

Simulation climatologique de la rétroflexion du courant des Aiguilles avec le modèle CROCO

Léa Criado - 07 Avril 2023

Modélisation 3D

Master 1 Sciences de la Mer

Année Universitaire 2022 / 2023

- (1) A Gordon, J Lutjeharms, and M Gründlingh. *Stratification and Circulation at the Agulhas Retroflection*. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1987, 34(4) : 565–599.
- (2) S Jullien, M Caillaud, R Benshila, L Bordoïs, G Cambon, F Dufois, F Dumas, J Gula, M Corre, S Gac, S Gentil, F Lemarié, P Marchesiello, G Morvan, J Pianezze, and S Theetten. *Technical and Numerical Doc - Release 1.3*. Technical Report, IRD (2022).
- (3) J Lutjeharms. *Three Decades of Research on the Greater Agulhas Current*. Ocean Science, 2007, 3(1) :129–147.
- (4) S Ponce de León, and C Guedes Soares. *Numerical Study of the Effect of Current on Waves in the Agulhas Current Retroflection*. Ocean Engineering, 2022, 264 :112333.
- (5) C Trott, B Subrahmanyam, and C Washburn. *Investigating the Response of Temperature and Salinity in the Agulhas Current Region to ENSO Events*. Remote Sensing, 2021, 13(9).

Introduction	Matériels et Méthodes	Résultats	Discussion	Conclusion
---------------------	--------------------------	-----------	------------	------------

Présentation de la zone d'étude

Introduction	Matériels et Méthodes	Résultats	Discussion	Conclusion
--------------	-----------------------	-----------	------------	------------

Présentation de la zone d'étude

- **Courant de bord Ouest** : jet chaud, salé, transport de **70 Sv**, et vitesse maximale de **2 m/s**

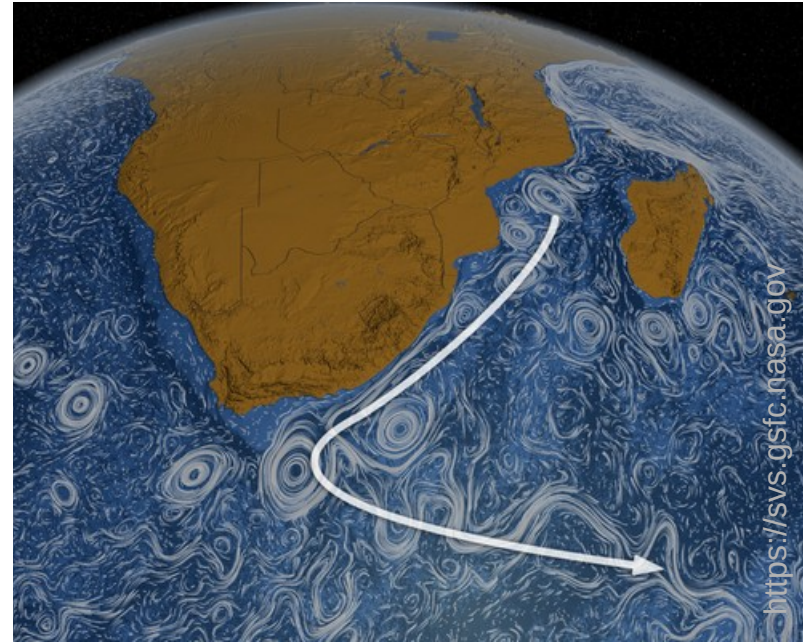


Figure 1 : Simulation de la rétroflexion du courant du courant des Aiguilles par la NASA (Perpetual Ocean)

Introduction	Matériels et Méthodes	Résultats	Discussion	Conclusion
---------------------	-----------------------	-----------	------------	------------

Présentation de la zone d'étude

- **Courant de bord Ouest** : jet **chaud**, **salé**, transport de **70 Sv**, et vitesse maximale de **2 m/s**
- Zone de **convergence** océanique : courants de Nord-Est + courants du Benguela et Circumpolaire Antarctique

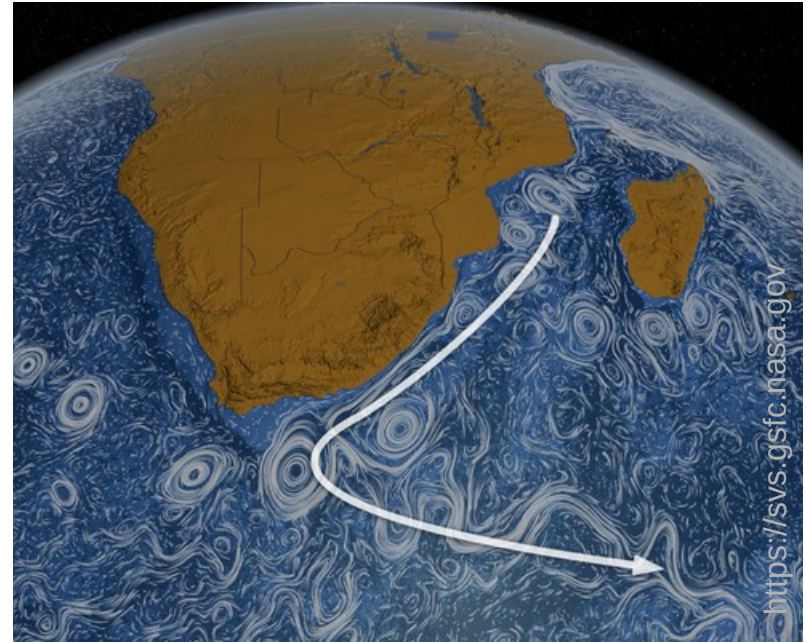


Figure 1 : Simulation de la rétroflexion du courant du courant des Aiguilles par la NASA (Perpetual Ocean)

Introduction	Matériels et Méthodes	Résultats	Discussion	Conclusion
--------------	-----------------------	-----------	------------	------------

Présentation de la zone d'étude

- **Courant de bord Ouest** : jet **chaud, salé**, transport de **70 Sv**, et vitesse maximale de **2 m/s**
- Zone de **convergence** océanique : courants de Nord-Est + courants du Benguela et Circumpolaire Antarctique
- Caractéristiques régionales : influence des **vents d'Ouest**, des marées (50 cm), zone de forte production primaire

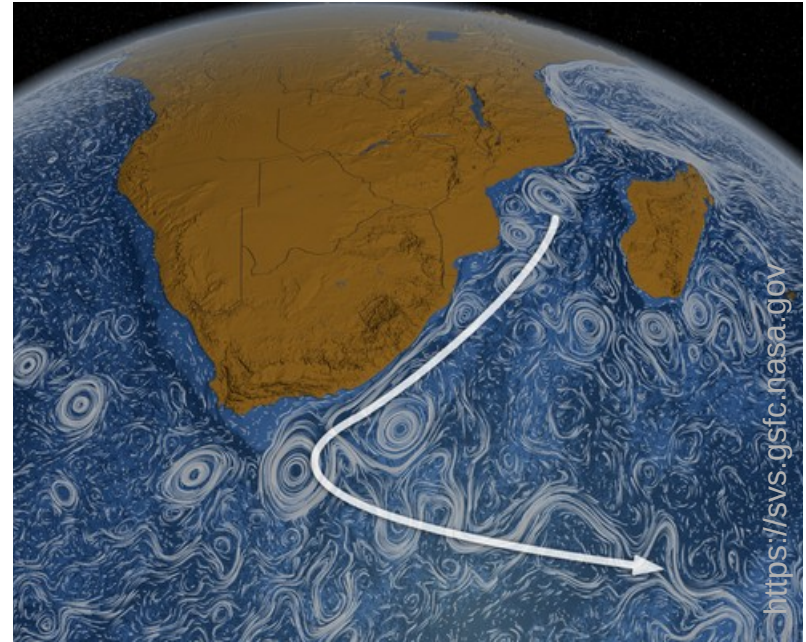


Figure 1 : Simulation de la rétroflexion du courant du courant des Aiguilles par la NASA (Perpetual Ocean)

Introduction

**Matériels et
Méthodes**

Résultats

Discussion

Conclusion

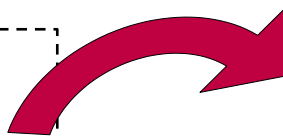
Description du modèle CROCO

Description du modèle CROCO

Atlas mondiaux :
accès aux **données
climatologiques**
(conditions initiales +
forçages)

Description du modèle CROCO

Atlas mondiaux :
accès aux **données
climatologiques**
(conditions initiales +
forçages)



Crocotools :

- **conditions initiales**
- conditions **frontières**
- **forçages** de surface
- caractéristiques de la **grille**

Description du modèle CROCO

Atlas mondiaux :
accès aux **données
climatologiques**
(conditions initiales +
forçages)

Crocotools :

- **conditions initiales**
- conditions **frontières**
- **forçages** de surface
- caractéristiques de la **grille**

Modèle à surface libre :
résolution des équations
primitives (avec
approximations)

Description du modèle CROCO

Atlas mondiaux :
accès aux **données
climatologiques**
(conditions initiales +
forçages)

Crocotools :

- **conditions initiales**
- conditions **frontières**
- **forçages** de surface
- caractéristiques de la **grille**

Modèle à surface libre :
résolution des équations
primitives (avec
approximations)

Traitement des fichiers
sortie avec le “**Graphical
User Interface**” et les
“**Diagnostic Tools**”

Introduction

**Matériels et
Méthodes**

Résultats

Discussion

Conclusion

Discrétisation et time splitting

Discrétisation et time splitting

- Discrétisation **spatiale** : utilisation d'une grille d'**Arakawa-C** sur l'horizontale, et d'une grille en **coordonnées sigma** sur la verticale

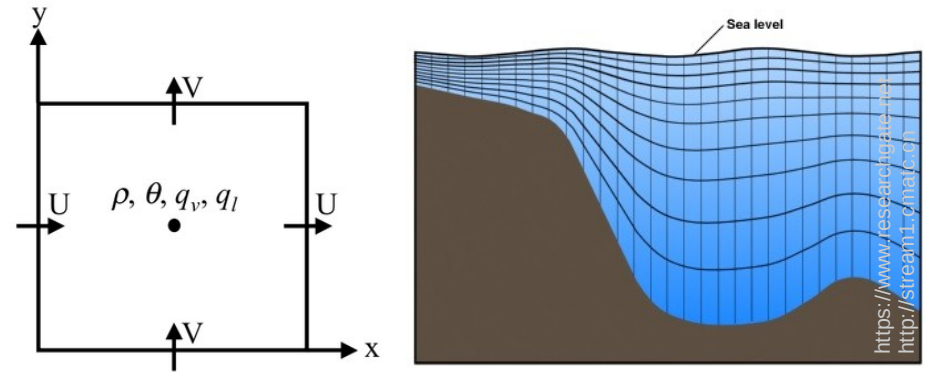


Figure 2 : Représentation en 2D d'une grille d'Arakawa-C et d'une grille verticale en coordonnées sigma

Discrétisation et time splitting

- Discrétisation **spatiale** : utilisation d'une grille d'**Arakawa-C** sur l'horizontale, et d'une grille en **coordonnées sigma** sur la verticale
- Discrétisation **temporelle** : deux pas de temps (**interne** et **externe**) fixés la condition de Courant-Friedrich-Lewy (**CFL**)

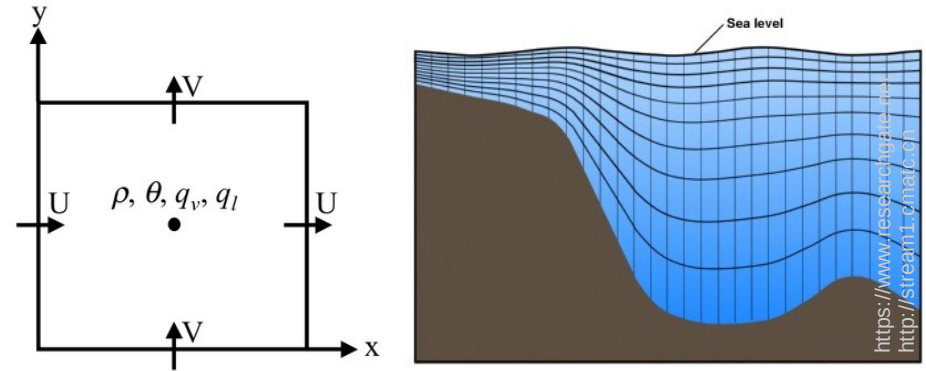


Figure 2 : Représentation en 2D d'une grille d'Arakawa-C et d'une grille verticale en coordonnées sigma

Introduction

**Matériels et
Méthodes**

Résultats

Discussion

Conclusion

Implémentation à la zone d'étude

Implémentation à la zone d'étude

Tableau 1 : Paramètres de la simulation

Paramètres	Zone d'étude
Longitudes	15°E - 40°E
Latitudes	42°S - 25°S
Pas spatial en x	27 - 34
Pas spatial en y	27 - 34
Hmax (en m)	5000
Frontières ouvertes	Sud - Est - Nord - Ouest
Résolution de la grille	1/3°
LLm - MMm - N	74 - 61 - 32
NTIMES - NWRT - NAVG	900 - 90 - 90
dt (en s) - NDTFAST	2880 - 60

Implémentation à la zone d'étude

Tableau 1 : Paramètres de la simulation

Paramètres	Zone d'étude
Longitudes	15°E - 40°E
Latitudes	42°S - 25°S
Pas spatial en x	27 - 34
Pas spatial en y	27 - 34
Hmax (en m)	5000
Frontières ouvertes	Sud - Est - Nord - Ouest
Résolution de la grille	1/3°
LLm - MMm - N	74 - 61 - 32
NTIMES - NWRT - NAVG	900 - 90 - 90
dt (en s) - NDTFAST	2880 - 60

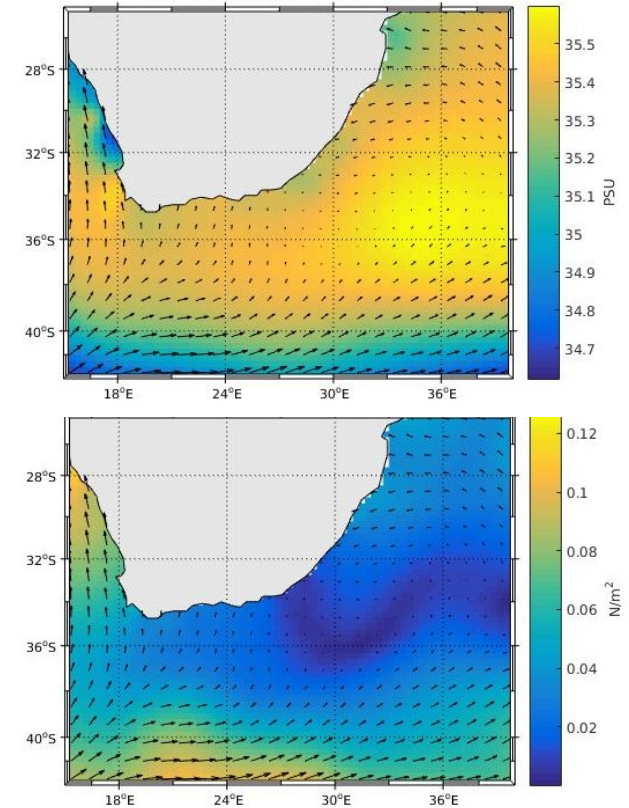


Figure 3 : Représentation de la salinité et le forçage du vent au jour 285 de la simulation

Implémentation à la zone d'étude

Tableau 1 : Paramètres de la simulation

Paramètres	Zone d'étude
Longitudes	15°E - 40°E
Latitudes	42°S - 25°S
Pas spatial en x	27 - 34
Pas spatial en y	27 - 34
Hmax (en m)	5000
Frontières ouvertes	Sud - Est - Nord - Ouest
Résolution de la grille	1/3°
LLm - MMm - N	74 - 61 - 32
NTIMES - NWRT - NAVG	900 - 90 - 90
dt (en s) - NDTFAST	2880 - 60

Simulation pluriannuelle sur 10 ans

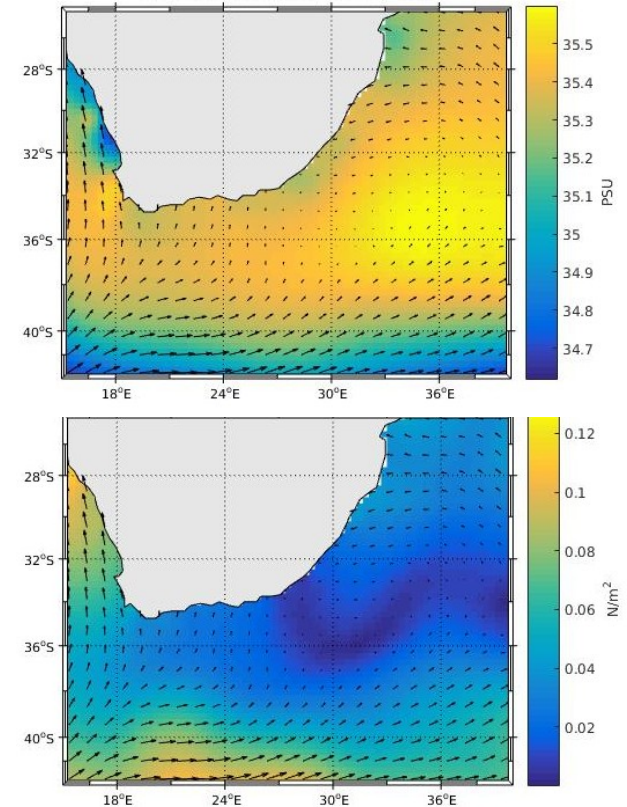


Figure 3 : Représentation de la salinité et le forçage du vent au jour 285 de la simulation

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Diagnostic et temps de spin-up

Diagnostic et temps de spin-up

- Obtention des **diagnostics** avec les scripts Matlab `croco_diags` et `plot_diags`

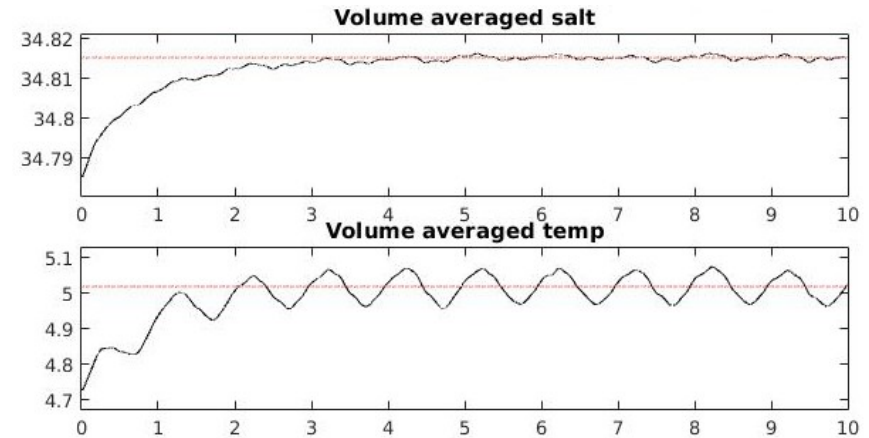


Figure 4 : Diagnostic de 2 variables de la simulation, la salinité et la température moyennées sur le volume

Diagnostic et temps de spin-up

- Obtention des **diagnostics** avec les scripts Matlab `croco_diags` et `plot_diags`
- **Stabilisation** du modèle vers l'année 3 (**spin-up**), prise en compte des résultats à partir de l'année 4

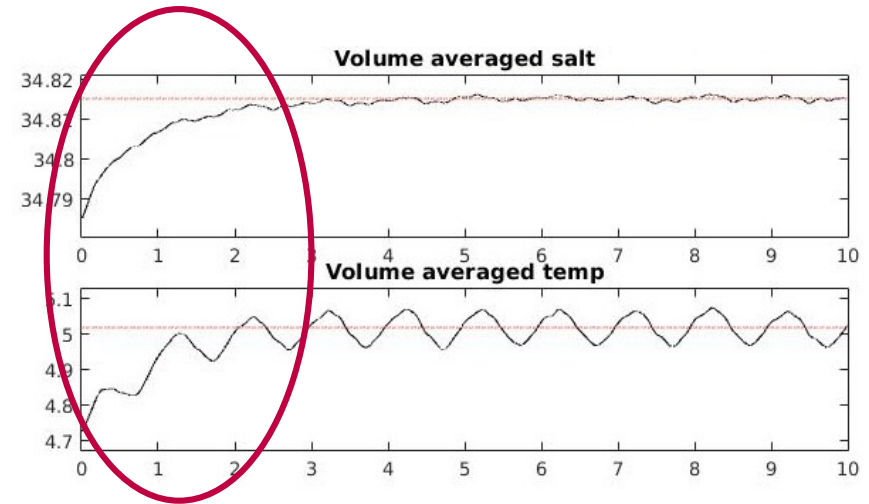


Figure 4 : Diagnostic de 2 variables de la simulation, la salinité et la température moyennées sur le volume

Diagnostic et temps de spin-up

- Obtention des **diagnostics** avec les scripts Matlab `croco_diags` et `plot_diags`
- **Stabilisation** du modèle vers l'année 3 (**spin-up**), prise en compte des résultats à partir de l'année 4
- Utilisation de la 8^{ème} **année** comme **référence**

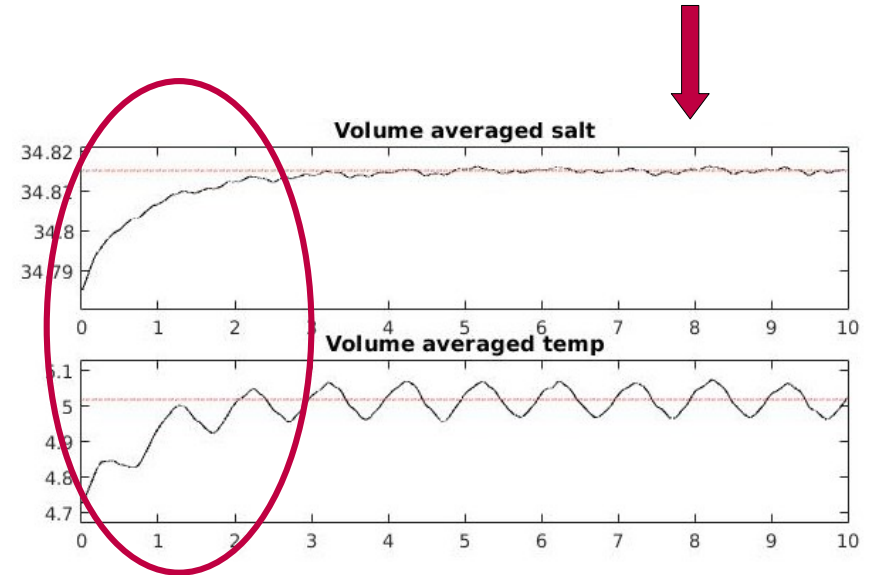


Figure 4 : Diagnostic de 2 variables de la simulation, la salinité et la température moyennées sur le volume

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Caractéristiques du courant

Caractéristiques du courant

- Grandeurs thermodynamiques : **température** et **salinité**, “**carte d'identité**” des masses d'eau

Caractéristiques du courant

- Grandeurs thermodynamiques : **température** et **salinité**, “**carte d'identité**” des masses d'eau
- **Température** : varie entre 12 et 26°C, **différence saisonnière** marquée

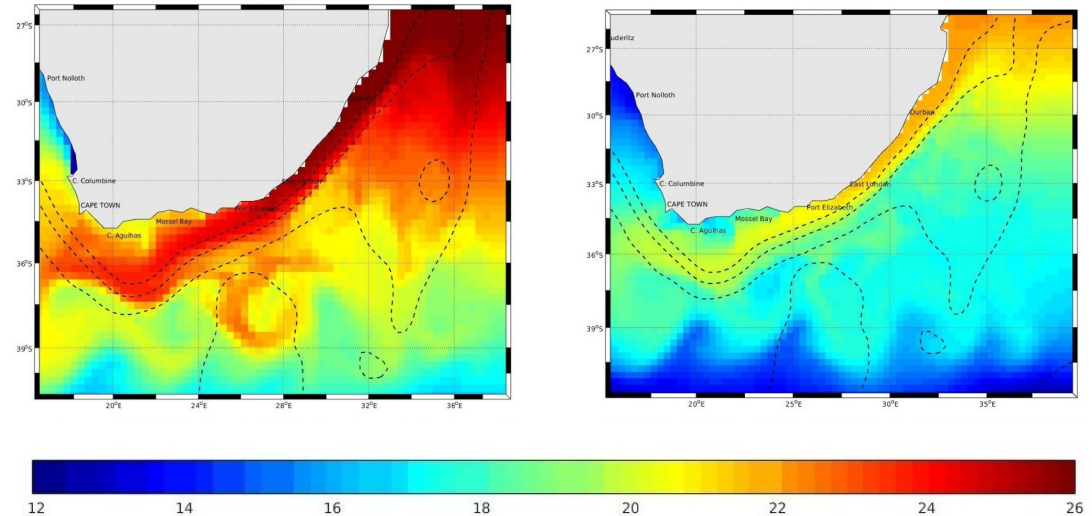


Figure 5 : Température de surface simulée à la fin de l'été et durant l'hiver austral

Caractéristiques du courant

- Grandeurs thermodynamiques : **température** et **salinité**, “**carte d'identité**” des masses d'eau
- **Température** : varie entre 12 et 26°C, **différence saisonnière** marquée
- **Salinité** : varie entre 34,8 et 35,8, **pas de variation** saisonnière significative

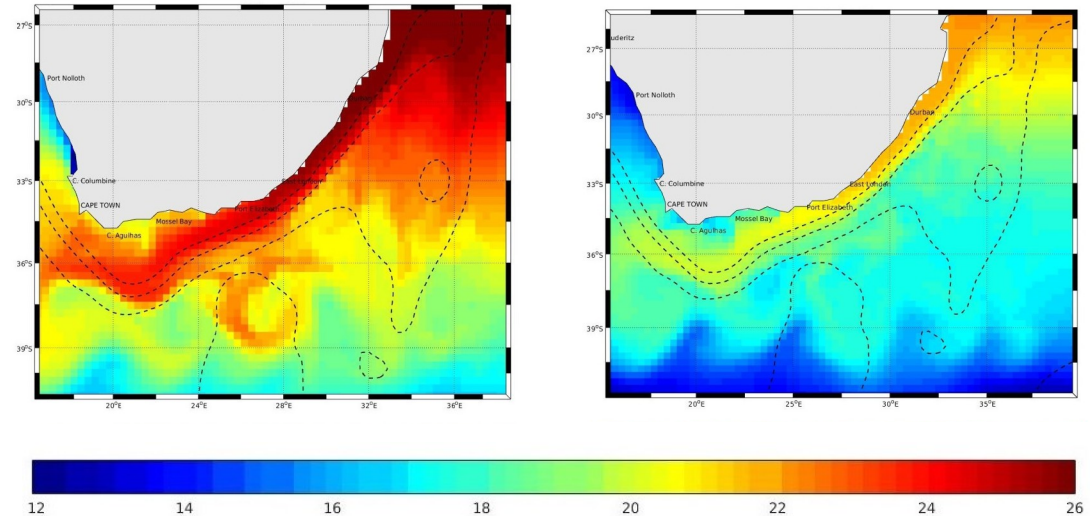


Figure 5 : Température de surface simulée à la fin de l'été et durant l'hiver austral

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Circulation et surélévation

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Circulation et surélévation

- Variables physiques déterminées
à partir des grandeurs
thermodynamiques

Circulation et surélévation

- Variables physiques déterminées à partir des grandeurs thermodynamiques
- **Vitesse** du courant : varie entre 0 et 1,5 m/s

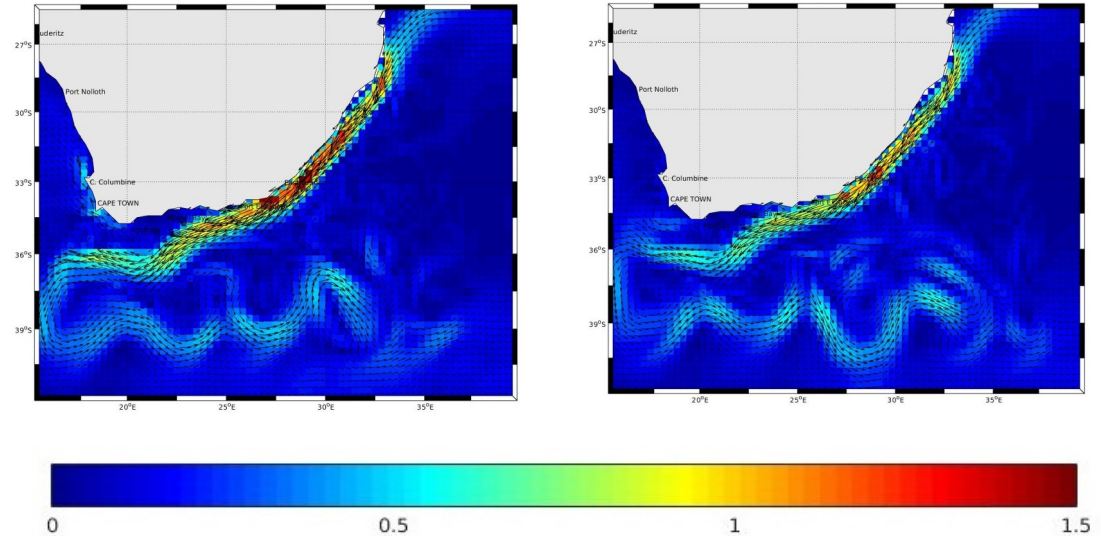


Figure 6 : Direction et intensité du courant de surface simulées à la fin de l'été et durant l'hiver austral

Circulation et surélévation

- Variables physiques déterminées à partir des grandeurs thermodynamiques
- **Vitesse** du courant : varie entre 0 et 1,5 m/s, **diminution** saisonnière de **0,3 m/s**

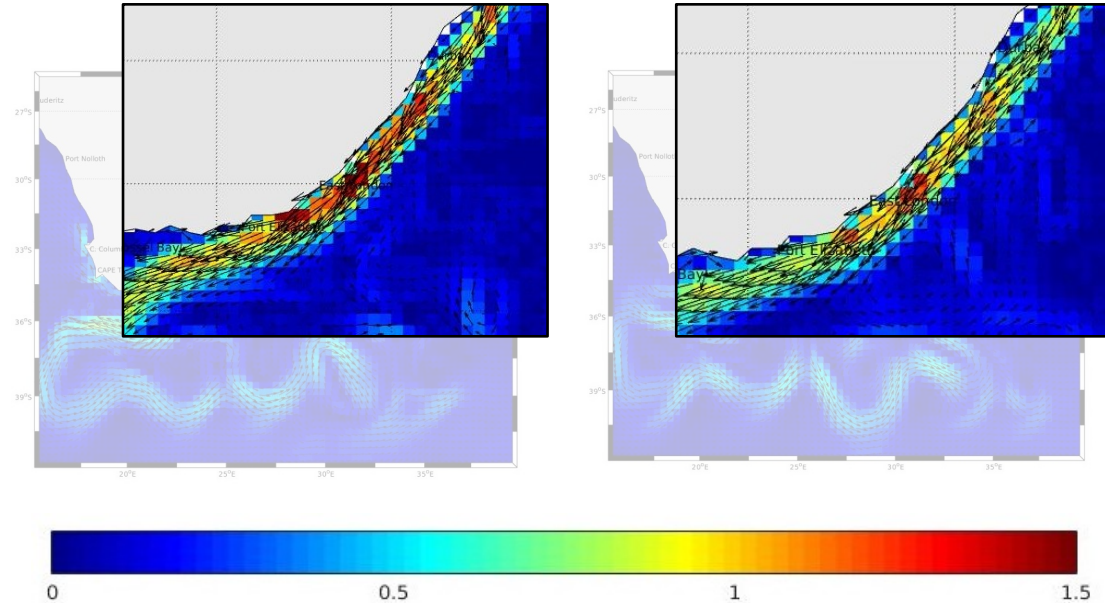


Figure 6 : Direction et intensité du courant de surface simulées à la fin de l'été et durant l'hiver austral

Circulation et surélévation

- Variables physiques déterminées à partir des grandeurs thermodynamiques
- **Vitesse** du courant : varie entre 0 et 1,5 m/s, **diminution** saisonnière de **0,3 m/s**
- **Surélévation** : varie entre + et – 0,4 m, **pas de variation** significative

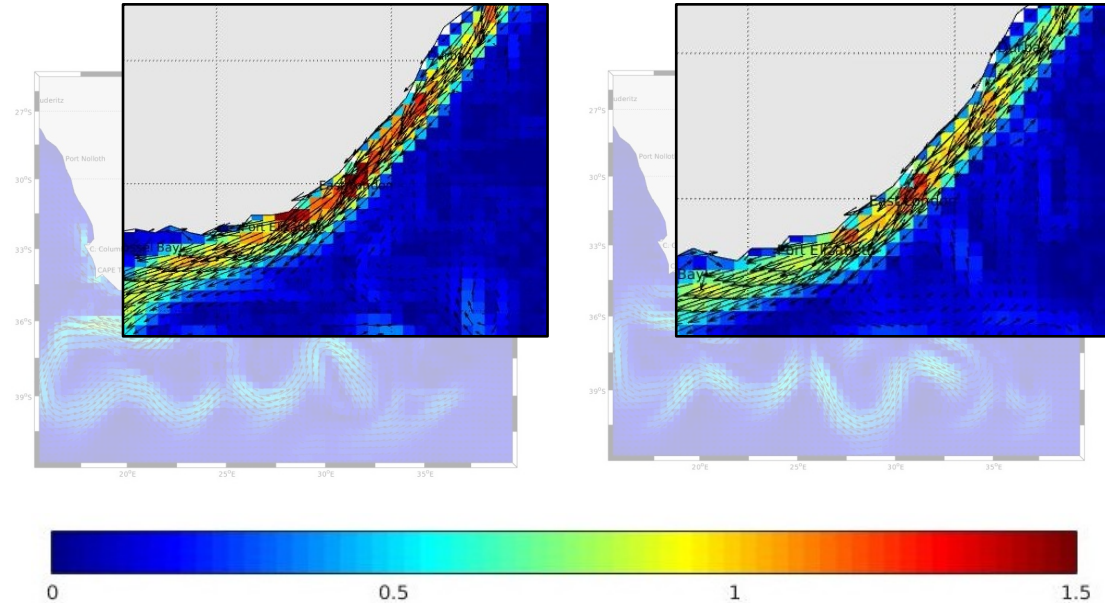


Figure 6 : Direction et intensité du courant de surface simulées à la fin de l'été et durant l'hiver austral

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Variations spatiales de la température

Variations spatiales de la température

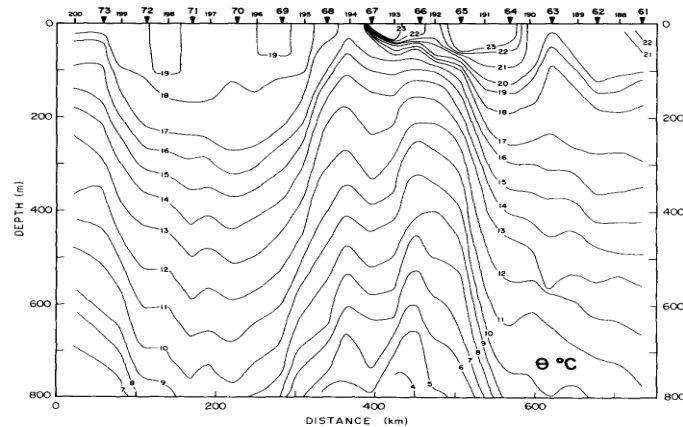


Figure 7 : Variations verticales de la température potentielle in situ et simulée le long d'un transect

Variations spatiales de la température

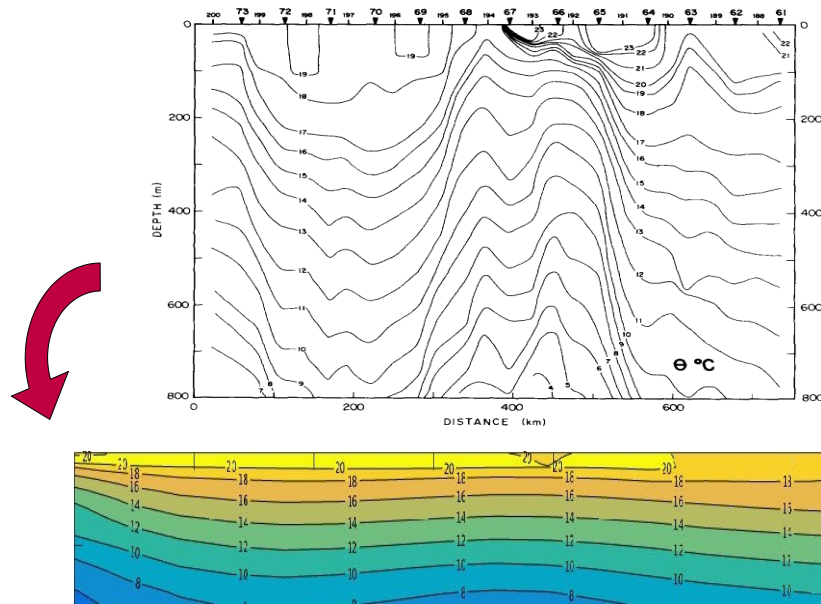


Figure 7 : Variations verticales de la température potentielle in situ et simulée le long d'un transect

Variations spatiales de la température

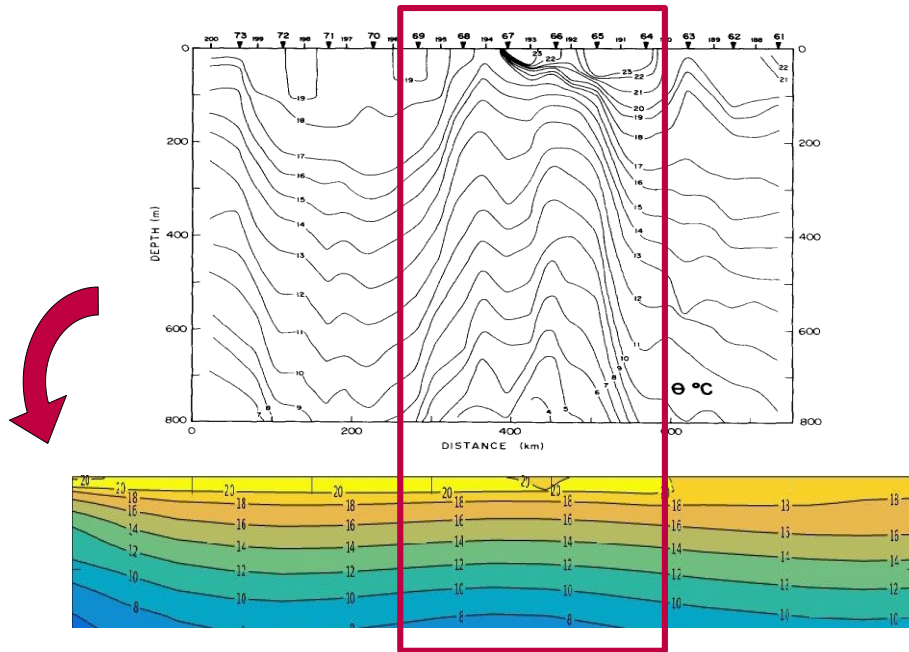


Figure 7 : Variations verticales de la température potentielle in situ et simulée le long d'un transect

Variations spatiales de la température

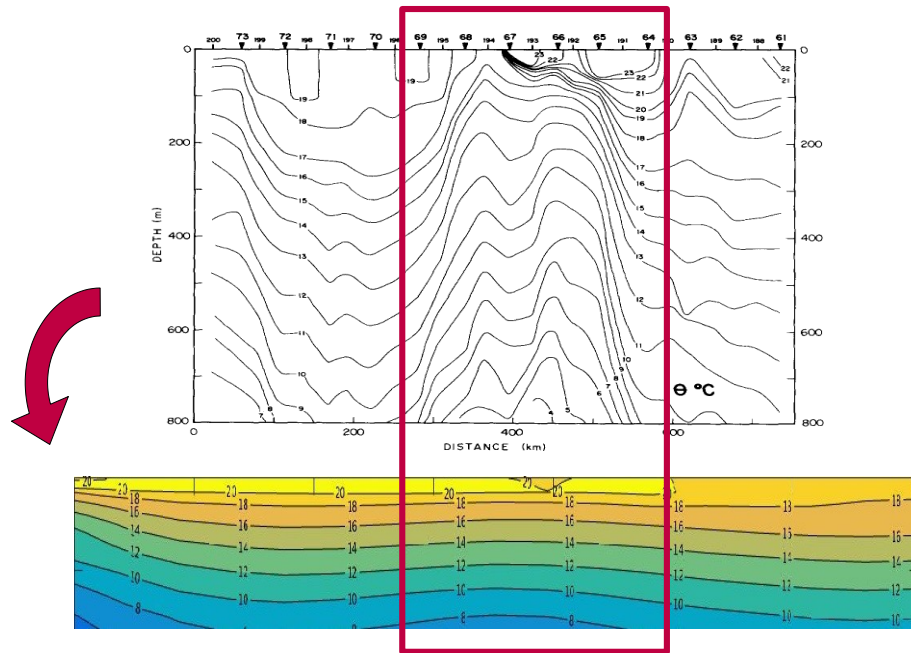


Figure 7 : Variations verticales de la température potentielle in situ et simulée le long d'un transect

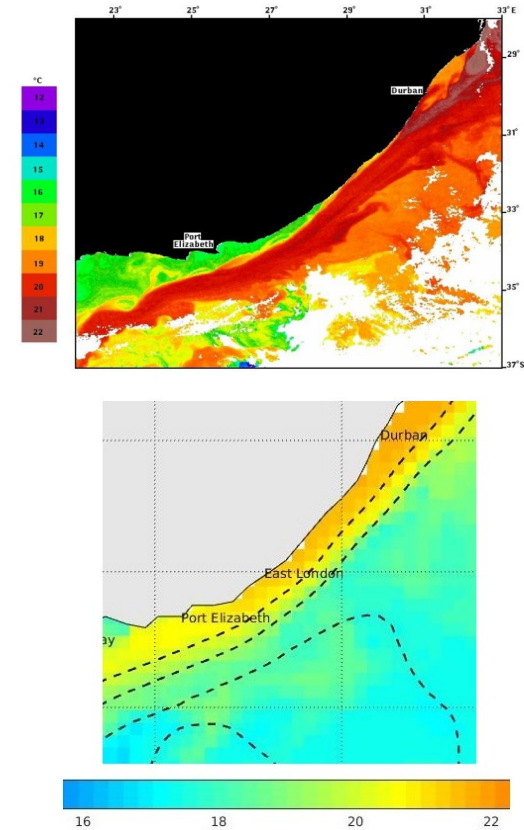


Figure 8 : Variations horizontales de la température de surface in situ et simulée

Variations spatiales de la température

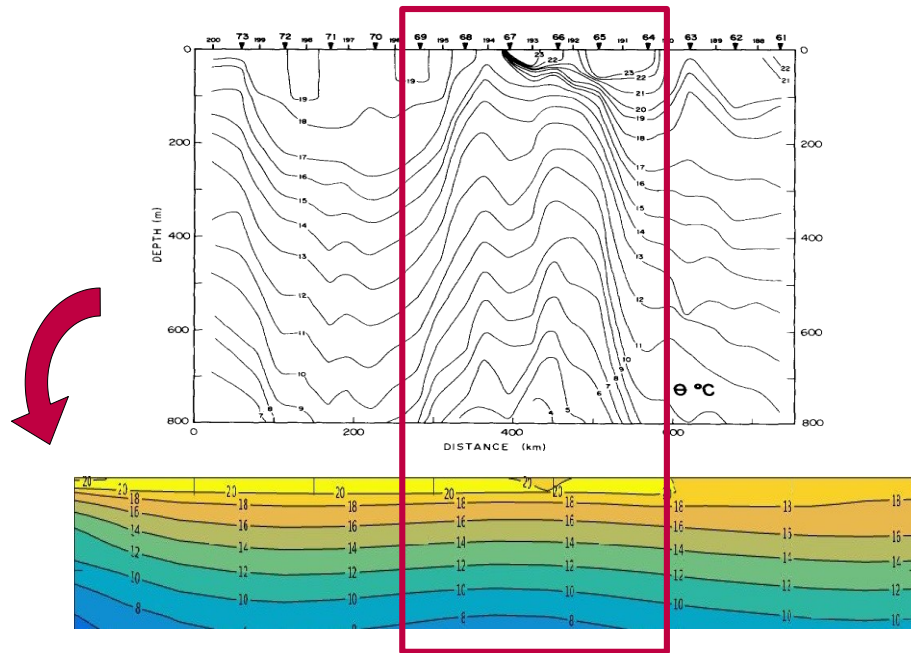


Figure 7 : Variations verticales de la température potentielle in situ et simulée le long d'un transect

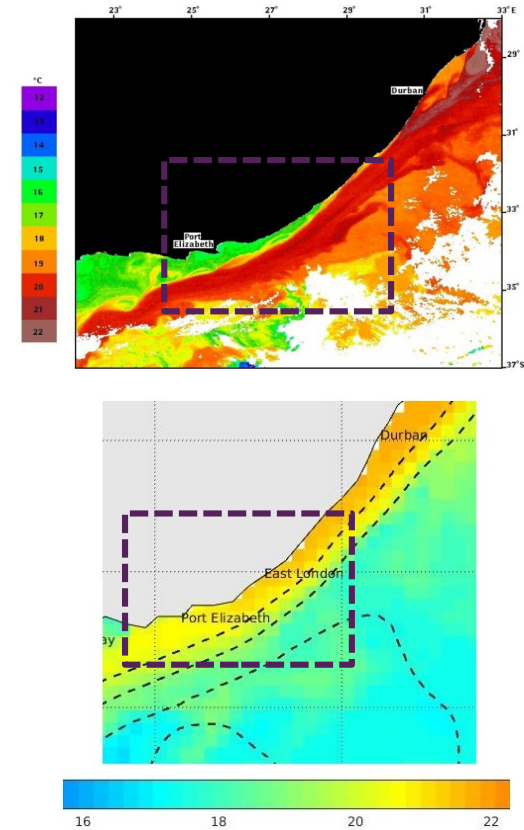


Figure 8 : Variations horizontales de la température de surface in situ et simulée

Variations spatiales de la température

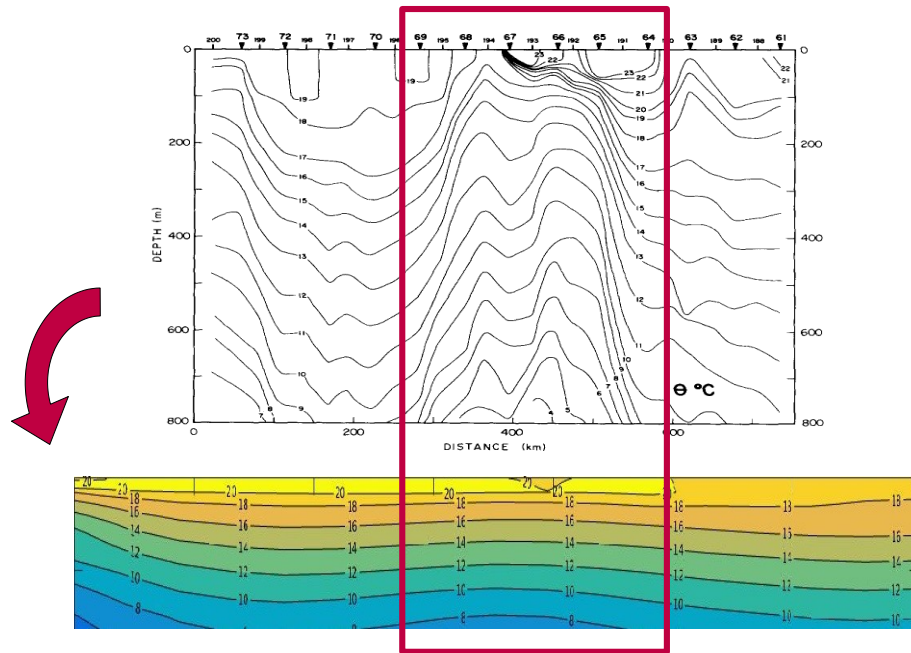


Figure 7 : Variations verticales de la température potentielle in situ et simulée le long d'un transect

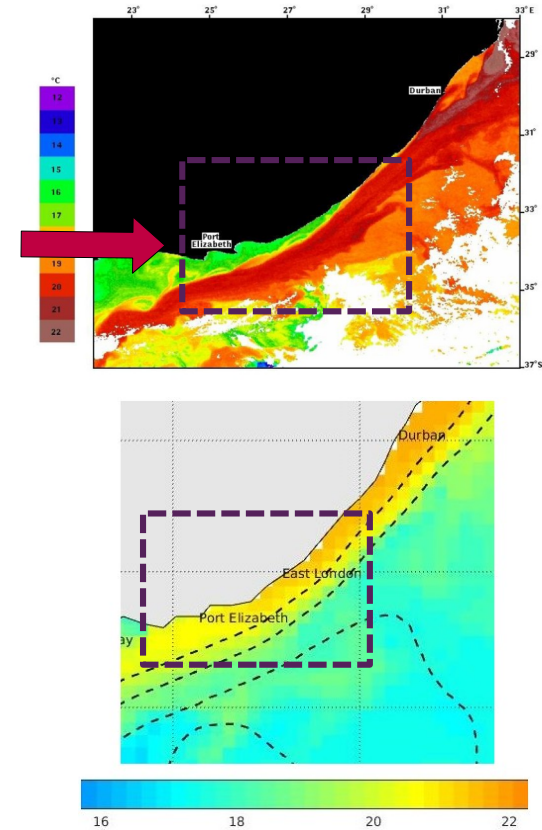


Figure 8 : Variations horizontales de la température de surface in situ et simulée

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Différences de circulation du courant

Différences de circulation du courant

- **Vitesses** horizontales : valeurs plus élevées dans la littérature (**+0,3 m/s** près des **côtes** et **+1 m/s** dans les **méandres**)

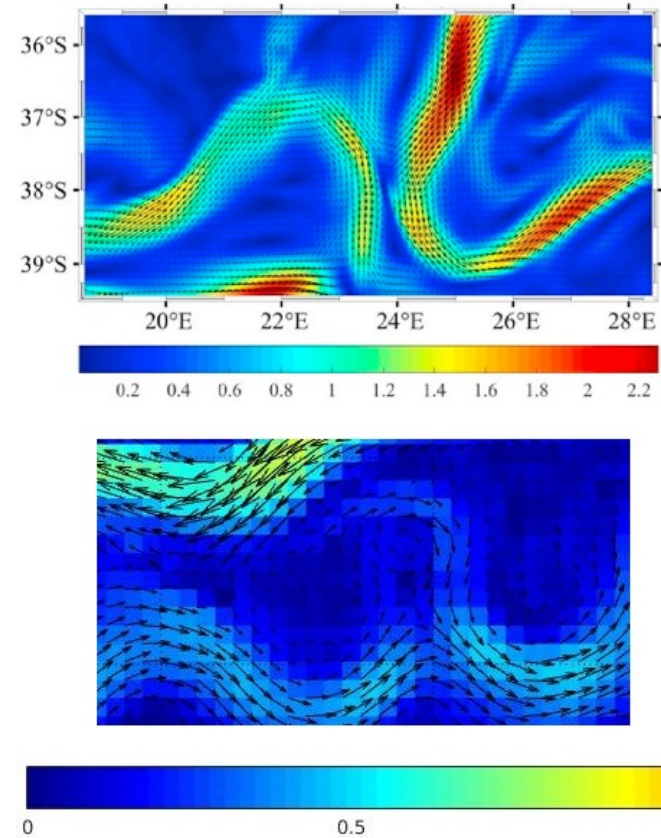


Figure 9 : Vitesse du courant simulée par les modèles SWAN (haut) et CROCO (bas)

Différences de circulation du courant

- **Vitesses** horizontales : valeurs plus élevées dans la littérature (**+0,3 m/s** près des **côtes** et **+1 m/s** dans les **méandres**)
- **Direction** du courant : **décalage** du courant à la côte **tardif**, **alimentation plus forte** de la **rétroflexion** mais plus faible des méandres

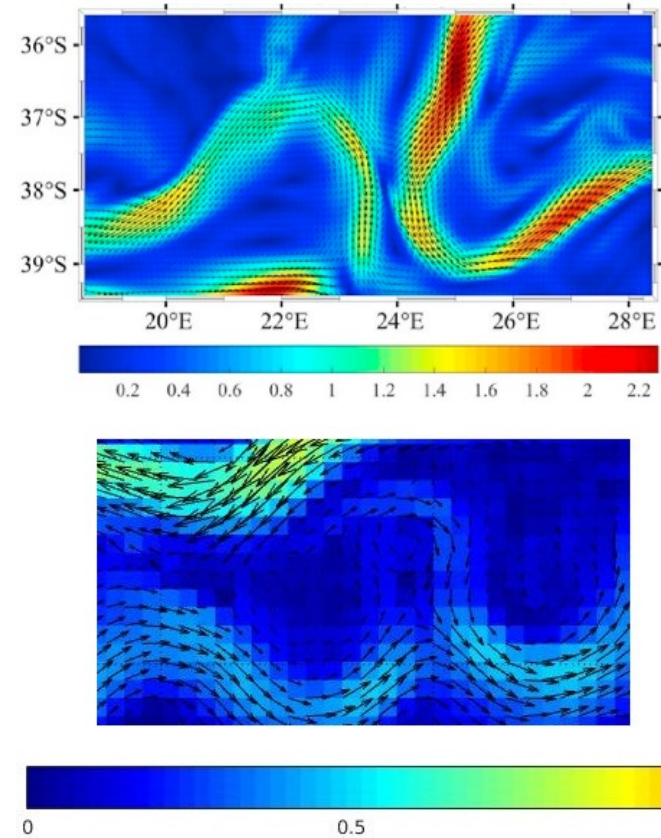


Figure 9 : Vitesse du courant simulée par les modèles SWAN (haut) et CROCO (bas)

Différences de circulation du courant

- **Vitesses** horizontales : valeurs plus élevées dans la littérature (**+0,3 m/s** près des **côtes** et **+1 m/s** dans les **méandres**)
- **Direction** du courant : **décalage** du courant à la côte **tardif**, **alimentation plus forte** de la **rétroflexion** mais plus faible des méandres



Sous-estimation de la vitesse des courants de surface et du forçage du vent

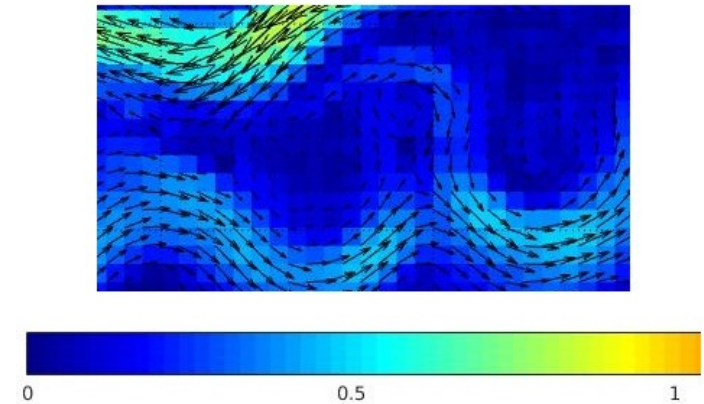
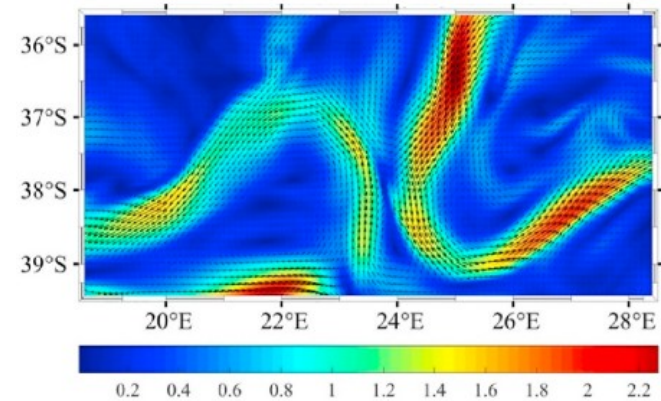


Figure 9 : Vitesse du courant simulée par les modèles SWAN (haut) et CROCO (bas)

Introduction

Matériels et
Méthodes

Résultats

Discussion

Conclusion

Points importants à retenir

Points importants à retenir

- Région du **courant des Aiguilles** : point-clé de la **circulation thermohaline globale**, source d'**eau chaude** et **salée** pour les bassins Atlantique et Indien Sud

Points importants à retenir

- Région du **courant des Aiguilles** : point-clé de la **circulation thermohaline globale**, source d'**eau chaude** et **salée** pour les bassins Atlantique et Indien Sud
- Modèle CROCO : **modèle réaliste à surface libre**, amélioré de ROMS et communautaire

Points importants à retenir

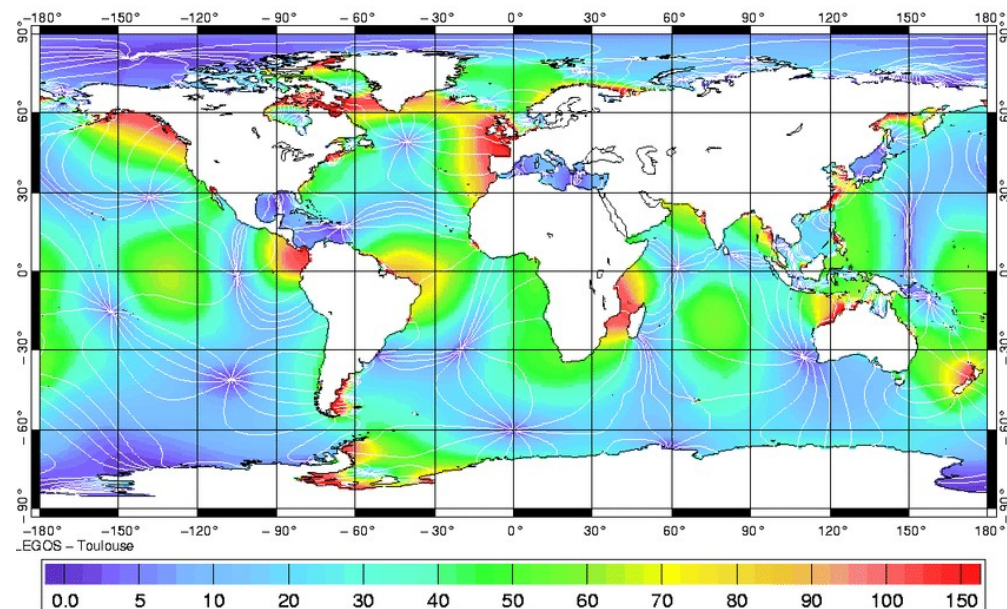
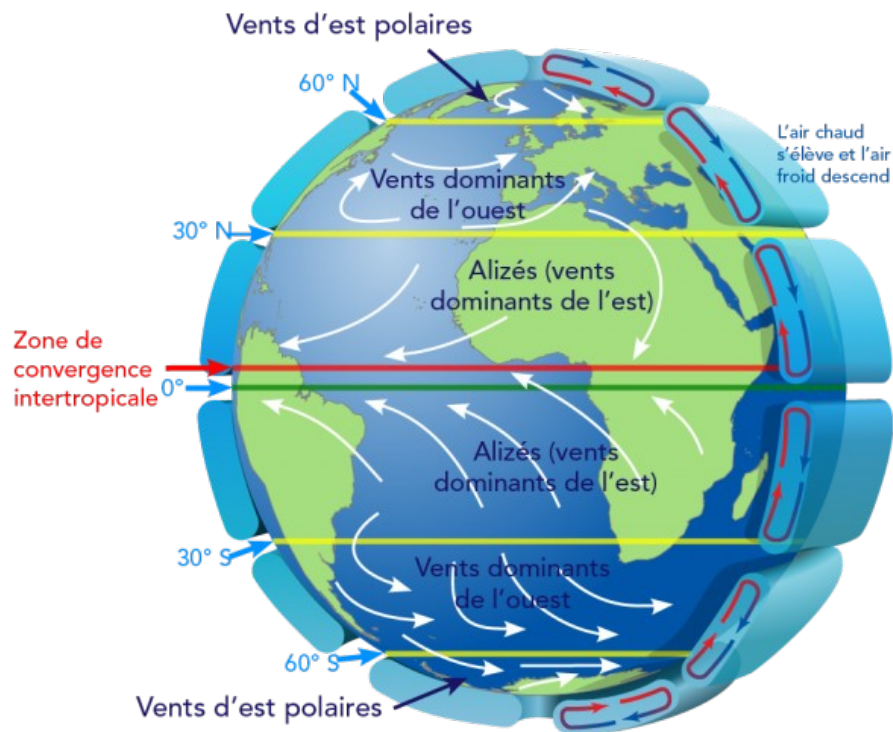
- Région du **courant des Aiguilles** : point-clé de la **circulation thermohaline globale**, source d'**eau chaude** et **salée** pour les bassins Atlantique et Indien Sud
- Modèle CROCO : **modèle réaliste à surface libre**, amélioré de ROMS et communautaire
- **Simulation concordante** avec la littérature à **grande échelle** (circulation, grandeurs thermodynamiques)

Points importants à retenir

- Région du **courant des Aiguilles** : point-clé de la **circulation thermohaline globale**, source d'**eau chaude** et **salée** pour les bassins Atlantique et Indien Sud
- Modèle CROCO : **modèle réaliste à surface libre**, amélioré de ROMS et communautaire
- **Simulation concordante** avec la littérature à **grande échelle** (circulation, grandeurs thermodynamiques)
- **Limites** : **sous-estimation** de la **vitesse** du courant et des **forçages** de surface, certainement due à une trop **basse résolution**, ainsi qu'à une non prise en compte de la **variabilité** de ces grandeurs

Merci de votre attention !

Caractéristiques de la zone d'étude



Équations primitives et hypothèses

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_H \nabla_H^2 u + A_Z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_H \nabla_H^2 v + A_Z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla)T = A_H \nabla_H^2 T + A_Z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho C_p} \frac{\partial I}{\partial z}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla)S = A_H \nabla_H^2 S + A_Z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$$

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

Plusieurs approximations utilisées :

- Approximation hydrostatique
- Hypothèse de Boussinesq
- Fermeture newtonnienne de la turbulence (Reynolds)
- Relation linéaire entre tension et gradients de vitesse
- Isotropie horizontale

+ Conditions initiales et aux frontières



Système d'équations fermées

Discrétisation temporelle : Time splitting

- Modélisation de phénomènes courts (houle, vagues) ET longs (ondes de gravité)
- Condition CFL donne deux paramètres :
 - Pas de temps externe (modèle 3D intégré sur la verticale)
 - Pas de temps interne (modèle 2D)

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{\sqrt{gh_{max}}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$dt \leq \frac{1}{C_I} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$