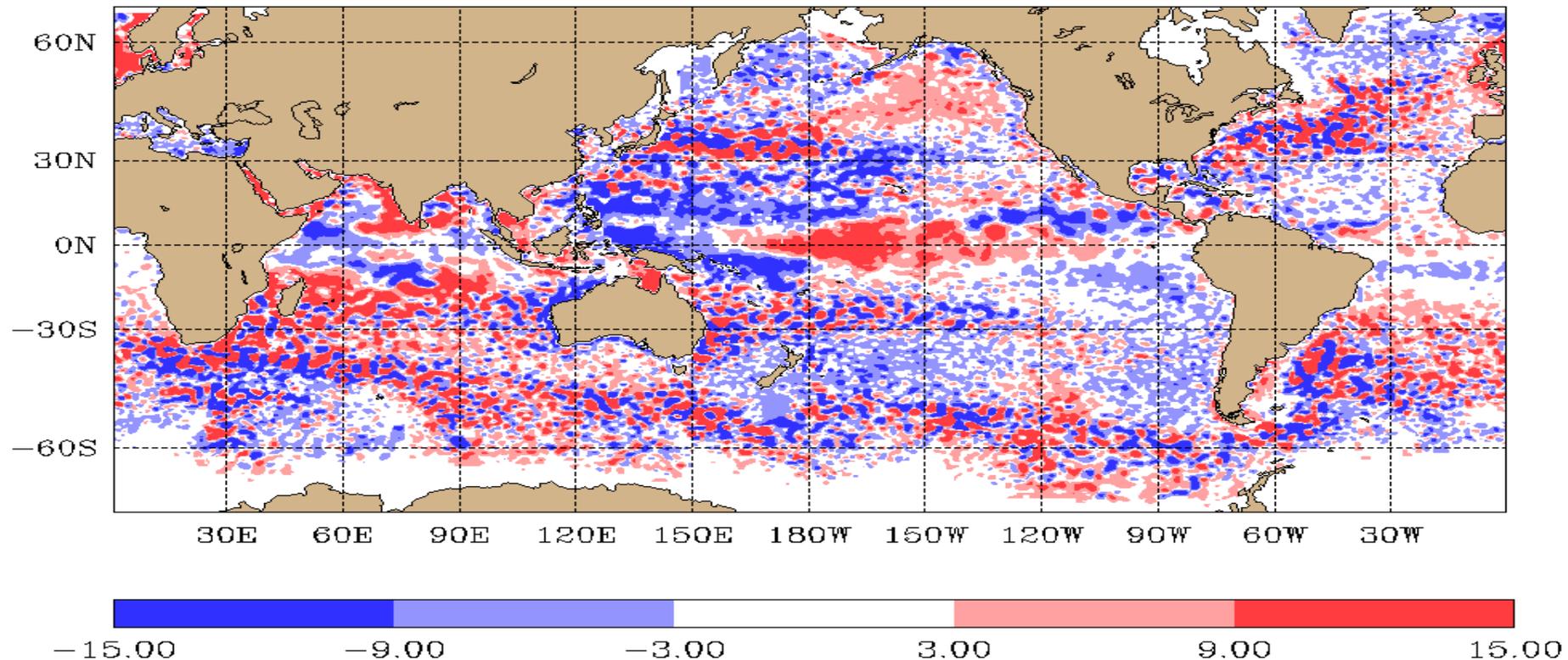
Profils 10m – 2000
chaque 10 jours



1993 Observation Spatiale: Altimétrie

Mesure de la dénivellation de surface océanique

SLA AVISO — 06 / 01 / 1993

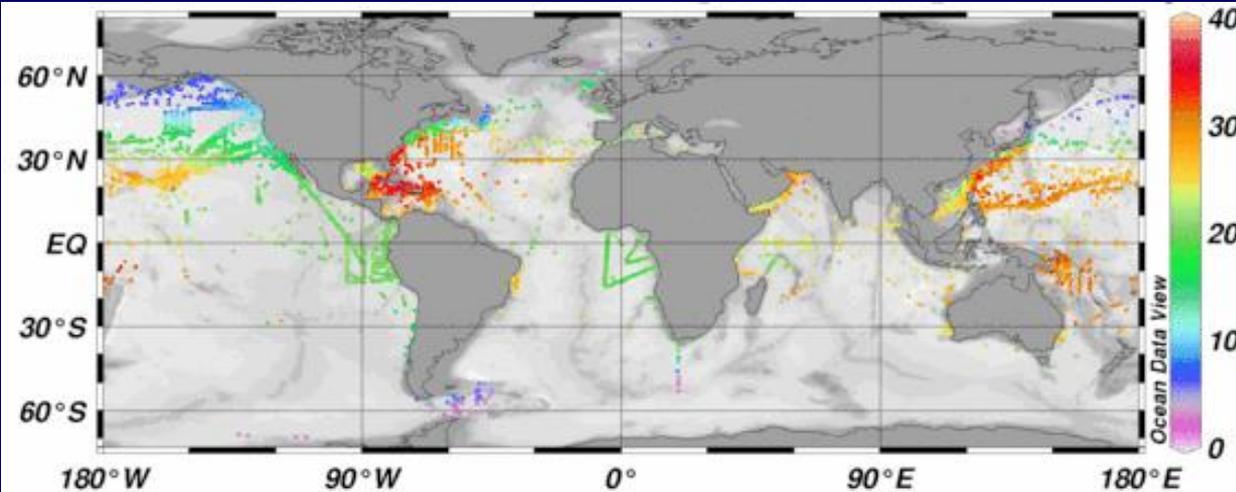


2003 Observation In-situ:

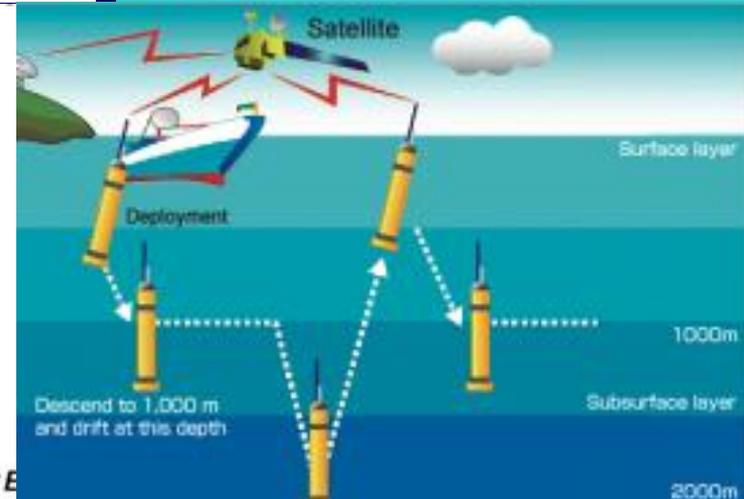
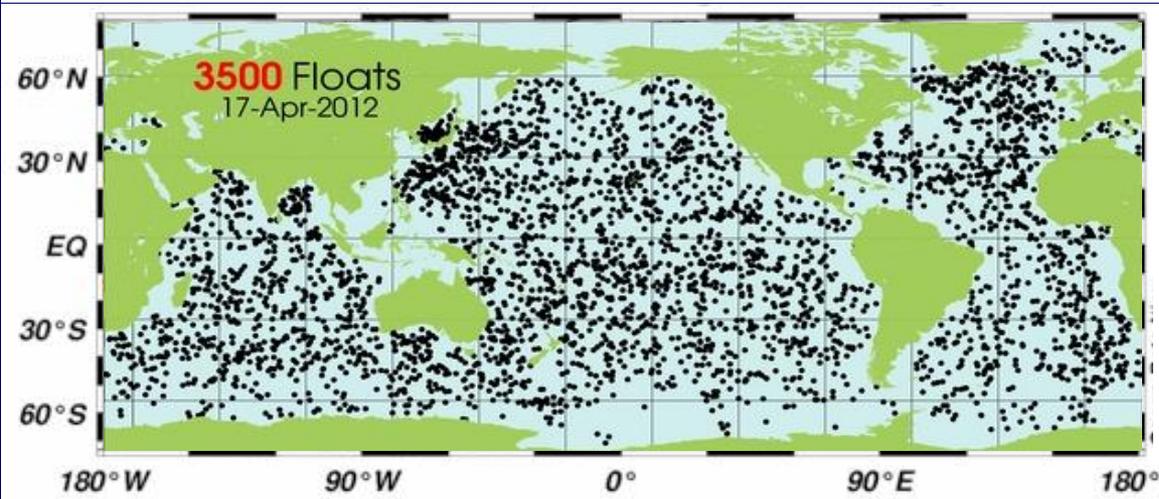


Les flotteurs autonomes « profilant » ARGO

Profils T (50-400m) en 1975

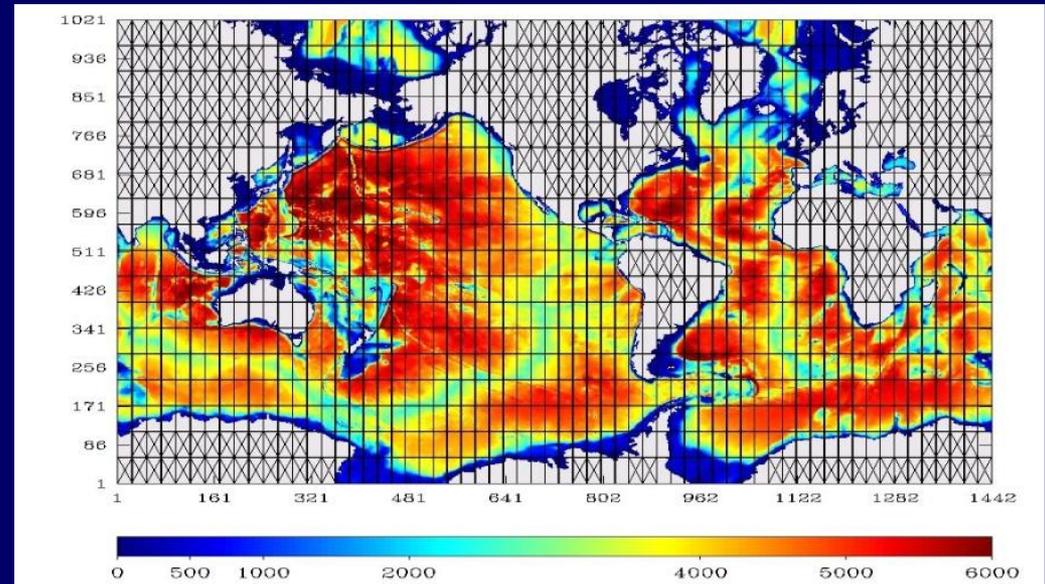


Flotteurs ARGO
~3000 profils 10m-2000m
chaque 10 j



2000 ... Calcul Haute Performance :

Les calculateurs massivement parallèles



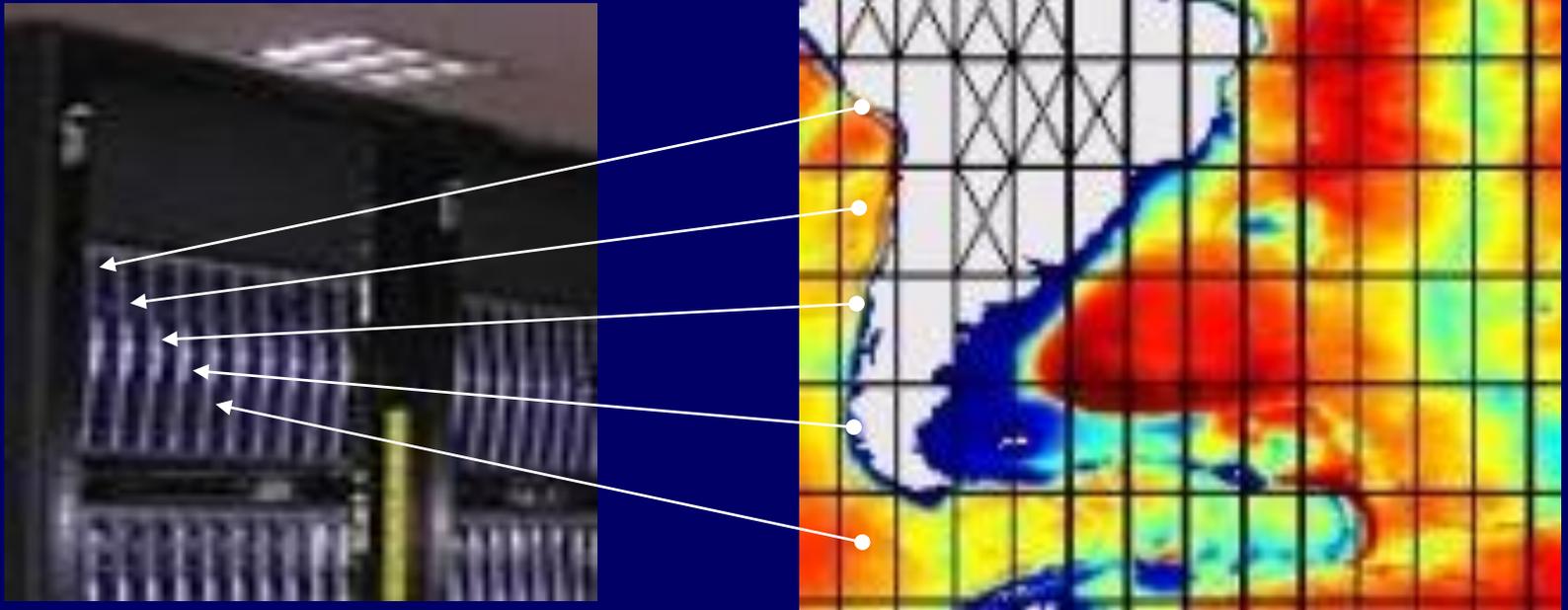
Plus de 10 000 processeurs qui peuvent

- 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^{ème} 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^{ème} 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?

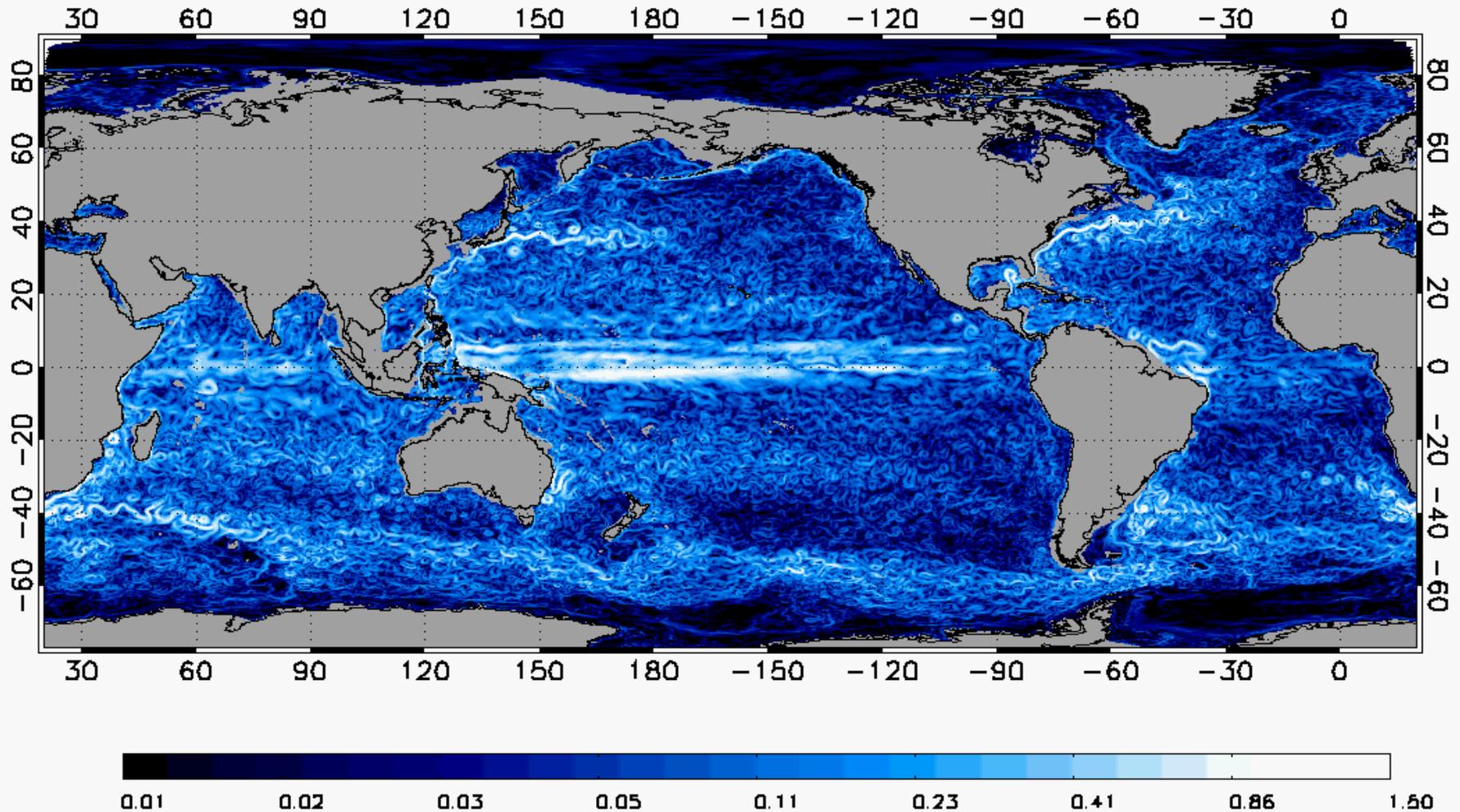
Exemple: Climat / Opérationnel

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

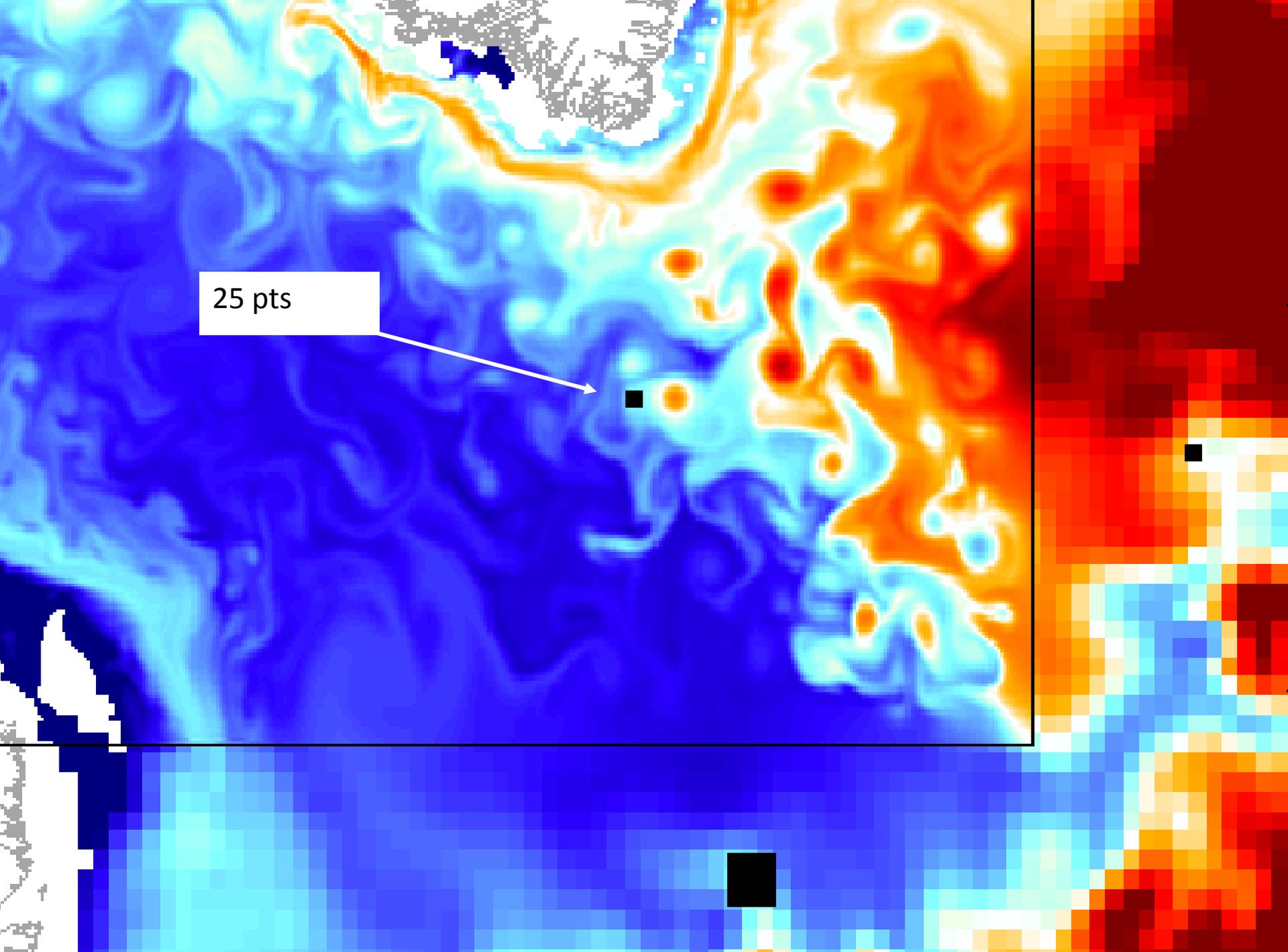
5 à 10 km
1 à 10 ans

Conséquences

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

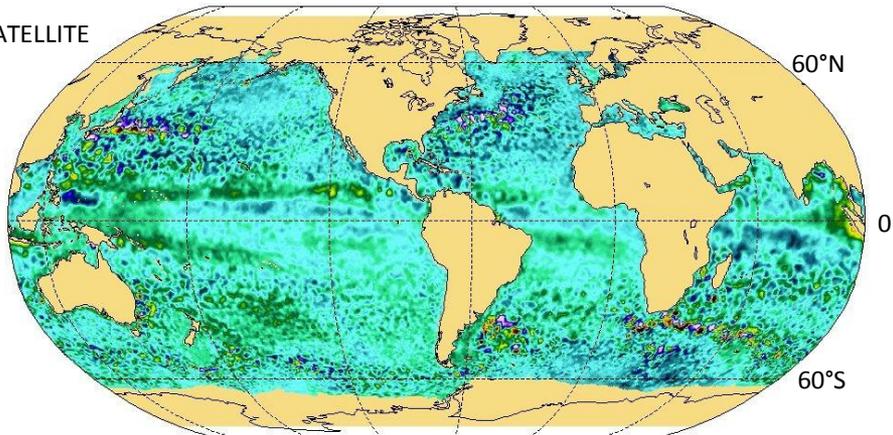
Ici, le « temps océanique »
(tourbillons de méso-échelle)

ici , les très petites échelles du
mouvement



240°W 120°W 0°E

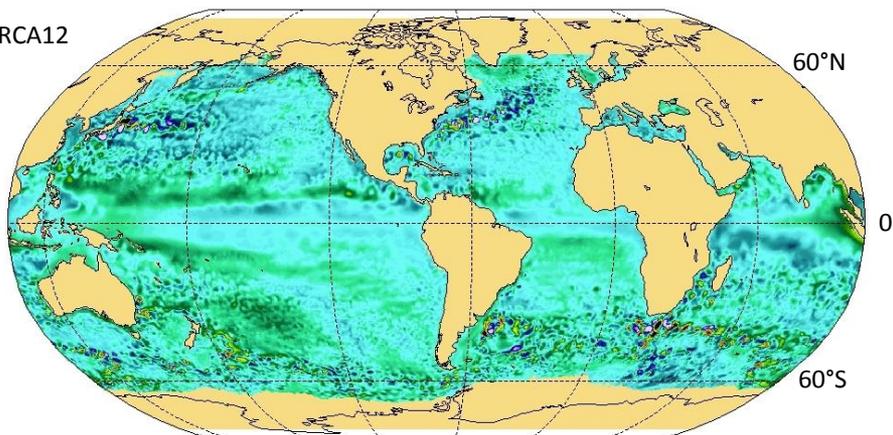
SATELLITE



Anomalies de dénivellation de surface le 19 Mai 2005

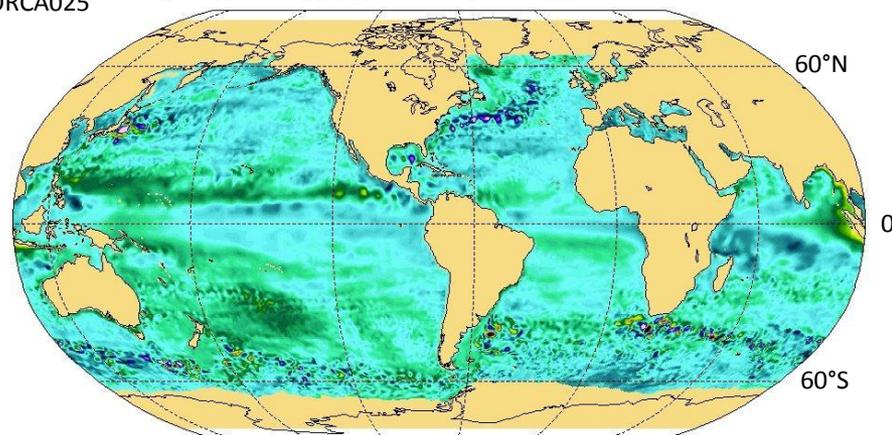
Les sorties du modèle ont été co-localisées avec le produit satellite AVISO

ORCA12

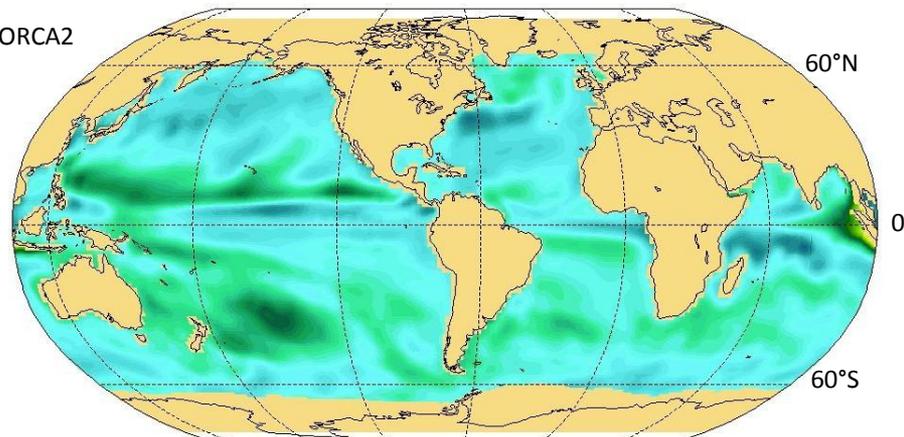


ORCA025

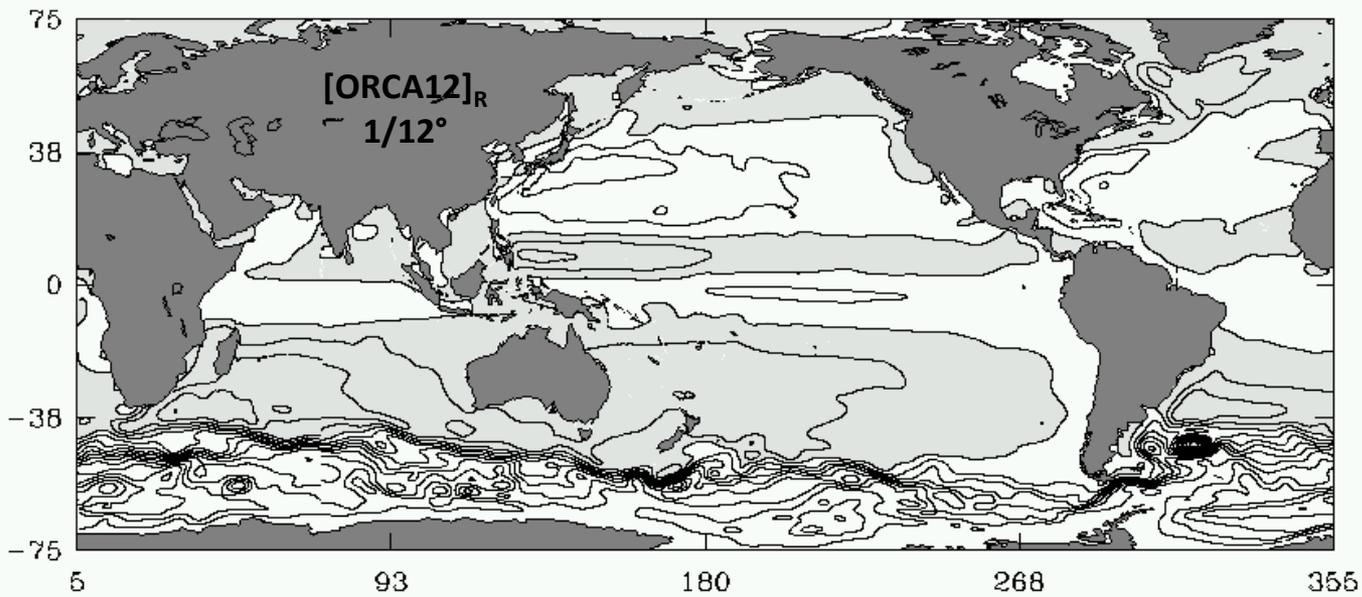
240°W 120°W 0°E



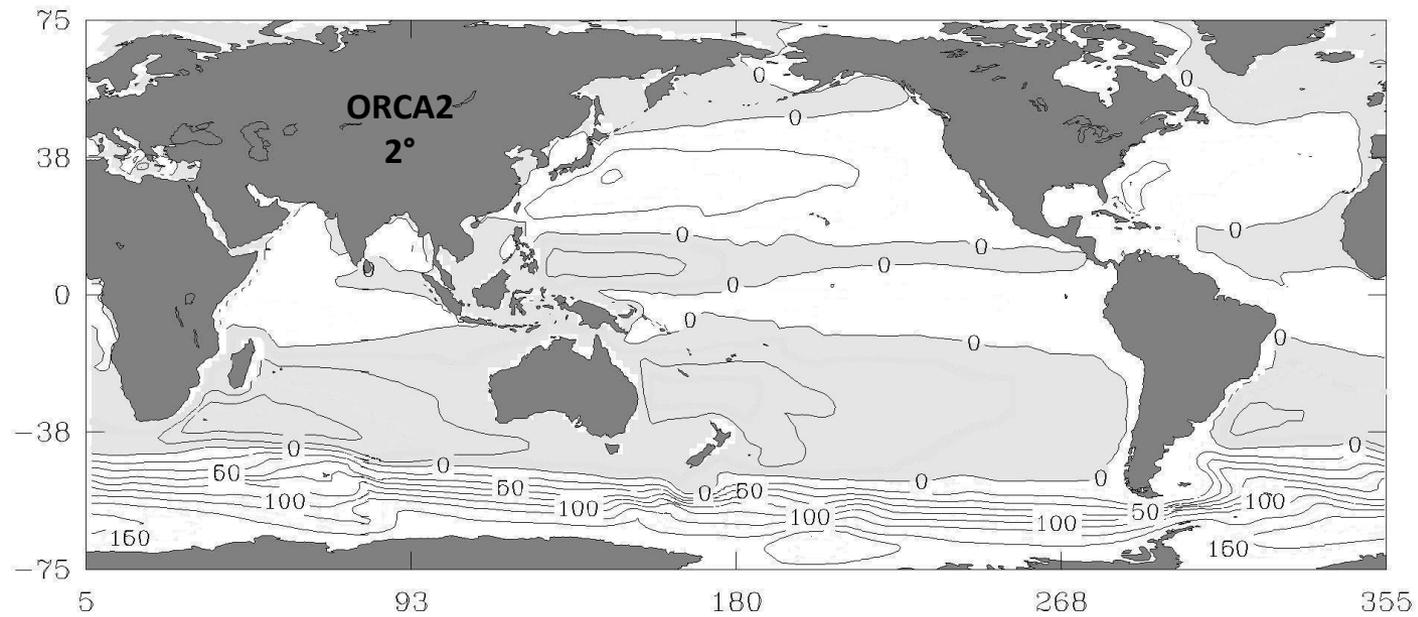
ORCA2



-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5



CI: 20 SV



CI: 20 SV

Partie IV

Etat de l'Art & Prospective

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

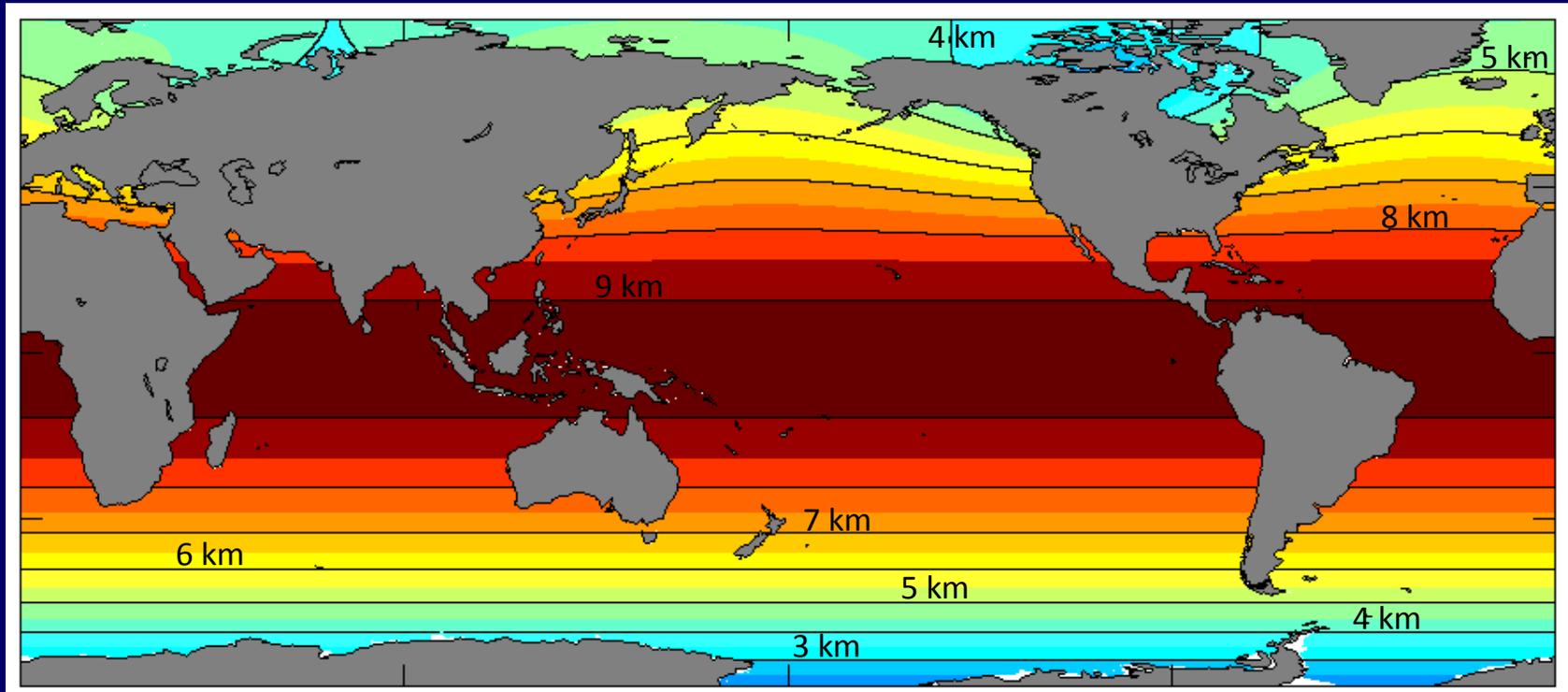
**Vers une convergence Climat et
Opérationnel?**

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

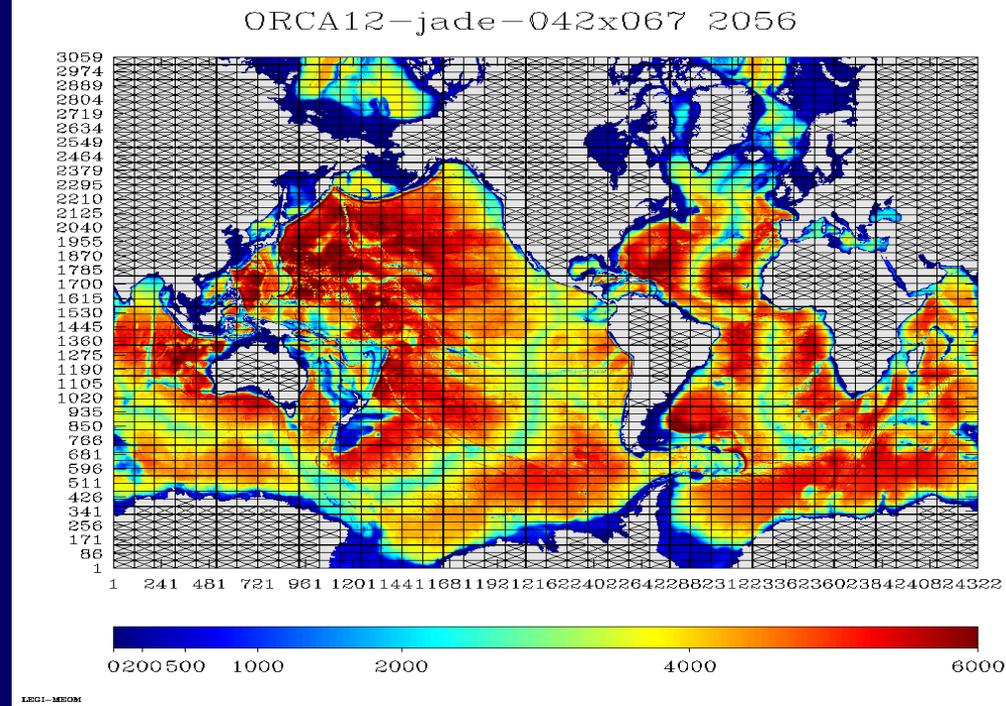
ORCA12: le coût

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

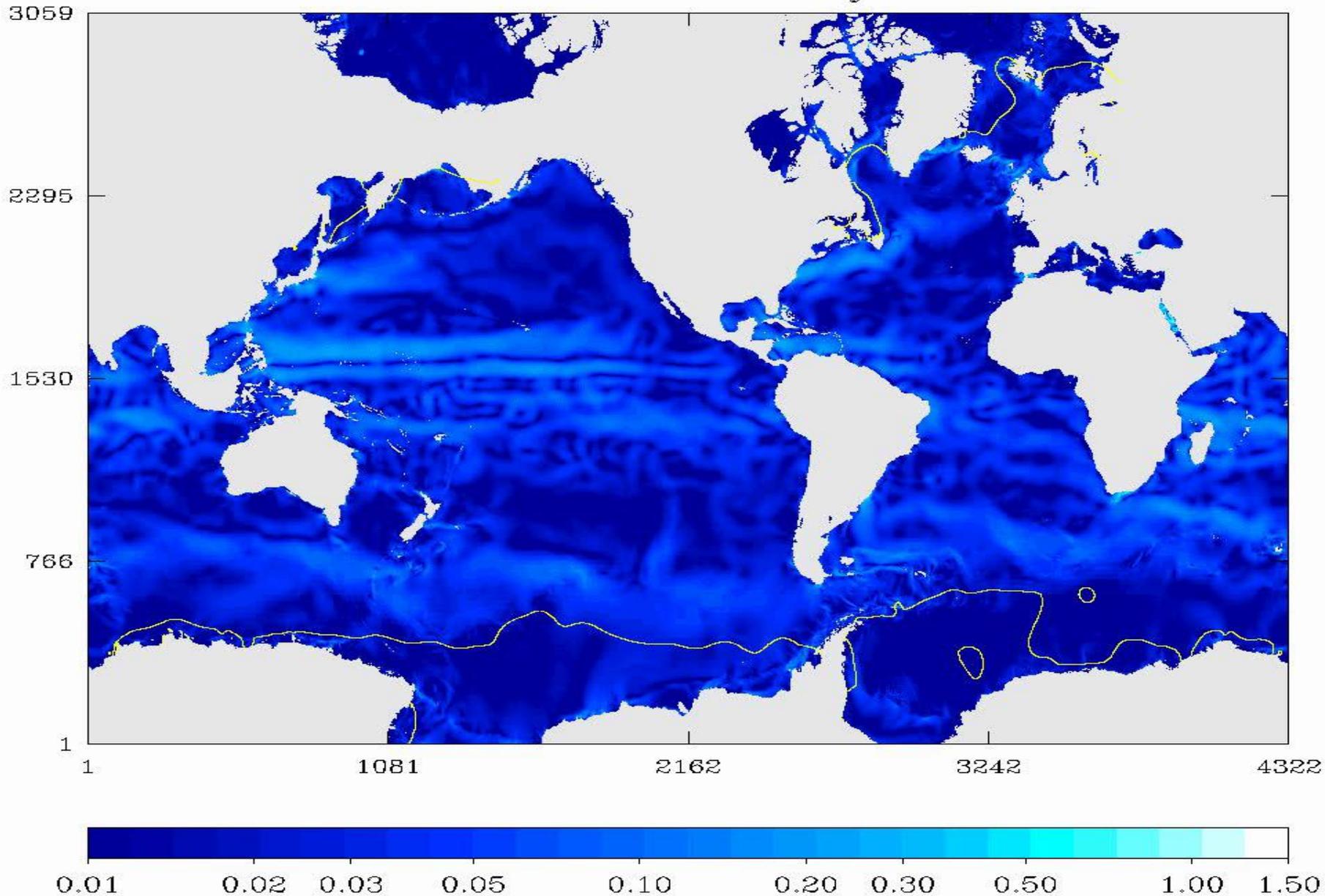


Bilan pour 50 ans de simulation:

- 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

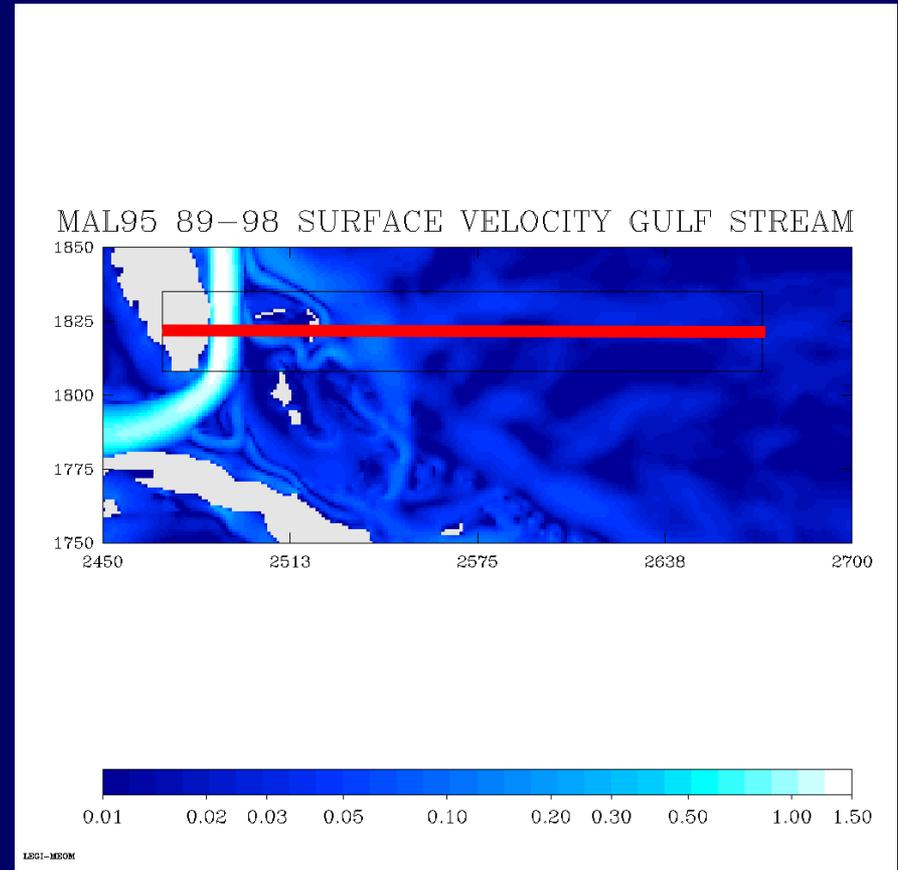
Le futur (à 10-15 ans) des modèles de climat?

ORCA12: Sensibilité aux paramètres « numériques »

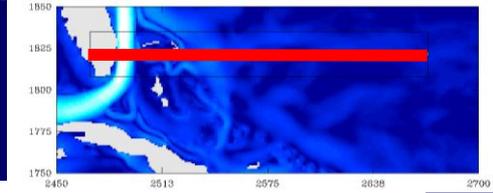
Deux paramètres particuliers

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

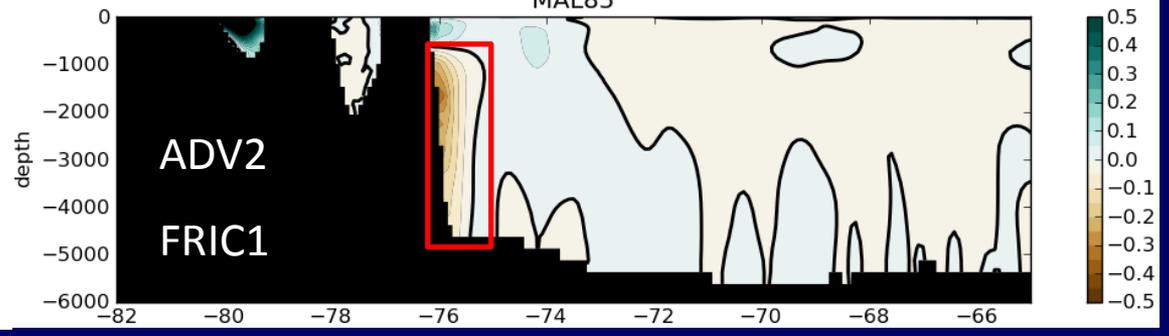
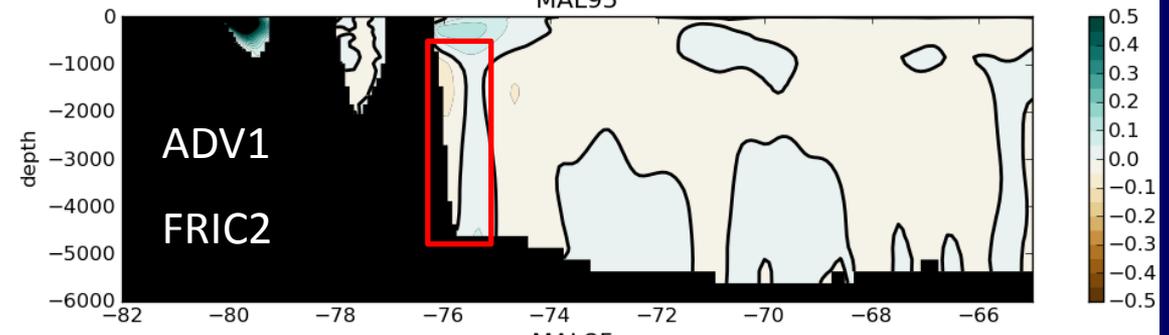
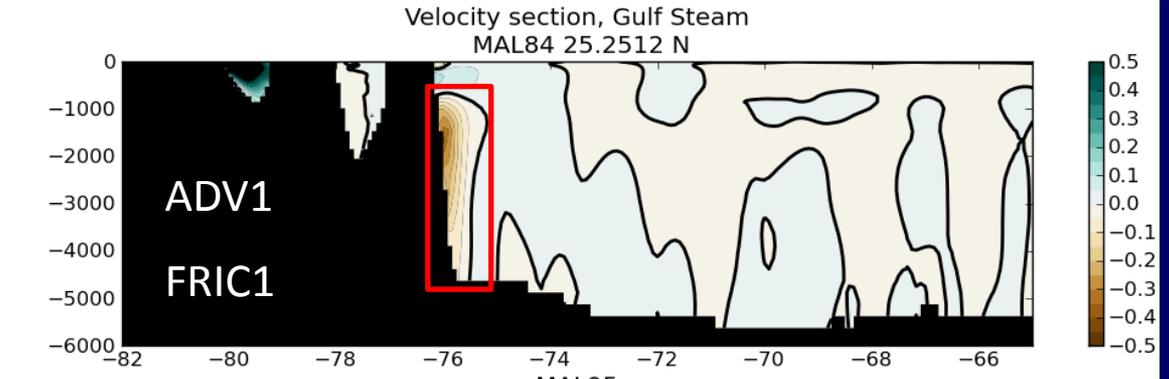
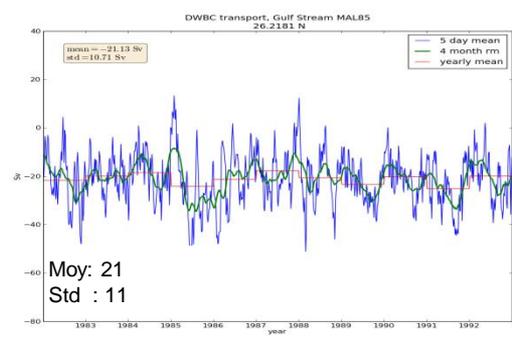
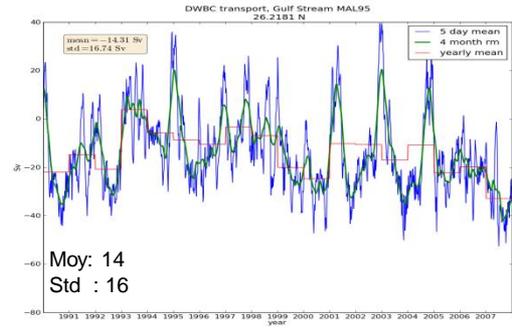
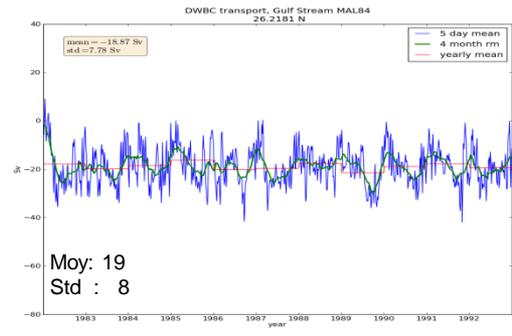
La friction à la côte



ORCA12: Sensibilité aux paramètres « numériques »



Unité: million de m³/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