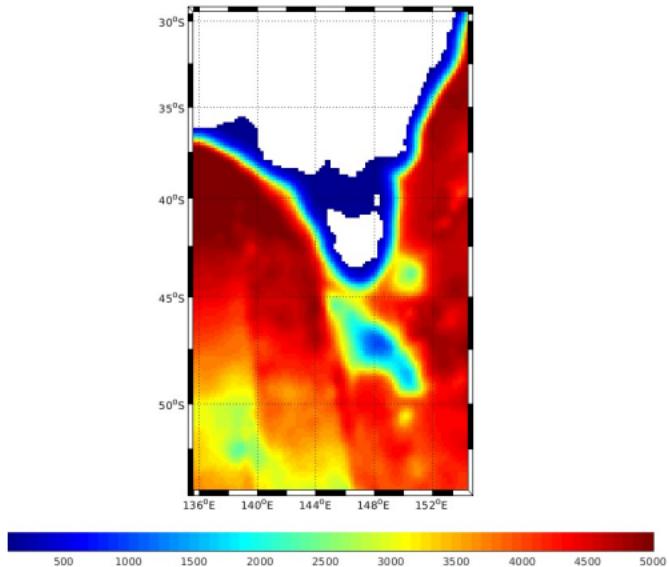


# Modélisation de la circulation océanique autour de la Tasmanie

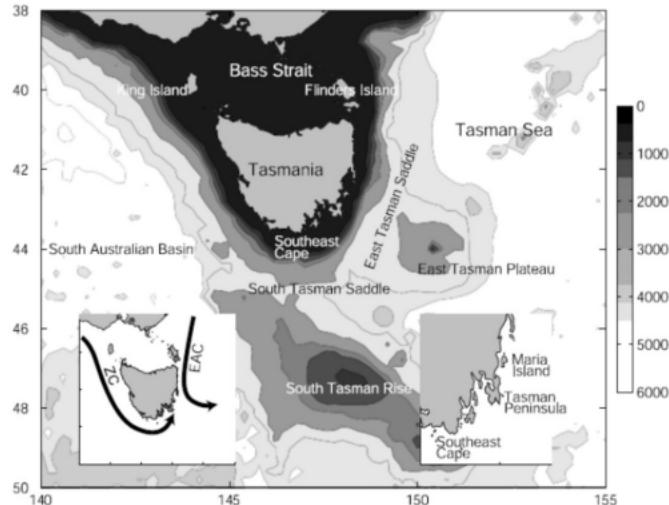
Master 1 - Sciences de la Mer, option OPB  
année 2021-2022

OPB 205 : Modélisation 3D Océanique encadré par Andrea Doglioli



**Alexandre Le Hen**  
**9 Mai 2022**

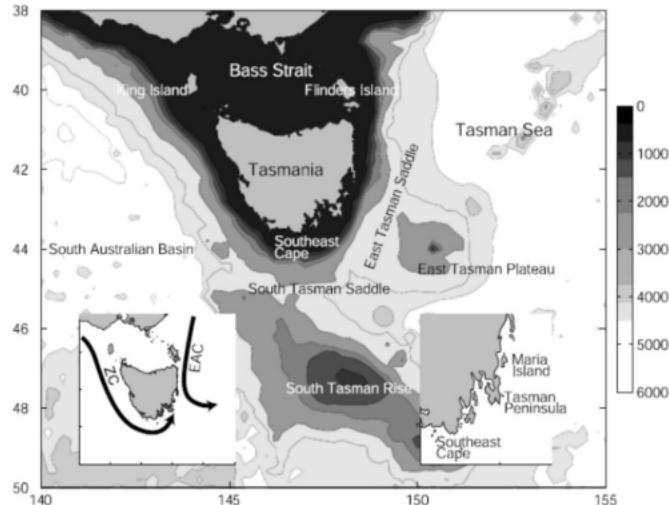
# Région de la Tasmanie



Circulation autour de la Tasmanie

# Région de la Tasmanie

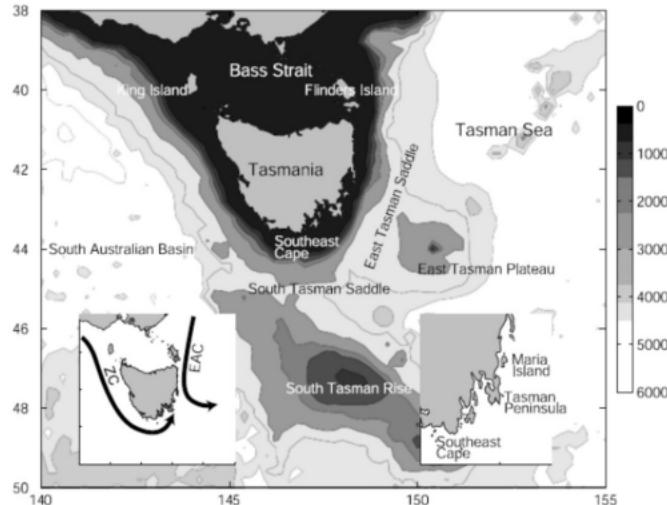
- Sud-Est de l'Australie



Circulation autour de la Tasmanie

# Région de la Tasmanie

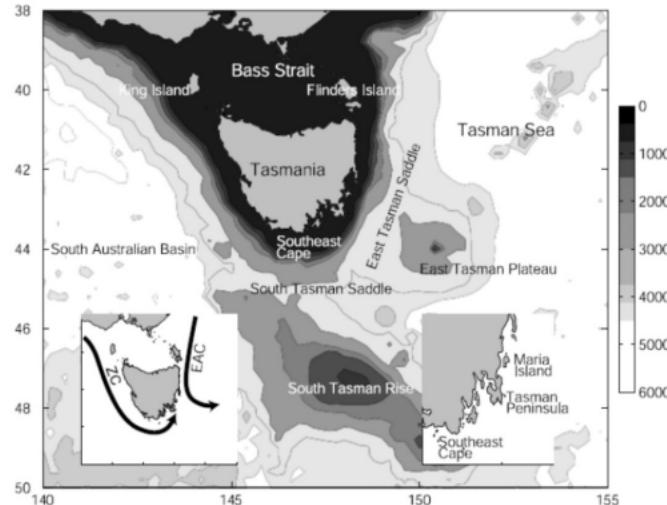
- Sud-Est de l'Australie
- Cycle saisonnier



Circulation autour de la Tasmanie

# Région de la Tasmanie

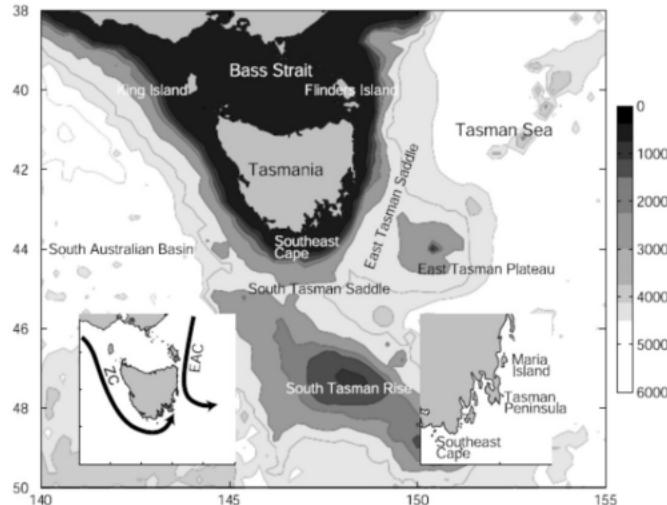
- Sud-Est de l'Australie
- Cycle saisonnier
  - Courant Est Australien (EAC)
  - Courant de Zeehan (ZC)



Circulation autour de la Tasmanie

# Région de la Tasmanie

- Sud-Est de l'Australie
- Cycle saisonnier
  - Courant Est Australien (EAC)
  - Courant de Zeehan (ZC)
- Entre 2 bassins océaniques



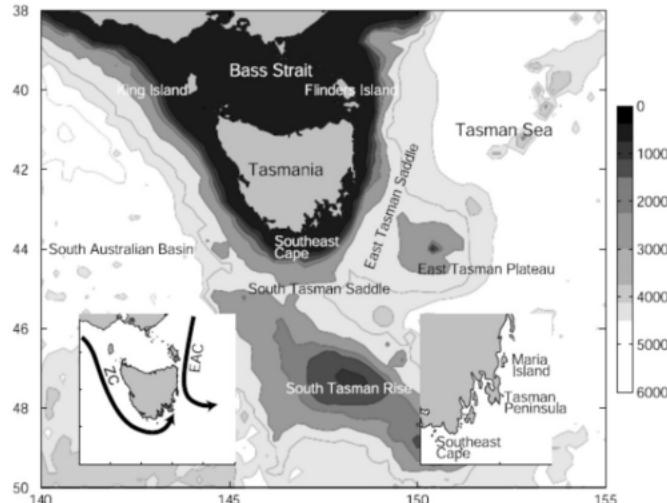
Circulation autour de la Tasmanie

# Région de la Tasmanie

- Sud-Est de l'Australie
- Cycle saisonnier
  - Courant Est Australien (EAC)
  - Courant de Zeehan (ZC)
- Entre 2 bassins océaniques

## Courant Circumpolaire

- Débit important



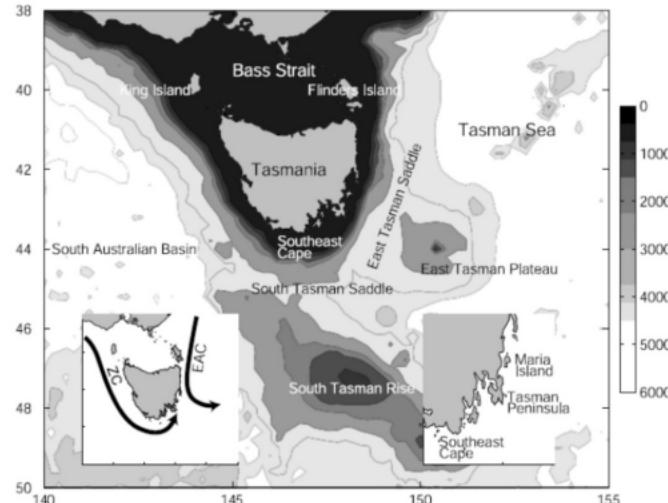
Circulation autour de la Tasmanie

## Région de la Tasmanie

- Sud-Est de l'Australie
- Cycle saisonnier
  - Courant Est Australien (EAC)
  - Courant de Zeehan (ZC)
- Entre 2 bassins océaniques

## Courant Circumpolaire

- Débit important



Circulation autour de la Tasmanie

→ Zone de simulation entre les longitudes  $135^{\circ}\text{E}$  et  $155^{\circ}\text{E}$  et les latitudes  $29^{\circ}\text{S}$  et  $54^{\circ}\text{S}$  sur CROCO

# Le modèle CROCO

## Le modèle CROCO

- Modélisation océanique régionale en 3D

## Le modèle CROCO

- Modélisation océanique régionale en 3D
- Couplage avec des modèles biogéochimiques...

## Le modèle CROCO

- Modélisation océanique régionale en 3D
- Couplage avec des modèles biogéochimiques...

### Approximations et hypothèses :

- Approximation de Boussinesq

## Le modèle CROCO

- Modélisation océanique régionale en 3D
- Couplage avec des modèles biogéochimiques...

### Approximations et hypothèses :

- Approximation de Boussinesq
- Hypothèse hydrostatique

## Le modèle CROCO

- Modélisation océanique régionale en 3D
- Couplage avec des modèles biogéochimiques...

### Approximations et hypothèses :

- Approximation de Boussinesq
- Hypothèse hydrostatique
- Hypothèse d'incompressibilité

## Le modèle CROCO

- Modélisation océanique régionale en 3D
- Couplage avec des modèles biogéochimiques...

### Approximations et hypothèses :

- Approximation de Boussinesq
- Hypothèse hydrostatique
- Hypothèse d'incompressibilité
- Hypothèse de fermeture Newtonienne de la turbulence

# Résolution d'équation par CROCO

- Les équations du mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}$$

## Résolution d'équation par CROCO

- Les équations du mouvement
- Les équations de conservation de la chaleur et du sel

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = -\frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(T'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(T'w')}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = -\frac{\partial \overline{(S'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(S'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(S'w')}}{\partial z}$$

## Résolution d'équation par CROCO

- Les équations du mouvement
- Les équations de conservation de la chaleur et du sel
- L'équation d'état de l'eau de mer

$$\text{TEOS 10} \Rightarrow \rho \equiv \rho(T, S, p)$$

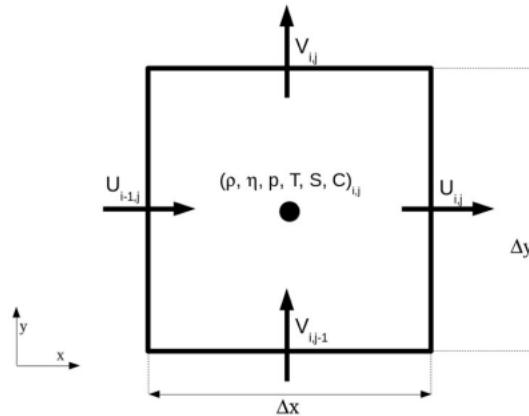
## Résolution d'équation par CROCO

- Les équations du mouvement
- Les équations de conservation de la chaleur et du sel
- L'équation d'état de l'eau de mer
- L'équation de continuité

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

# Discrétisation

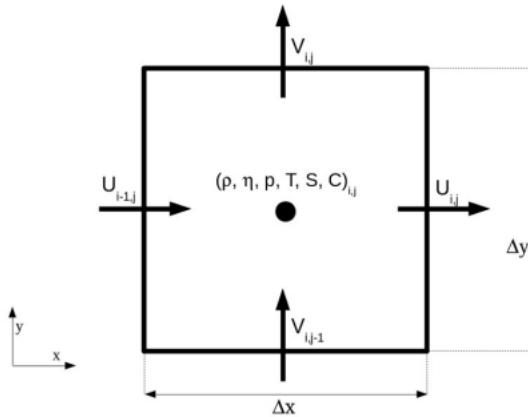
- Sur l'horizontale :
- Grille d'Arakawa C



Grille d'Arakawa C

# Discrétisation

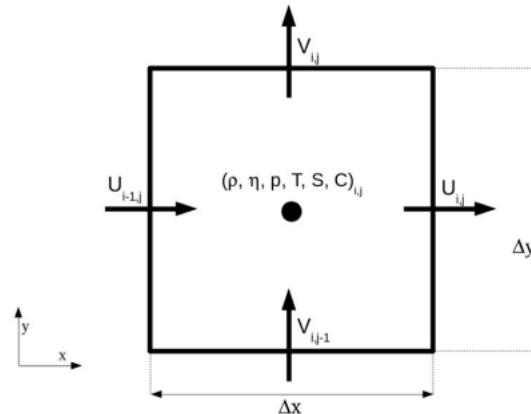
- Sur l'horizontale :
  - Grille d'Arakawa C
- 
- Sur la verticale :
  - Grille sigma



Grille d'Arakawa C

# Discrétisation

- Sur l'horizontale :
- Grille d'Arakawa C
- Sur la verticale :
- Grille sigma



Grille d'Arakawa C

- Stabilité :
- Critère CFL (Courant- Friedrichs-Levy)  $\Delta t \leq \frac{1}{c} \left[ \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$

# Paramétrisation de la simulation

# Paramétrisation de la simulation

Région de la Tasmanie :

- 135°E-155°E et 29°S-54°S

# Paramétrisation de la simulation

Région de la Tasmanie :

- 135°E-155°E et 29°S-54°S

Paramètres de la grille

Résolution	1/5°
Taille de la grille en latitude	MMm=170
Taille de la grille en longitude	LLm=99
Taille de la grille verticale	N=32
Frontières ouvertes	4
Nombre de maille	$5,38 \times 10^5$

# Paramétrisation de la simulation

Région de la Tasmanie :

- 135°E-155°E et 29°S-54°S

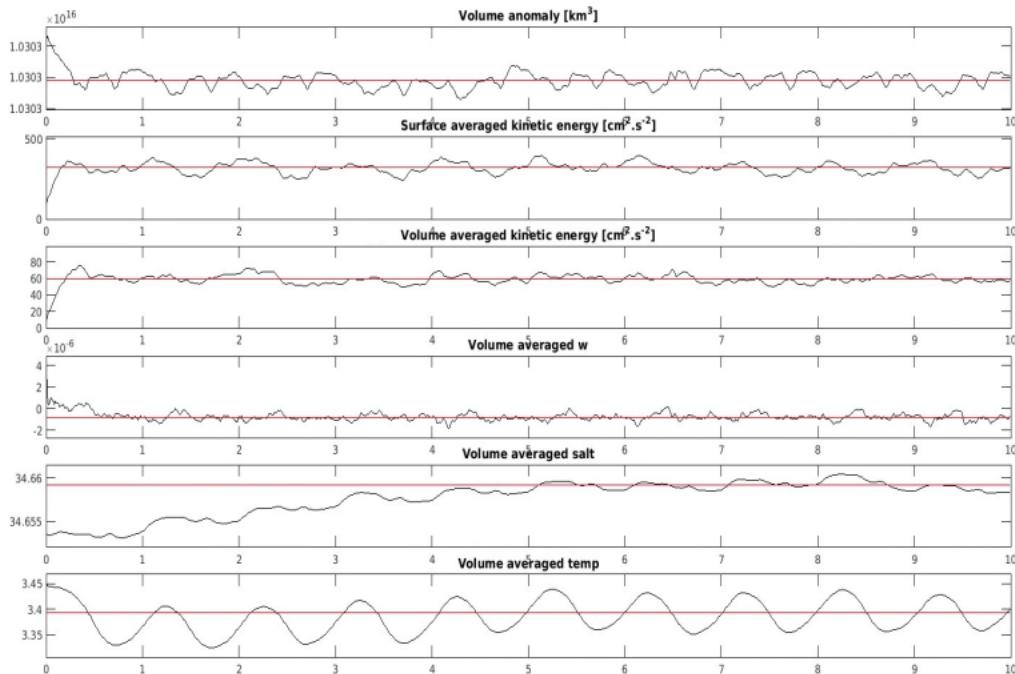
## Paramètres de la grille

Résolution	1/5°
Taille de la grille en latitude	MMm=170
Taille de la grille en longitude	LLm=99
Taille de la grille verticale	N=32
Frontières ouvertes	4
Nombre de maille	$5,38 \times 10^5$

## Paramètres temporels

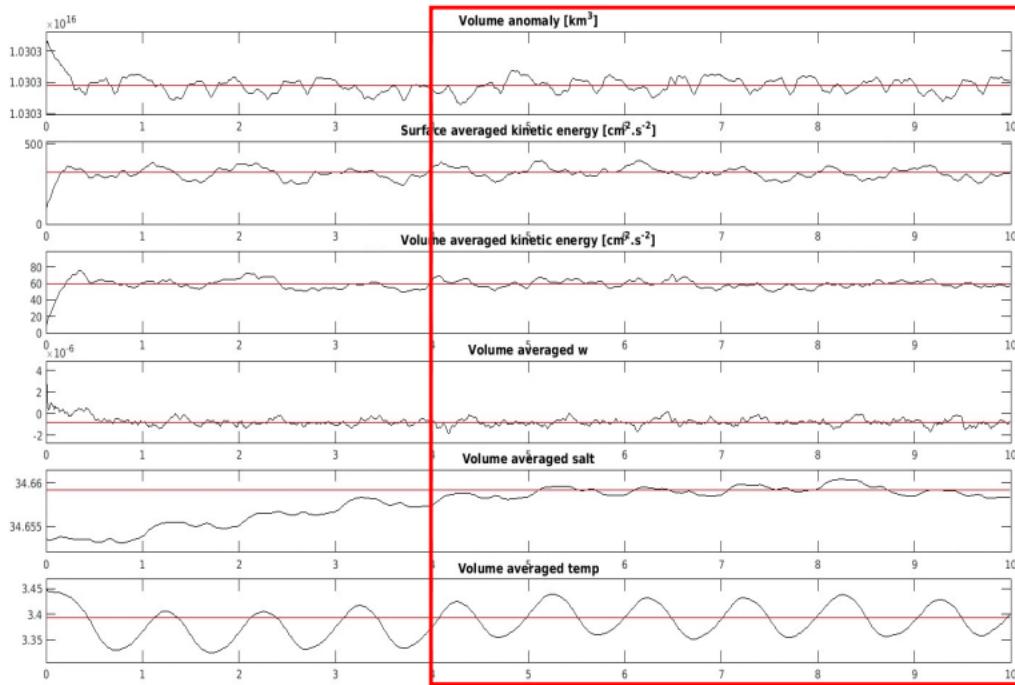
Pas de temps interne (s)	1440
Pas de temps externe (s)	60
Itération par simulation	1800 (30j)
Fréquence de sauvegarde	180 (3j)

# Diagnostique du modèle



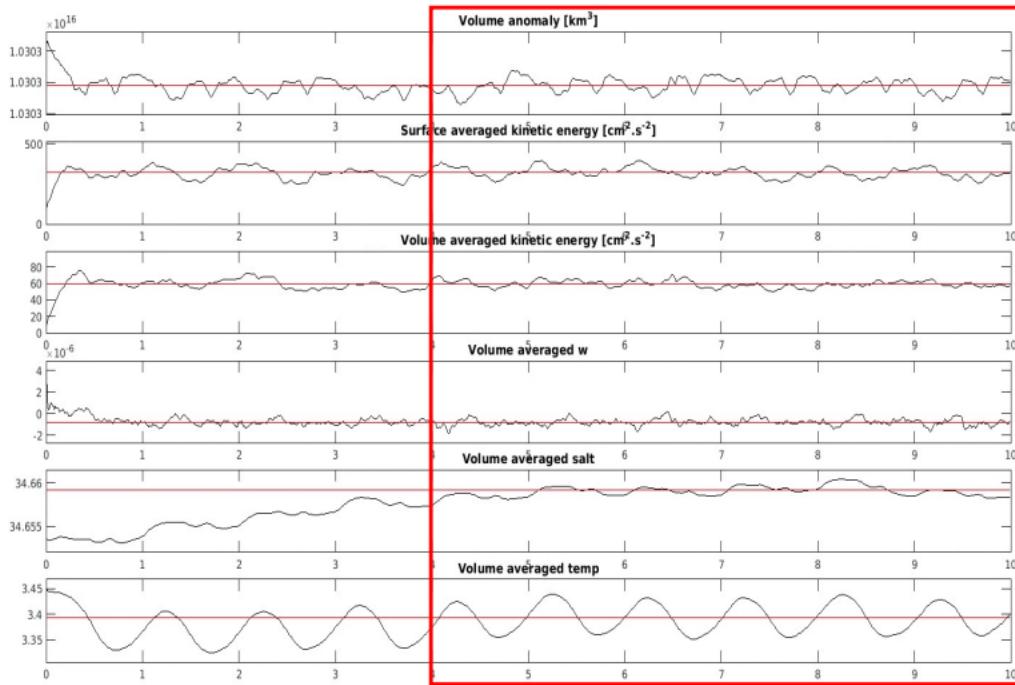
# Diagnostique du modèle

- Stabilisation à partir de la 4<sup>ème</sup> année

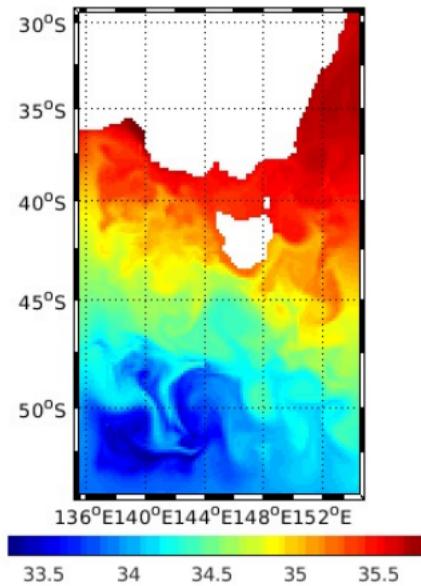
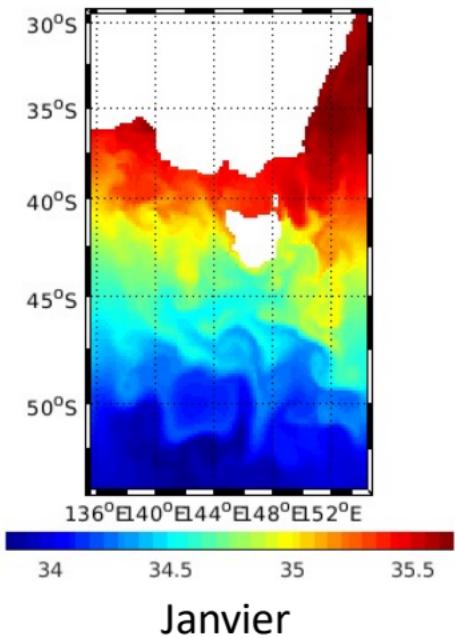


# Diagnostique du modèle

- Stabilisation à partir de la 4<sup>ème</sup> année
- Période de spin-up

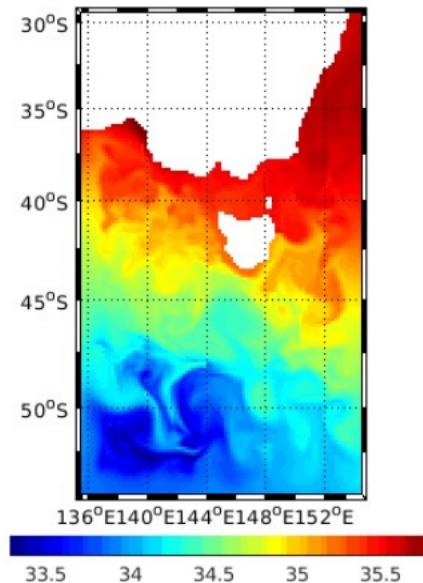
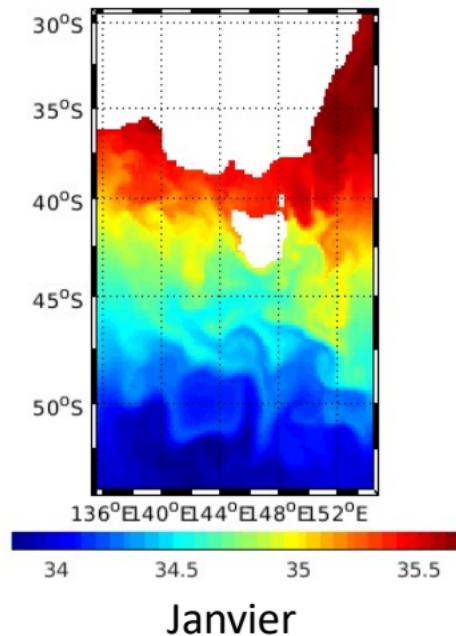


# Salinité de surface



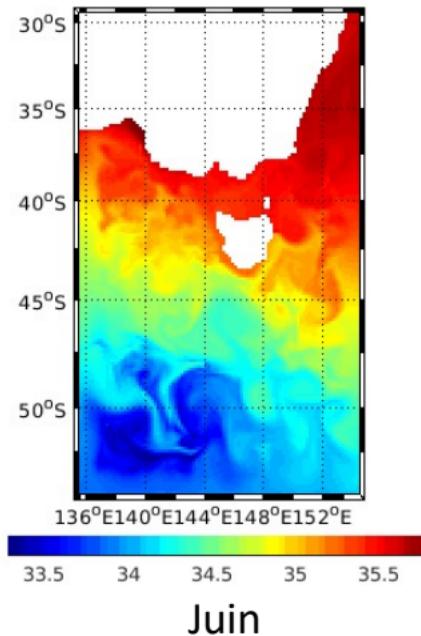
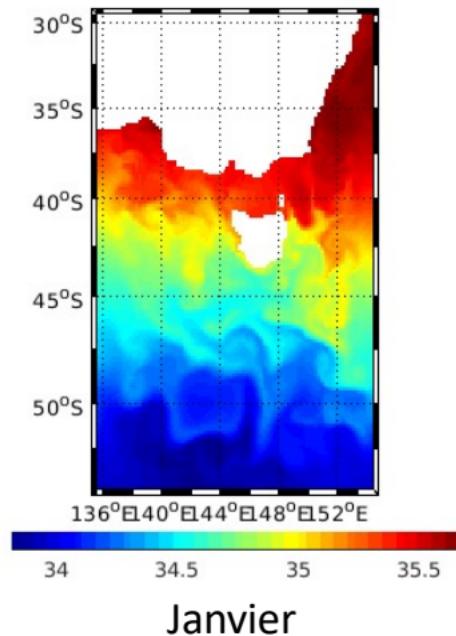
# Salinité de surface

- Augmentation de la salinité en hiver austral



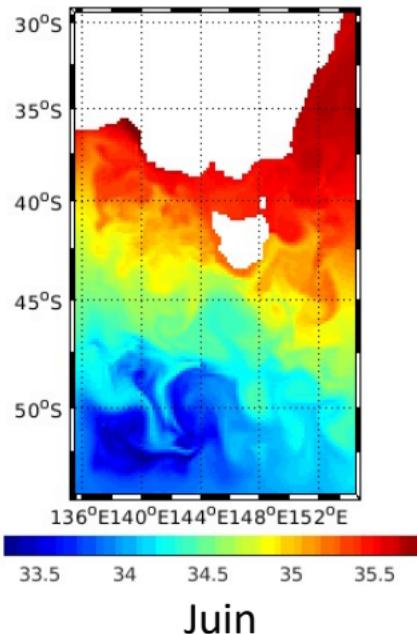
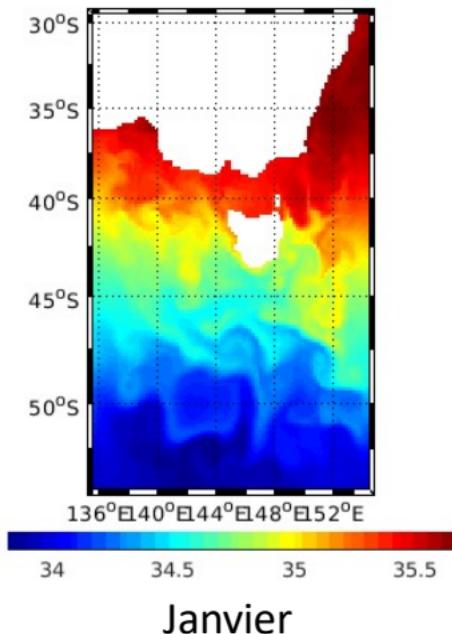
# Salinité de surface

- Augmentation de la salinité en hiver austral
- Maximum dans l'EAC

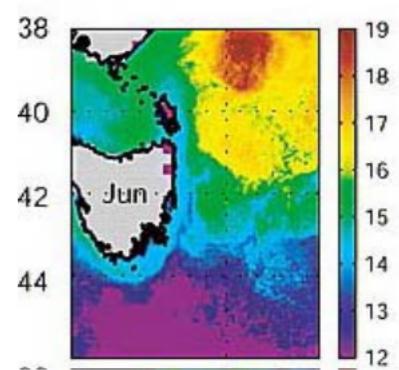
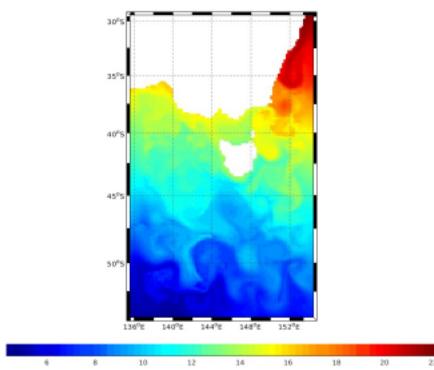
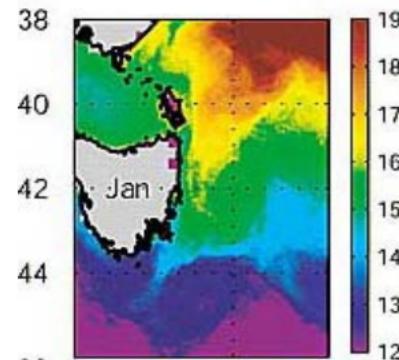
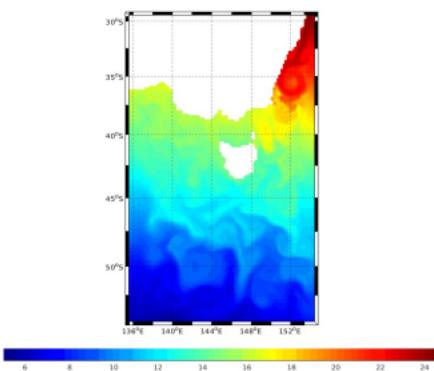


# Salinité de surface

- Augmentation de la salinité en hiver austral
- Maximum dans l'EAC
- Minimum dans le courant Circumpolaire

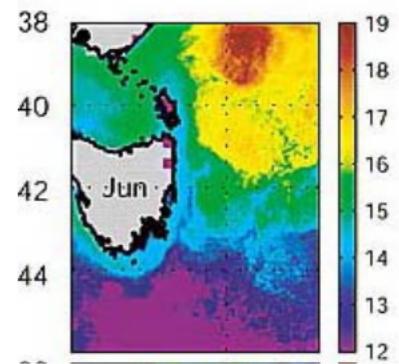
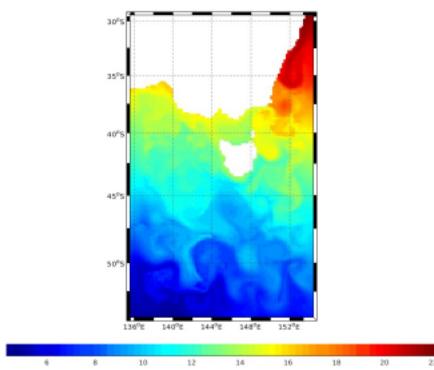
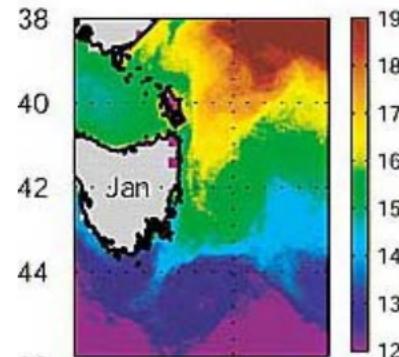
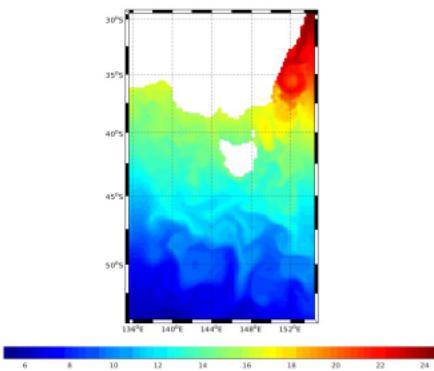


# Température de surface



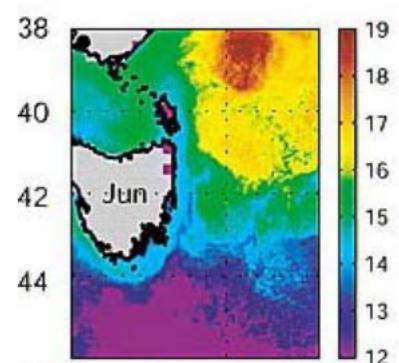
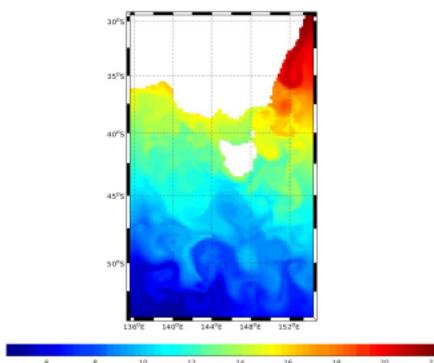
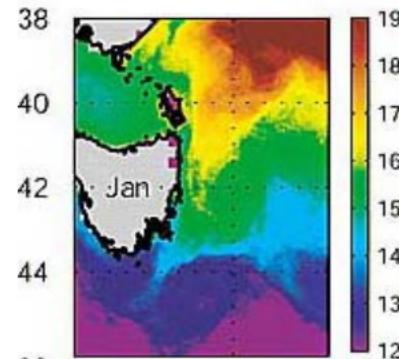
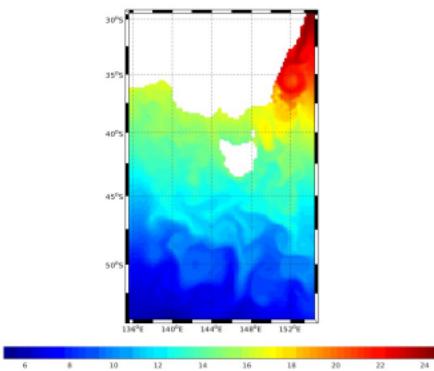
# Température de surface

- Courant Est Australien



# Température de surface

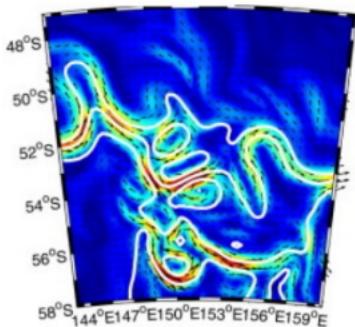
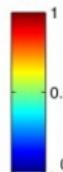
- Courant Est Australien
- Echelle différente mais résultats similaires



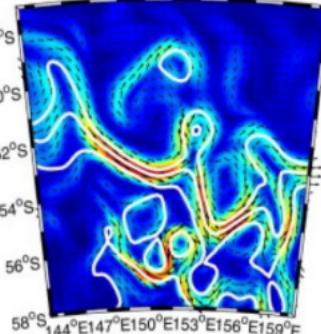
# Vitesse des courants

- Courant Circumpolaire

06/12/1990

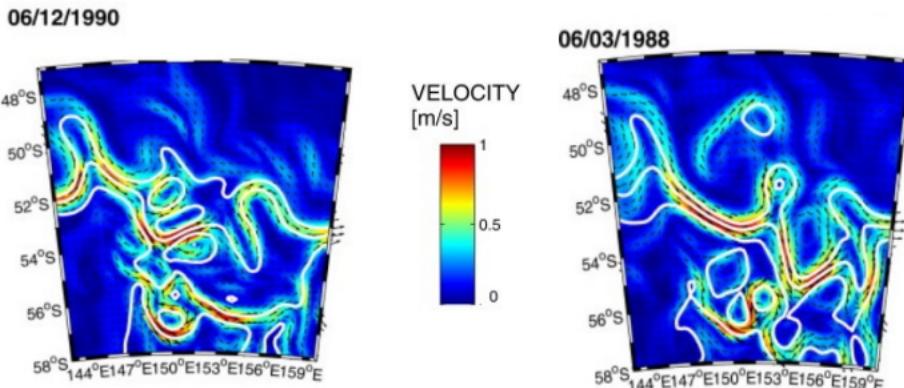
VELOCITY  
[m/s]

06/03/1988



# Vitesse des courants

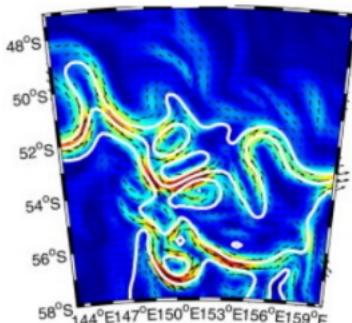
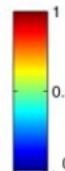
- Courant Circumpolaire
- Courant intenses vers l'Est



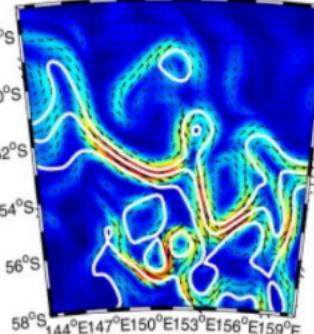
# Vitesse des courants

- Courant Circumpolaire
- Courant intenses vers l'Est
- CROCO : même ordre de grandeur

06/12/1990

VELOCITY  
[m/s]

06/03/1988



30°S

35°S

40°S

45°S

50°S

55°S

58°S

136°E 140°E 144°E 148°E 152°E

0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

30°S

35°S

40°S

45°S

50°S

55°S

58°S

136°E 140°E 144°E 148°E 152°E

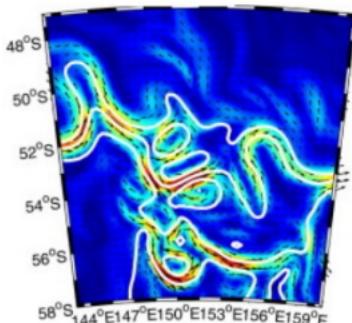
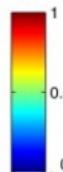
0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

0.5 m.s<sup>-1</sup>

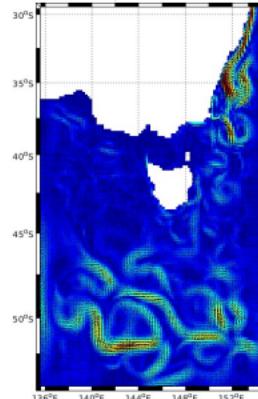
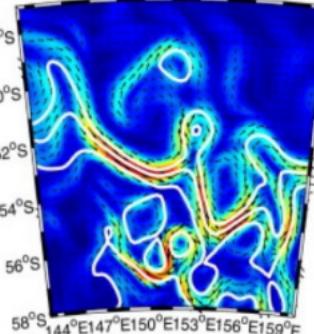
# Vitesse des courants

- Courant Circumpolaire
- Courant intenses vers l'Est
- CROCO : même ordre de grandeur
- Variation saisonnière

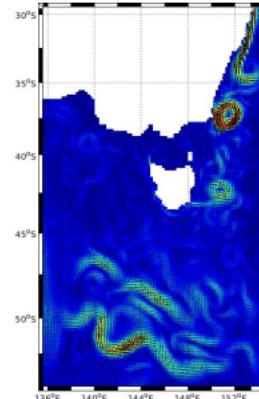
06/12/1990

VELOCITY  
[m/s]

06/03/1988



0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8



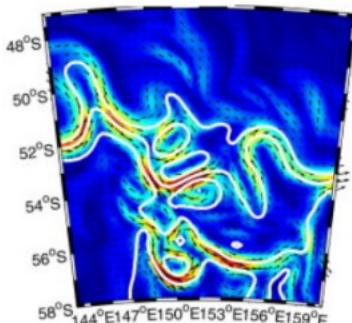
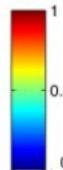
0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

0.5 m.s<sup>-1</sup>

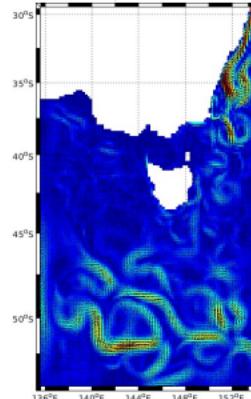
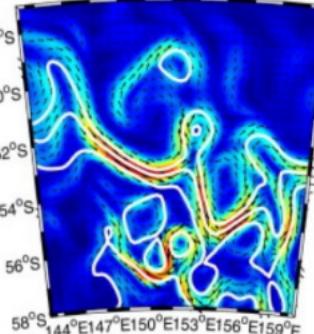
# Vitesse des courants

- Courant Circumpolaire
- Courant intenses vers l'Est
- CROCO : même ordre de grandeur
- Variation saisonnière
- Formation de tourbillons dû à l'EAC

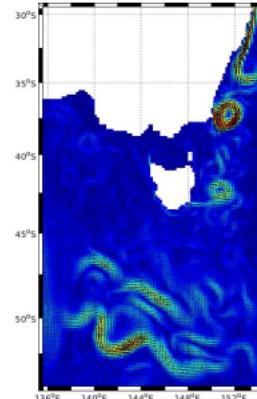
06/12/1990

VELOCITY  
[m/s]

06/03/1988



0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8



0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

0.5 m.s<sup>-1</sup>

# Conclusion

**CROCO :**

- Outil puissant pour une modélisation

# Conclusion

## **CROCO :**

- Outil puissant pour une modélisation
- Valeurs, saisonnalité et figures similaires aux articles

# Conclusion

## **CROCO :**

- Outil puissant pour une modélisation
- Valeurs, saisonnalité et figures similaires aux articles

## **Améliorations possible :**

# Conclusion

## **CROCO :**

- Outil puissant pour une modélisation
- Valeurs, saisonnalité et figures similaires aux articles

## **Améliorations possible :**

- Fine échelle entre la Tasmanie et l'Australie

# Conclusion

## **CROCO :**

- Outil puissant pour une modélisation
- Valeurs, saisonnalité et figures similaires aux articles

## **Améliorations possible :**

- Fine échelle entre la Tasmanie et l'Australie
- Simulation centrée sur le courant Circumpolaire

# Merci de votre attention

## Références :

- Baklouti, M., Initiation aux méthodes numériques de résolution des équations aux dérivées partielles, 2022, Aix-Marseille Université.
- Doglioli, A., and Mazoyer, C., Notes de cours et travaux dirigés de modélisation 3D océanique, 2022, Aix-Marseille Université.
- [https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli/TEACHING\\_Modelisation3DOceanique/poly\\_Modelisation3DOceanique\\_openoffice\\_V3\\_CM2022.pdf](https://people.mio.osupytheas.fr/~doglioli/TEACHING_Modelisation3DOceanique/poly_Modelisation3DOceanique_openoffice_V3_CM2022.pdf)
- Langlais, C., et al., Variability and mesoscale activity of the Southern Ocean fronts: Identification of a circumpolar coordinate system, *Ocean modelling*, 2011, 39, 1.
- Pichat, S., et al., Les courants thermohalins et les eaux océaniques profondes, *Planet terre*, 2001.
- Ridgway, K.R., Seasonal circulation around Tasmania: An interface between eastern and western boundary dynamics, *Journal of geophysical research*, 2007, 112, C10016.
- Ridgway, K.R., and Condie, S.A., The 5500-km-long boundary flow off western and southern Australia, *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, C04017.

## Equations du mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u' v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u' w'}}{\partial z}$$
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v' w'}}{\partial z}$$

u, v et w sont les composantes horizontales et verticale non turbulentes ou « moyennes » de la vitesse du mouvement ;

u', v' et w' sont les composantes turbulentes de la vitesse du mouvement ;

f est le paramètre de Coriolis ;

P est la pression ;

$\rho_0$  est la densité de référence de l'eau de mer au sens de l'hypothèse de Boussinesq.

## Fermeture Newtonienne

$$\overline{u' u'} = -A_x \frac{\partial u}{\partial x} ;$$

$$\overline{v' u'} = -A_x \frac{\partial v}{\partial x} ;$$

$$\overline{u' v'} = -A_y \frac{\partial u}{\partial y} ;$$

$$\overline{v' v'} = -A_y \frac{\partial v}{\partial y} ;$$

$$\overline{u' w'} = -A_z \frac{\partial u}{\partial z} ;$$

$$\overline{v' w'} = -A_z \frac{\partial v}{\partial z} .$$

$A_x$ ,  $A_y$  et  $A_z$  sont des coefficients de viscosité turbulente

## Les équations de conservation de la chaleur et de la température

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = - \frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(T'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(T'w')}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = - \frac{\partial \overline{(S'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(S'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(S'w')}}{\partial z}$$

Où  $H_c$  est le flux solaire incident.

$C_p$  est le coefficient de chaleur massique:  $C_p = 3950 \text{ J/kg.K}$

$I(z)$  est la fraction de ce flux qui parvient au niveau  $z$  :  $I(z) = \exp(-\lambda z)$  avec  $\lambda = 0.05 \text{ m}^{-1}$

## Coefficients turbulents verticaux

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} Q = A_z \underbrace{\left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]}_{(1)} + \underbrace{\frac{g}{\rho_0} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}}_{(2)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left( A_z \frac{\partial Q}{\partial z} \right)}_{(3)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( A_h \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_h \frac{\partial Q}{\partial y} \right)}_{(4)} - \varepsilon$$

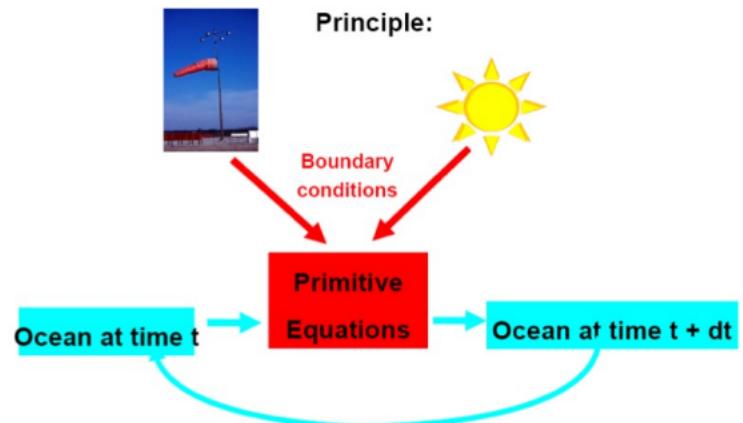
La production d'énergie turbulente par cisaillement de la vitesse est représenté par le terme (1), la production par la flottabilité par le terme (2), la redistribution de l'énergie par diffusion turbulente est représenté par le terme (3) dans la verticale et par le terme (4) dans l'horizontale (diffusion).

La dissipation de l'énergie turbulente  $\varepsilon$  est paramétrée en fonction de la longueur de dissipation  $L_\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{C_\varepsilon \cdot Q^{3/2}}{L_\varepsilon}$$

## Principe du modèle CROCO

- L'état initial de l'océan au temps  $t$  contient les conditions initiales et aux limites
- Les forçages atmosphériques contiennent la friction du vent et sa quantité de mouvement, l'humidité, le flux de chaleur et d'eau douce



Modèles mensuels pour 1999 de janvier à juin, SLA provenant d'une interpolation fusionnée de l'altimètre et du marégraphe côtier (m) (en bas), anomalie de la SST (milieu) et SST ( $^{\circ}$ C) (haut) (Ridgway, K.R., 2007).

