

# Modélisation CROCO de la mer Adriatique

Chloé Goret – Modélisation 3D

Master 1 Science de la mer  
Océanographie physique et processus biogéochimiques

*Aix Marseille Université - 2022-2023*

## I. Introduction

### Contexte :

Les eaux des bassins océaniques sont caractérisées par des conditions biogéochimiques et un régime de circulation turbulent développé

## I. Introduction

### Contexte :

Les eaux des bassins océaniques sont caractérisées par des conditions biogéochimiques et un régime de circulation turbulent développé

### Défis :

Comprendre comment les flux internes à l'océan et les mouvements océaniques sont forcés par les processus atmosphériques → **Modèles numériques 3D précis et robustes.**

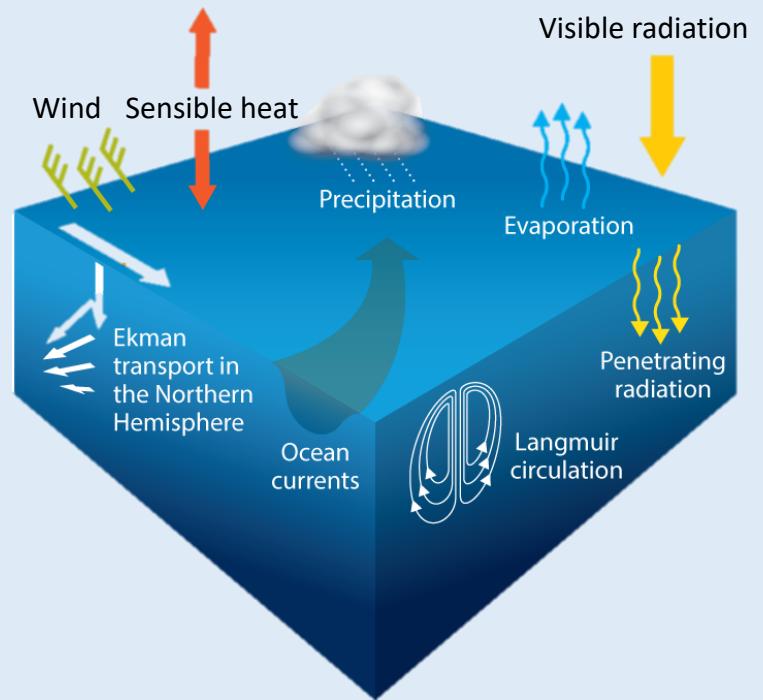


Figure 1: Les interactions océan-atmosphère intervenant à la couche limite, B.Gianpaolo (2018)

## I. Introduction

### Contexte :

Les eaux des bassins océaniques sont caractérisées par des conditions biogéochimiques et un régime de circulation turbulent développé

### Défis :

Comprendre comment les flux internes à l'océan et les mouvements océaniques sont forcés par les processus atmosphériques → **Modèles numériques 3D précis et robustes.**

*The Adriatic Sea General Circulation (A.Artegiani et al 1997)*

**Générer une simulation climatologique réaliste de la dynamique du bassin Adriatique à l'échelle pluriannuelle grâce au code communautaire « Coastal and Regional Ocean Community » (CROCO).**

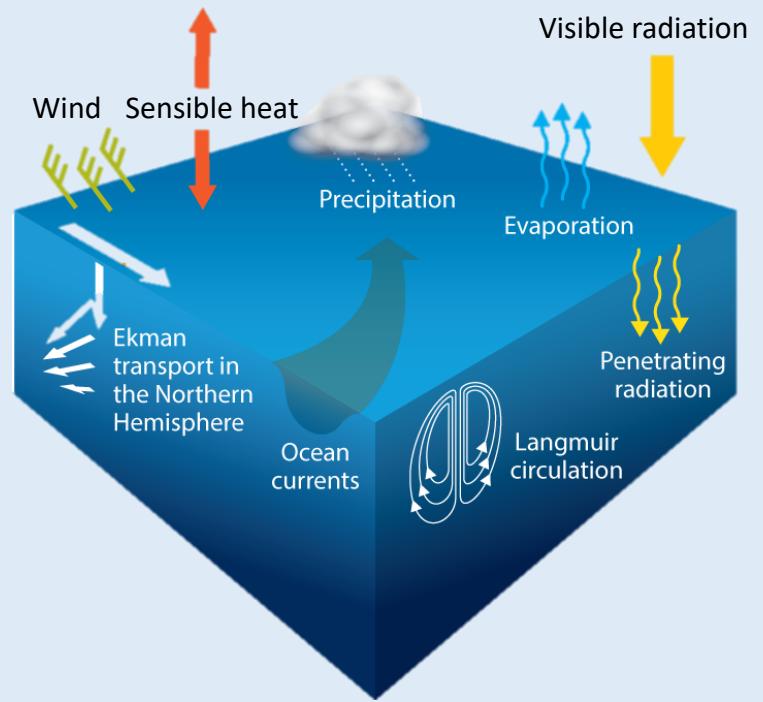


Figure 1: Les interactions océan-atmosphère intervenant à la couche limite, B.Gianpaolo (2018)

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

**Modèle aux équations primitives 3D :**

- Nouvelle version de ROMS\_AGRIF
- 6 variables :  $u$  et  $v$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $p$

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

#### Modèle aux équations primitives 3D :

- Nouvelle version de ROMS\_AGRIF
- 6 variables :  $u$  et  $v$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $p$

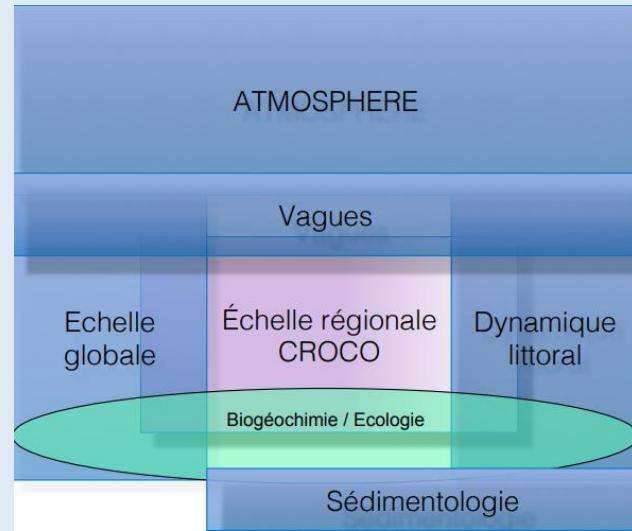


Figure 2: Schéma des modèles couplés dans CROCO F. Auclair et al. (2016)

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

#### Modèle aux équations primitives 3D :

- Nouvelle version de ROMS\_AGRIF
- 6 variables :  $u$  et  $v$ ,  $\rho$ ,  $\eta$ ,  $p$

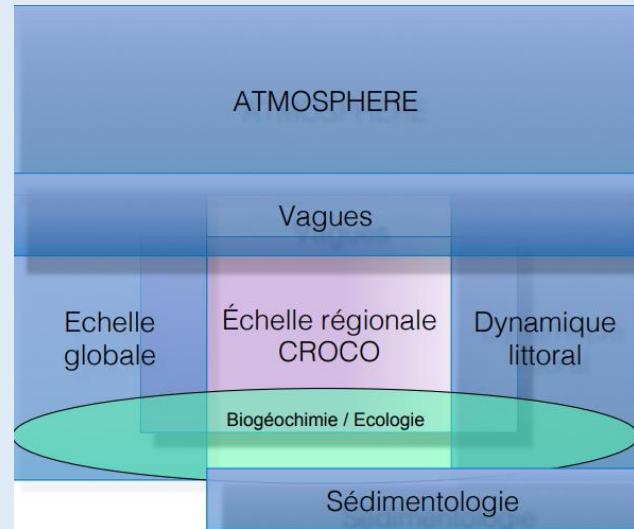


Figure 2: Schéma des modèles couplés dans CROCO F. Auclair et al. (2016)

#### Equations d'évolution hydrodynamique :

Equations du mouvement de Navier stockes :

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

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

Equations de transport de la température :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = - \frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_0 C_0} \frac{\partial I}{\partial z}$$

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

$$\rho \equiv \rho_0(T, S)$$

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

Equation d'état de l'eau de mer (TEOS10) :

Equation de continuité :

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

**Discrétisation spatiale :**

Méthode des différences finies

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

Discrétisation spatiale :

Méthode des différences finies

Grille Arakawa C sur l'horizontal

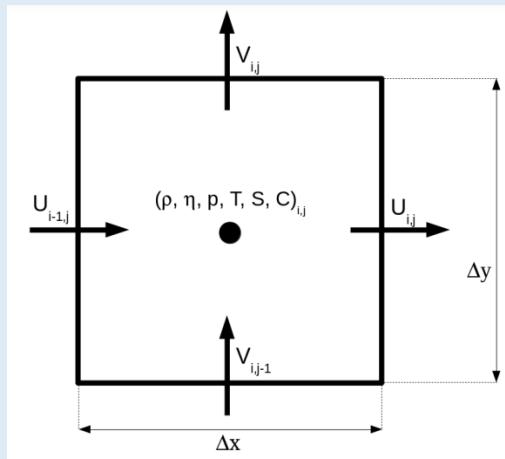


Figure 3: Grille d'Arakawa C.  
X. Couvelard (2014)

Coordonnées  $\sigma$  sur la verticale

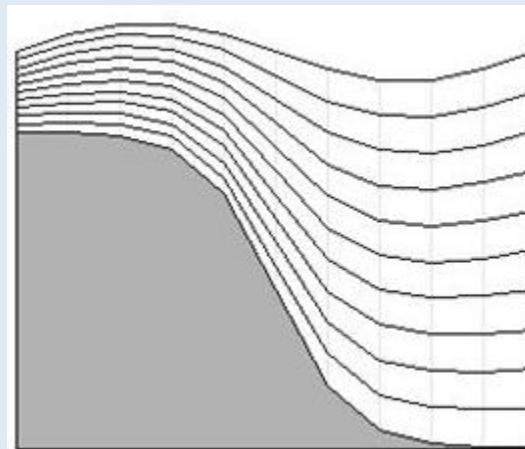


Figure 4: Grille de coordonnées  $\sigma$ . F. Khorrami et al. (2017)

## II. Matériel et méthode

### 1. Quelques informations sur CROCO

#### Discrétisation spatiale :

##### Méthode des différences finies

Grille Arakawa C sur l'horizontal

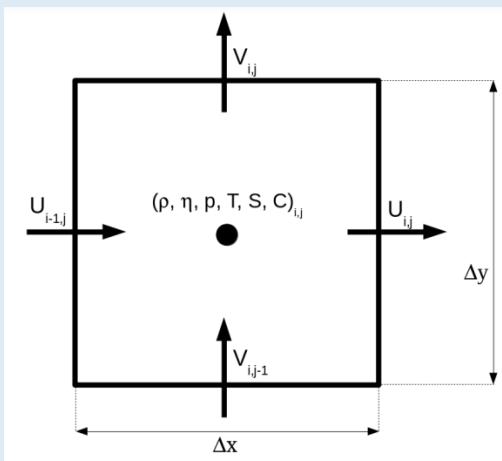


Figure 3: Grille d'Arakawa C.  
X. Couvelard (2014)

Coordonnées  $\sigma$  sur la verticale

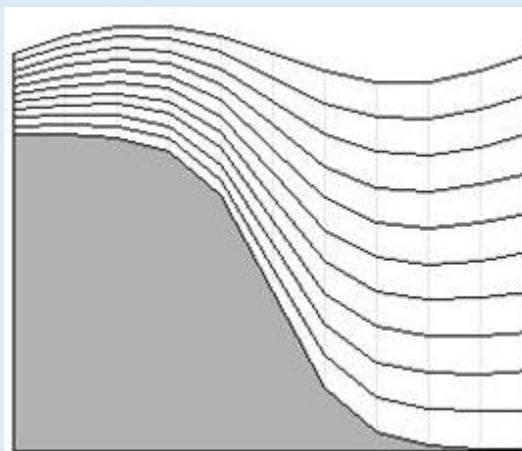


Figure 4: Grille de coordonnées  $\sigma$ . F. Khorrami et al. (2017)

#### Discrétisation temporelle :

##### « Condition CFL » :

- Stabilité et convergence

##### « Time splitting » :

- Mode externe pour équations intégrées sur la vertical ( $u, v, n$ )
- Mode interne pour équations 3D ( $u, v, T, S, p$ )

## II. Matériel et méthode

### 2. Le site d'étude : La mer Adriatique

## II. Matériel et méthode

### 2. Le site d'étude : La mer Adriatique

#### Géographie et bathymétrie :

- Localisation: (42°48' N, 15°30'E)
- Superficie : 139.000 km<sup>2</sup>.
- Orientation: Nord-ouest Sud-est
- Profondeur maximum : 1233 m
- Profondeur moyenne : 252m

## II. Matériel et méthode

### 2. Le site d'étude : La mer Adriatique

#### Géographie et bathymétrie :

- Localisation: (42°48' N, 15°30'E)
- Superficie : 139.000 km<sup>2</sup>.
- Orientation: Nord-ouest Sud-est
- Profondeur maximum : 1233 m
- Profondeur moyenne : 252m



Figure 5: Circulation de surface du bassin adriatique

## II. Matériel et méthode

### 2. Le site d'étude : La mer Adriatique

#### Géographie et bathymétrie :

- Localisation: (42°48' N, 15°30'E)
- Superficie : 139.000 km<sup>2</sup>.
- Orientation: Nord-ouest Sud-est
- Profondeur maximum : 1233 m
- Profondeur moyenne : 252m

#### Régime météorologique :

- Etés chauds (30°C), humides et dégagés
- Hivers froids (7°C) et partiellement nuageux
- Régime de vent de nord-est (Bora) ~ 5m/s



Figure 5: Circulation de surface du bassin adriatique

## II. Matériel et méthode

### 3. Implémentation du modèle

## II. Matériel et méthode

### 3. Implémentation du modèle

Résolution spatiale :

[\*\*fichier ad\\_findgeocoord.m\*\*](#) : Choix des coordonnées (Matlab)

[\*\*crocotools\\_param\*\*](#) : Définition des coordonnées géographiques et configuration des paramètres

Tableau 1 : Coordonnées géographique et résolution de la grille

Lonmin [degrés]	Lonmax [degrés]	Latmin [degrés]	Latmax [degrés]	DI [degrés]	N
12	20	41	46	1/10	32

## II. Matériel et méthode

### 3. Implémentation du modèle

#### Résolution spatiale :

[fichier ad\\_findgeocoord.m](#) : Choix des coordonnées (Matlab)

[croctools\\_param](#) : Définition des coordonnées géographiques et configuration des paramètres

Tableau 1 : Coordonnées géographique et résolution de la grille

Lonmin [degrés]	Lonmax [degrés]	Latmin [degrés]	Latmax [degrés]	DI [degrés]	N
12	20	41	46	1/10	32

[make\\_grid](#) : Création de la grille, le mask et la bathymétrie (Matlab)

[Edit\\_masque](#) : Ajustement des surfaces terre/mer (Matlab)

Tableau 2 : Paramètres de la grille du modèle à la mer Adriatique

LLm	MMm	Min dx[ km]	Min dy [km]	Max dx [km]	Max dy [km]	Hmax [m]	Hmin [m]
83	72	7,74	7,75	8,45	8,44	1182,74	10

[param.hs](#) : Définition des paramètres de la grille

[cppdefsh.h](#) : Définition d'une nouvelle clé de configuration et activation des frontières

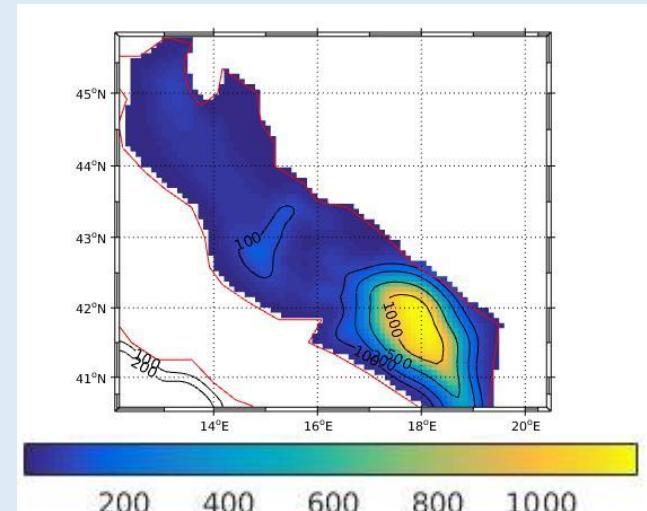


Figure 6: Bathymétrie du modèle

## II. Matériel et méthode

### 3. Implémentation du modèle

#### Conditions limites et conditions initiales :

**make\_clim.m** : Forcages aux conditions limites (Matlab) → Comprehensive Ocean Atmosphere data Set (COADS)

**make\_forcing.m** : Conditions initiales (Matlab) → World Ocean Atlas (WOA) 1784 et 2004.

## II. Matériel et méthode

### 3. Implémentation du modèle

#### Conditions limites et conditions initiales :

[make\\_clim.m](#) : Forçages aux conditions limites (Matlab) → Comprehensive Ocean Atmosphere data Set (COADS)

[make\\_forcing.m](#) : Conditions initiales (Matlab) → World Ocean Atlas (WOA) 1784 et 2004.

#### Résolution temporelle:

[ad\\_cfl.m](#) : Détermination le pas de temps externe (DTEcfl) et interne (dt) a partir du critère CFL

[croco.in](#) : Définition paramètres temporels

Tableau 3 : Paramètres temporelles basé sur le ‘times splitting’ et le critère CFL

NTIMES [ iteration]	NDTFAST [s]	NRST [ iteration]	NAVG [ iteration]	NWRT [iteration]	dt [s]
1800	60	1800	180	180	1440

## II. Matériel et méthode

### 3. Implémentation du modèle

#### Conditions limites et conditions initiales :

**make\_clim.m** : Forçages aux conditions limites (Matlab) → Comprehensive Ocean Atmosphere data Set (COADS)

**make\_forcing.m** : Conditions initiales (Matlab) → World Ocean Atlas (WOA) 1784 et 2004.

#### Résolution temporelle:

**ad\_cfl.m** : Détermination le pas de temps externe (DTEcfl) et interne (dt) a partir du critère CFL

**croco.in** : Définition paramètres temporels

Tableau 3 : Paramètres temporelles basé sur le ‘times splitting’ et le critère CFL

NTIMES [ iteration]	NDTFAST [s]	NRST [ iteration]	NAVG [ iteration]	NWRT [iteration]	dt [s]
1800	60	1800	180	180	1440

#### Compilation et visualisation des simulations :

**Commande « ./jobcomp »** : Compilation du modèle

**Commande « sbatch ./slurm\_run\_croco.sh »** : Lancement du modèle sur le cluster

### III. Résultats et discussion

#### 1. Diagnostique du modèle

## III. Résultats et discussion

### 1. Diagnostique du modèle

Commande « `croco_diag` » et « `croco_plot` » : Diagnostique du modèle

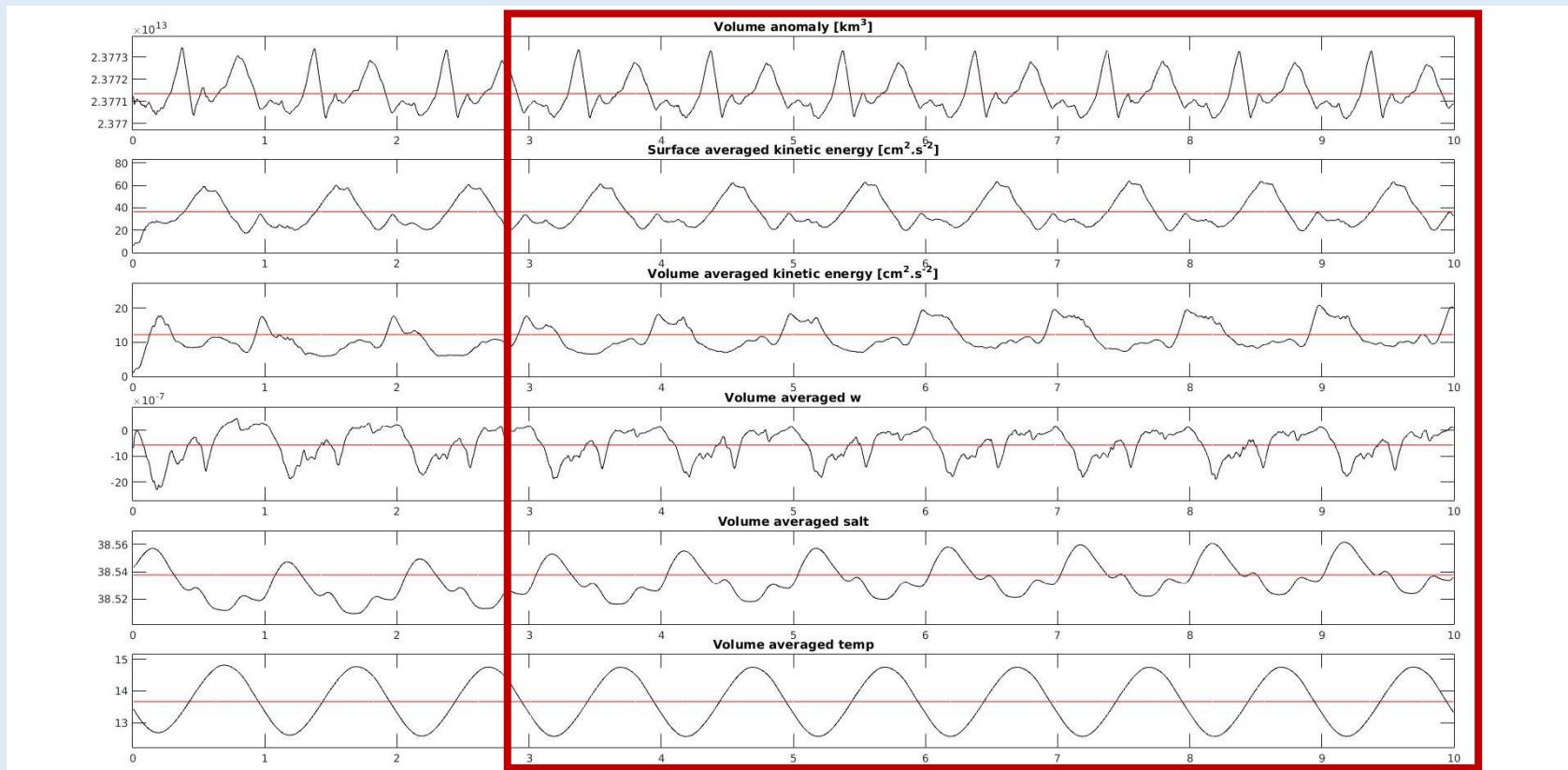


Figure 7: Diagnostique de stabilité du modèle

### III. Résultats et discussion

#### 2. Variations saisonnières des températures au Sud

### III. Résultats et discussion

#### 2. Variations saisonnières des températures au Sud

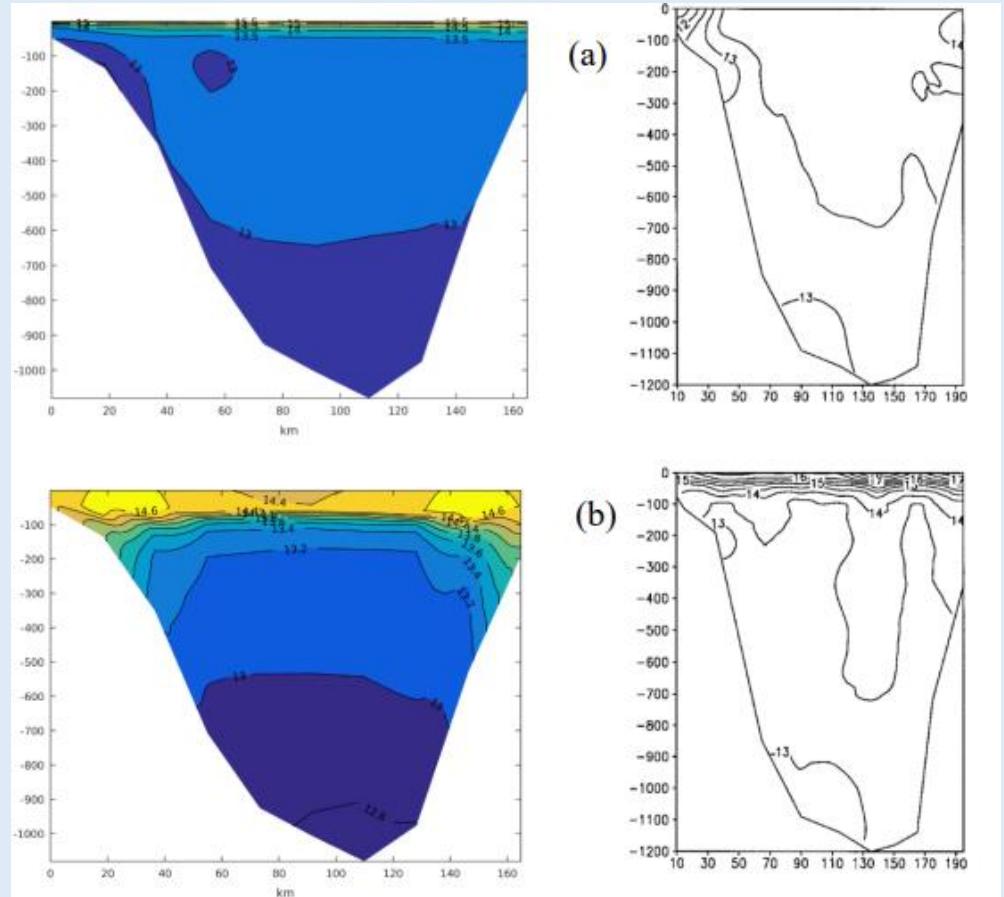


Figure 8: Distribution des températures ( $^{\circ}\text{C}$ ) de surface simulés par le modèle (gauche) et in situ (droite) pendant l'hiver (a) et le printemps (b) à Bari.

### III. Résultats et discussion

#### 2. Variations saisonnières des températures au Sud

En hiver :

- Colonne d'eau peu stratifiée
- Gradient est-ouest en surface ( 14-12°C)
- Températures stables a partir de 50m (13°C)

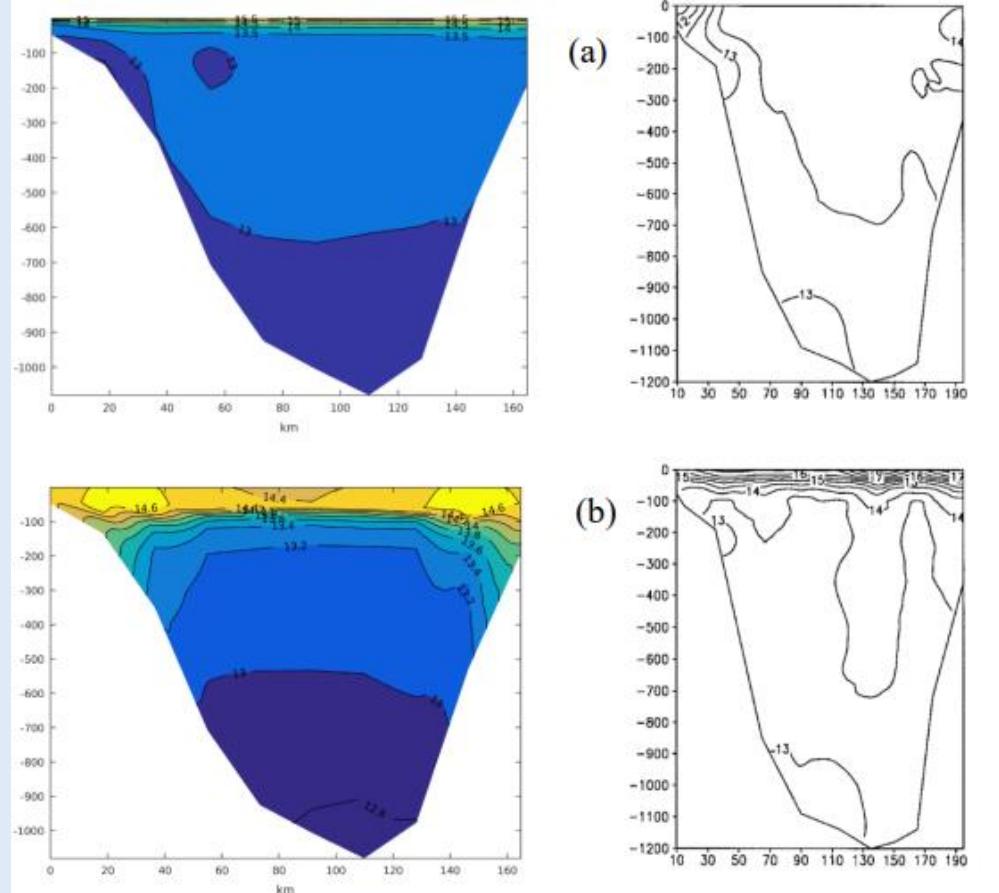
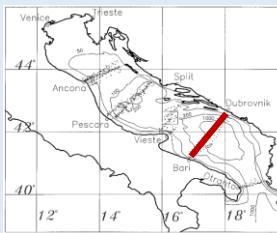


Figure 8: Distribution des températures (°C) de surface simulés par le modèle (gauche) et in situ (droite) pendant l'hiver (a) et le printemps (b) à Bari.

### III. Résultats et discussion

#### 2. Variations saisonnières des températures au Sud

##### En hiver :

- Colonne d'eau peu stratifiée
- Gradient est-ouest en surface ( 14-12°C)
- Températures stables a partir de 50m (13°C)

##### Printemps :

- Colonne d'eau plus chaude et stratifiée aux extrémités de la section qu'au milieu
- Températures stables partir de 300 m (13,2-12,8 °C)

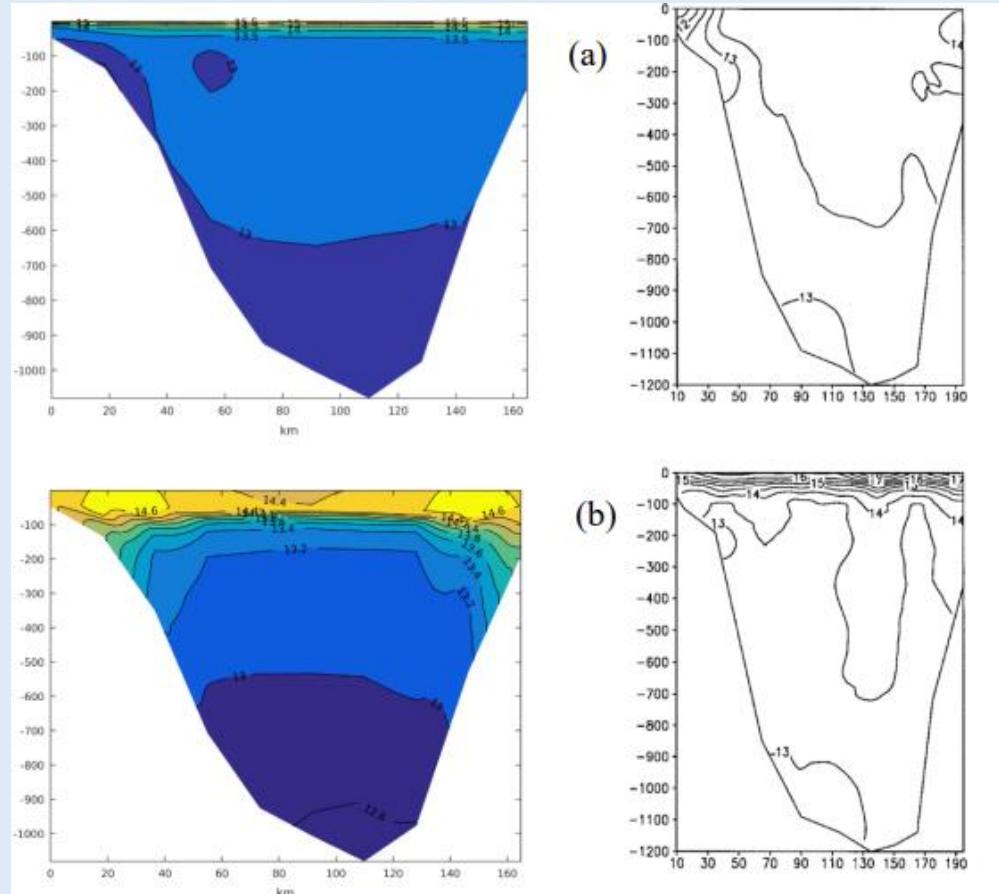
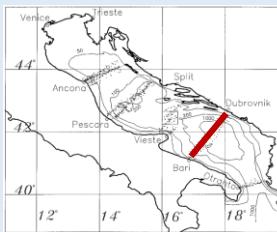


Figure 8: Distribution des températures (°C) de surface simulés par le modèle (gauche) et in situ (droite) pendant l'hiver (a) et le printemps (b) à Bari.

### III. Résultats et discussion

#### 2. Variations saisonnières des températures au Sud

##### En hiver :

- Colonne d'eau peu stratifiée
- Gradient est-ouest en surface ( 14-12°C)
- Températures stables a partir de 50m (13°C)

##### Printemps :

- Colonne d'eau plus chaude et stratifiée aux extrémités de la section qu'au milieu
- Températures stables partir de 300 m (13,2-12,8 °C)

- **Sous-estimation des températures de surfaces au printemps**
- **Mauvaise représentation des températures plus chaudes de la LIW**

« During spring, the MLIW is evident only on the eastern side of the basin » (A. Artegiani et al. 1997)

- **Représentation fidèle de l'AdDW au fond**

« SAdDW with  $T$  , 13.08C and  $S$  , 38.6 psu » (A. Artegiani et al. 1997)

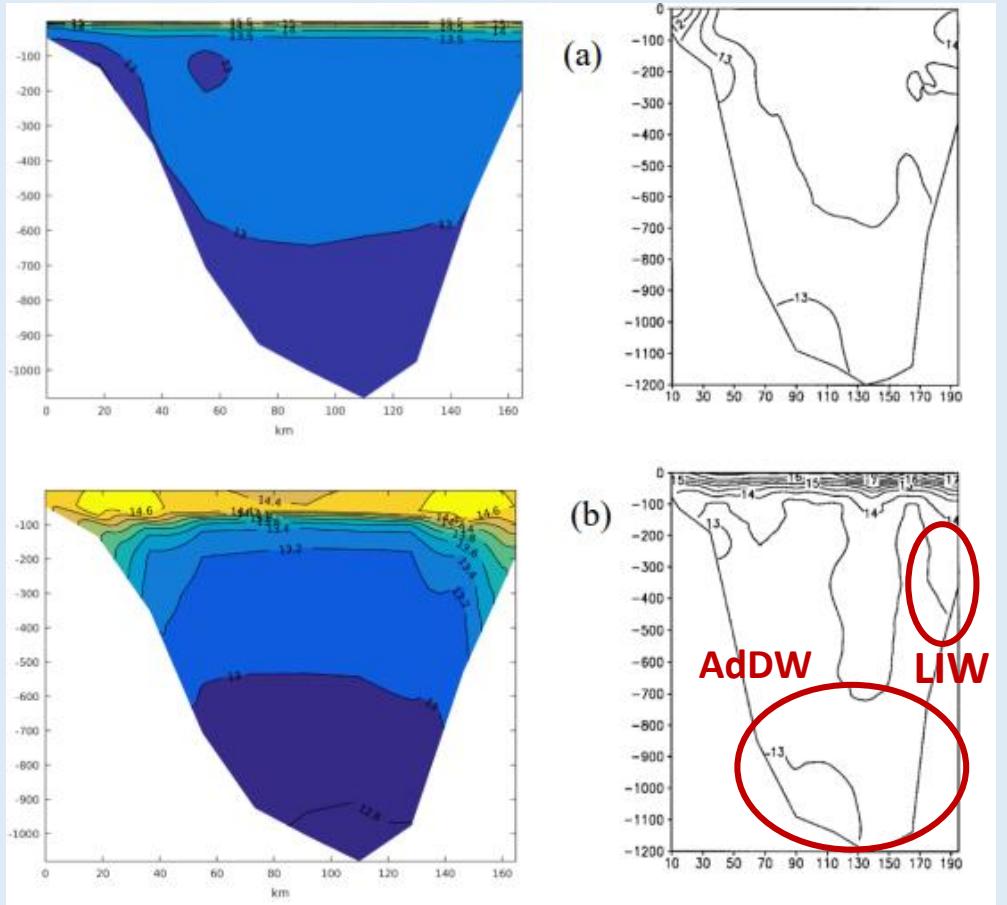


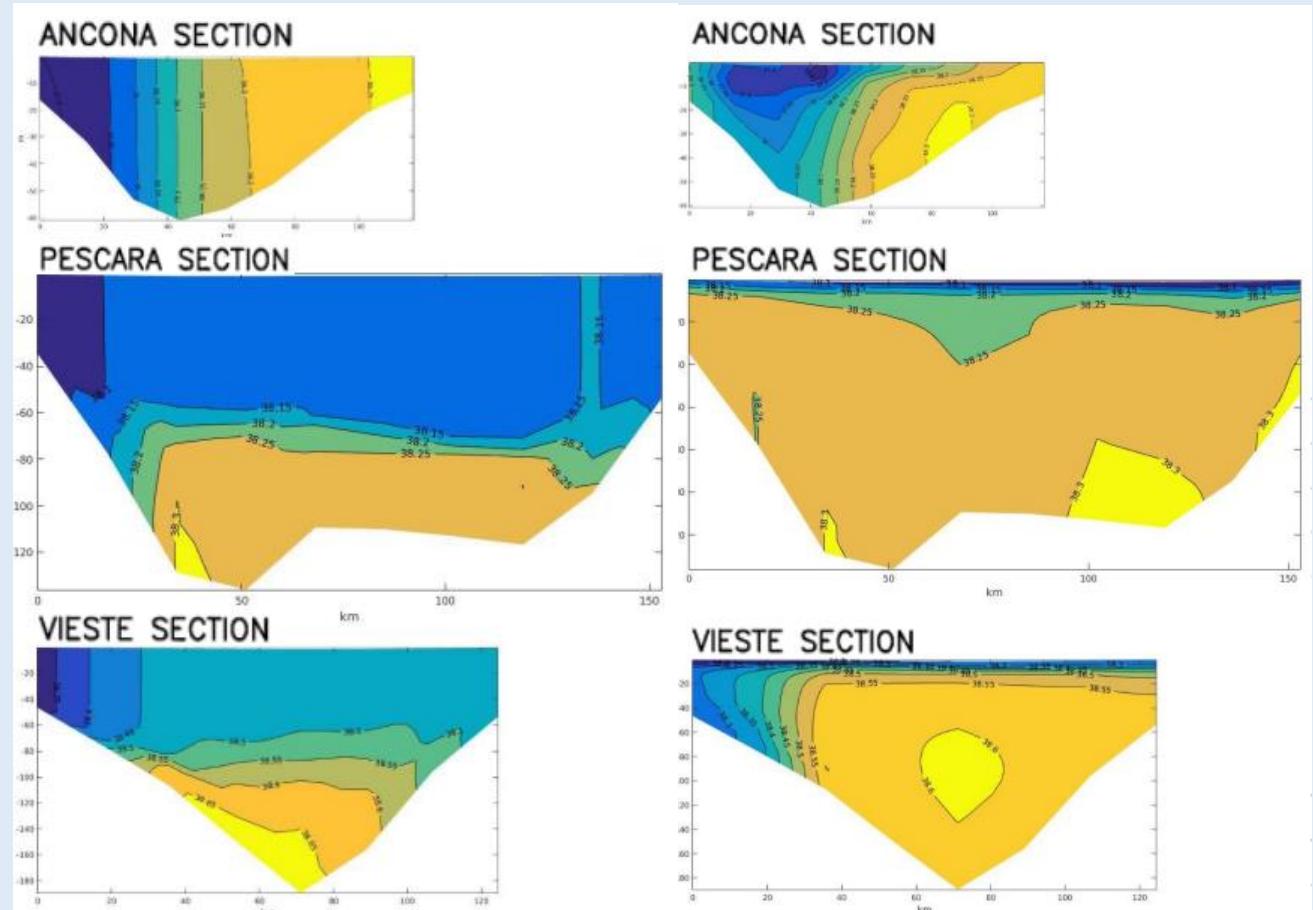
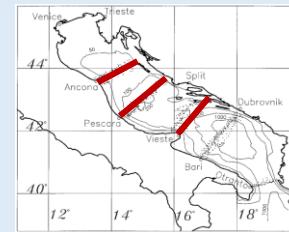
Figure 8: Distribution des températures (°C) de surface simulés par le modèle (gauche) et in situ (droite) pendant l'hiver (a) et le printemps (b) à Bari.

### III. Résultats et discussion

#### 3. Variations saisonnières de la salinité

### III. Résultats et discussion

#### 3. Variations saisonnières de la salinité



### III. Résultats et discussion

#### 3. Variations saisonnières de la salinité

En hiver :

- Homogénéisation vertical  
→ Bora
- Gradient est-ouest en surface (38,7 -37,9)  
→ Apports fluviaux et précipitation à l'Ouest
- Salinité maximum au sud (38,5-38,65)  
→ Plongée de l'AdDW

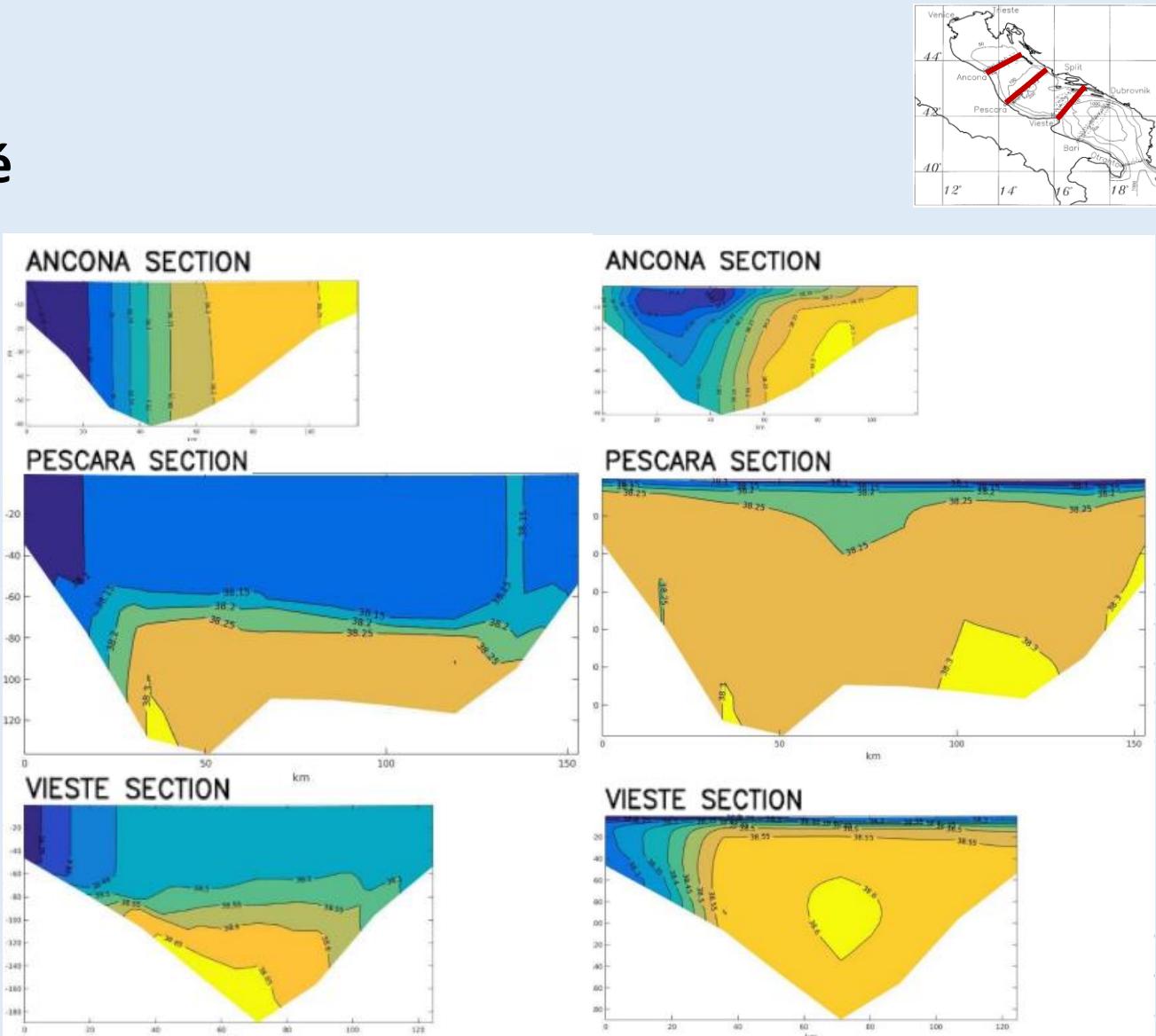


Figure 9: Distribution de la salinité (psu) simulé par le modèle en hiver (gauche) et au printemps (droite) au niveau des sections de Ancona, Pescara et Vieste..

### III. Résultats et discussion

#### 3. Variations saisonnières de la salinité

##### En hiver :

- Homogénéisation vertical  
→ Bora
- Gradient est-ouest en surface (38,7 -37,9)  
→ Apports fluviaux et précipitation à l'Ouest
- Salinité maximum au sud (38,5-38,65)  
→ Plongée de l'AdDW

##### Printemps :

- Diminution des salinités de surfaces et atténuation du gradient est-ouest  
→ Diminution des précipitations au Nord
- Augmentation rapide près des côtes

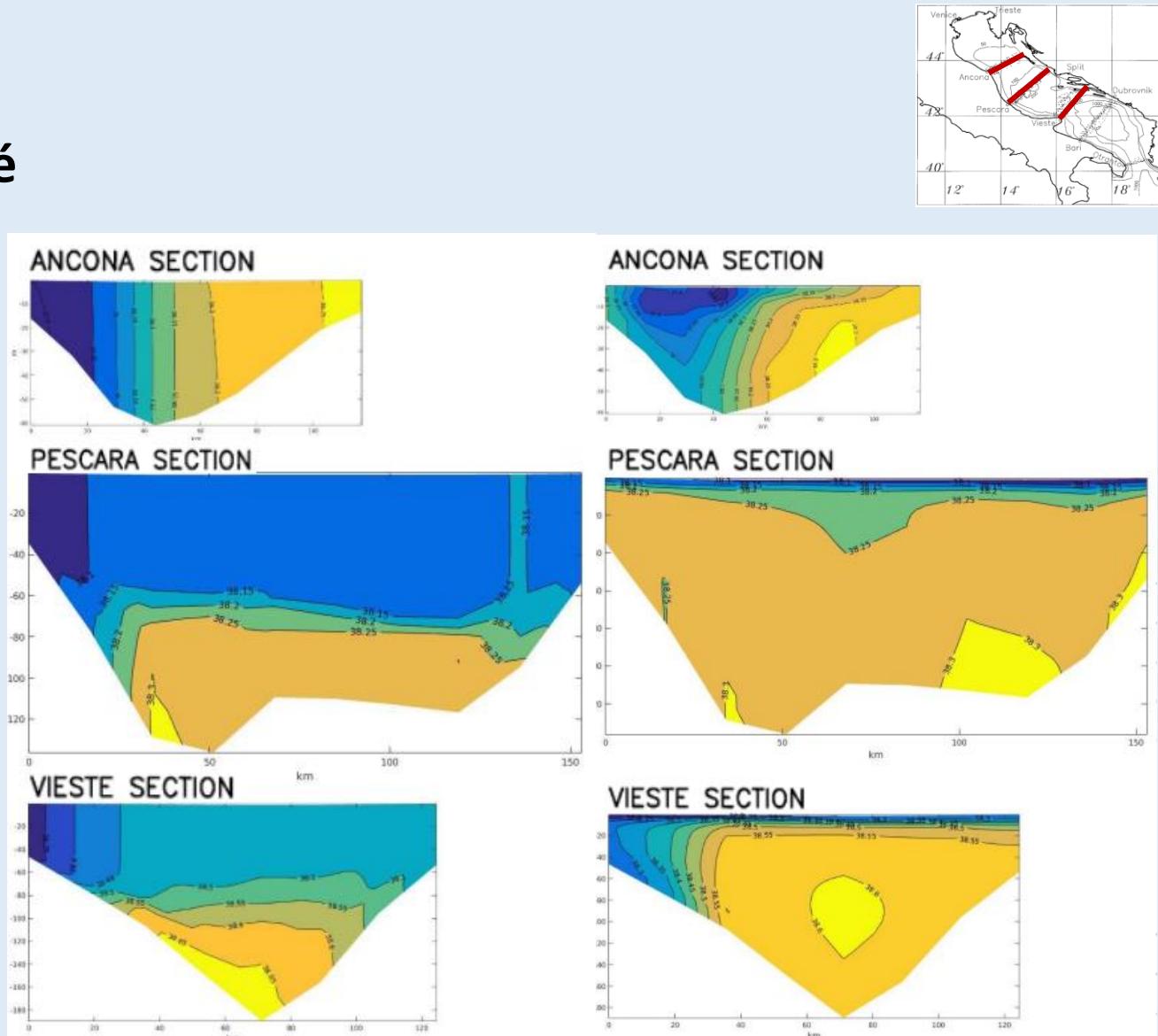


Figure 9: Distribution de la salinité (psu) simulé par le modèle en hiver (gauche) et au printemps (droite) au niveau des sections de Ancona, Pescara et Vieste..

### III. Résultats et discussion

#### 3. Variations saisonnières de la salinité

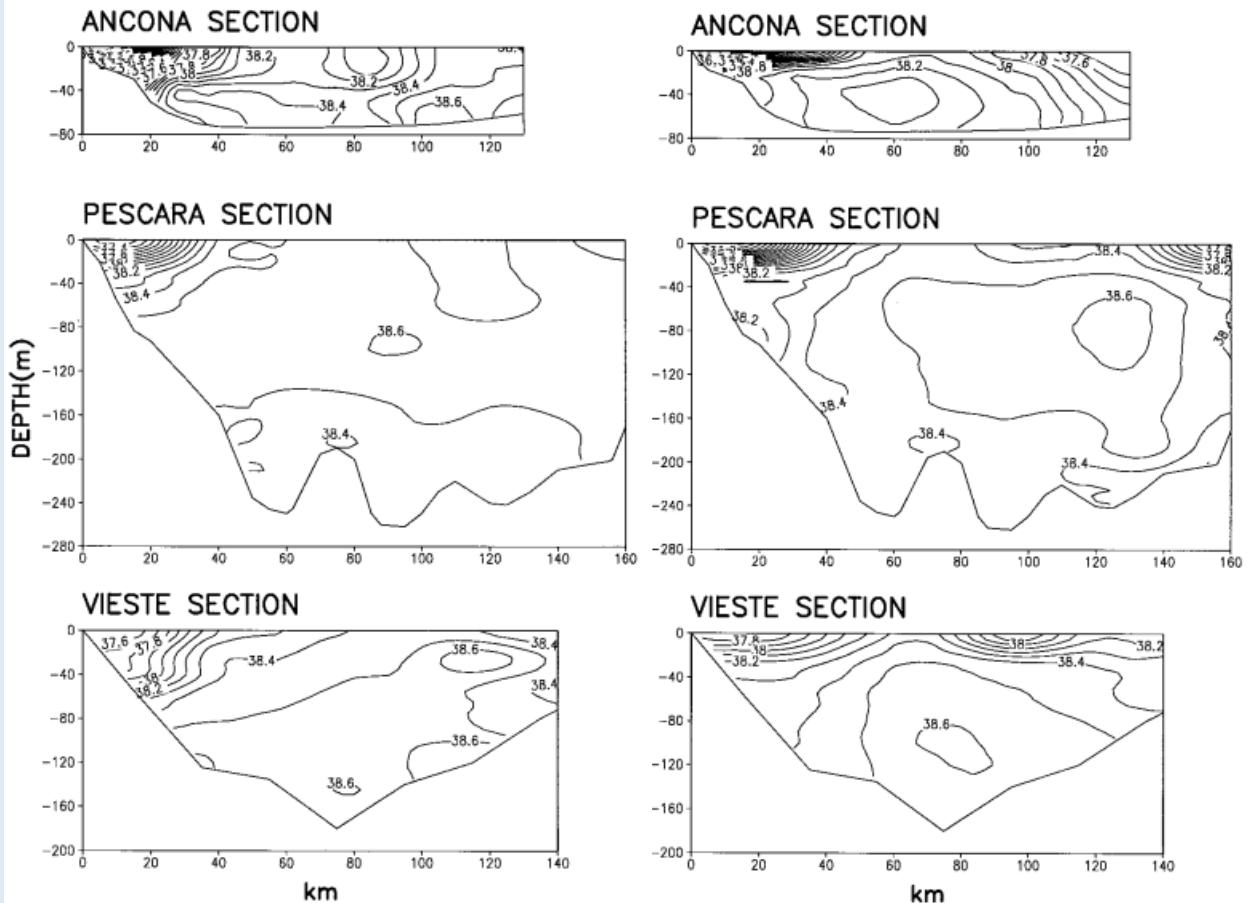
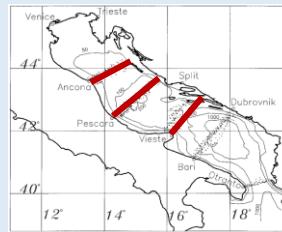


Figure 10: Distribution de la salinité (psu) in situ en hiver (gauche) et au printemps (droite) au niveau des sections de Ancona, Pescara et Vieste..

### III. Résultats et discussion

#### 3. Variations saisonnières de la salinité

- **Eaux de faibles salinité confiné le long du plateau occidental**

« *the low salinity waters are still confined along the lateralsides of the basin* » (A. Artegiani et al. 1997)

- **Influence des apports fluviaux et des précipitations au Nord**

« *the low salinity waters induced by river runoff extend throughout the surface layers of the sections* »

(A. Artegiani et al. 1997)

- **AdDW très salé qui plonge à Vieste**

- **Sur estimation de la salinité de 0.3 entre 0 et 50 m surtout au Nord**

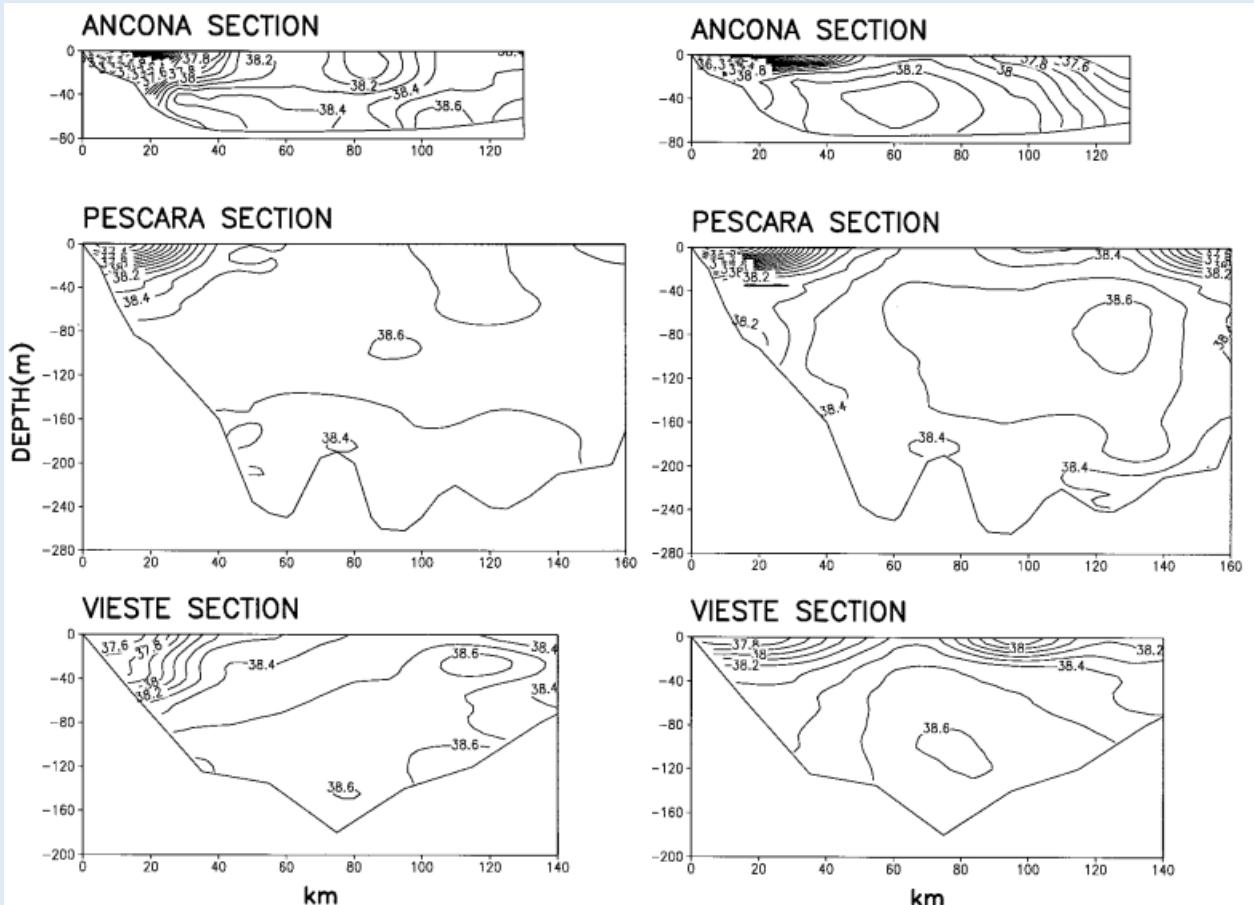
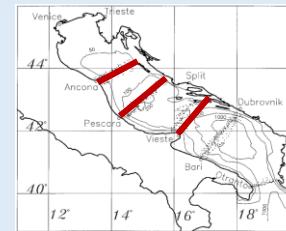


Figure 10: Distribution de la salinité (psu) in situ en hiver (gauche) et au printemps (droite) au niveau des sections de Ancona, Pescara et Vieste..

### III. Résultats et discussion

#### 3. Représentation de la circulation de surface

### III. Résultats et discussion

#### 3. Représentation de la circulation de surface

- Circulation cyclonique le long des cotes
- Entrer des eaux de surfaces a Otranto
- Début de formation du Sad gyre
- Tourbillons cycloniques au centre

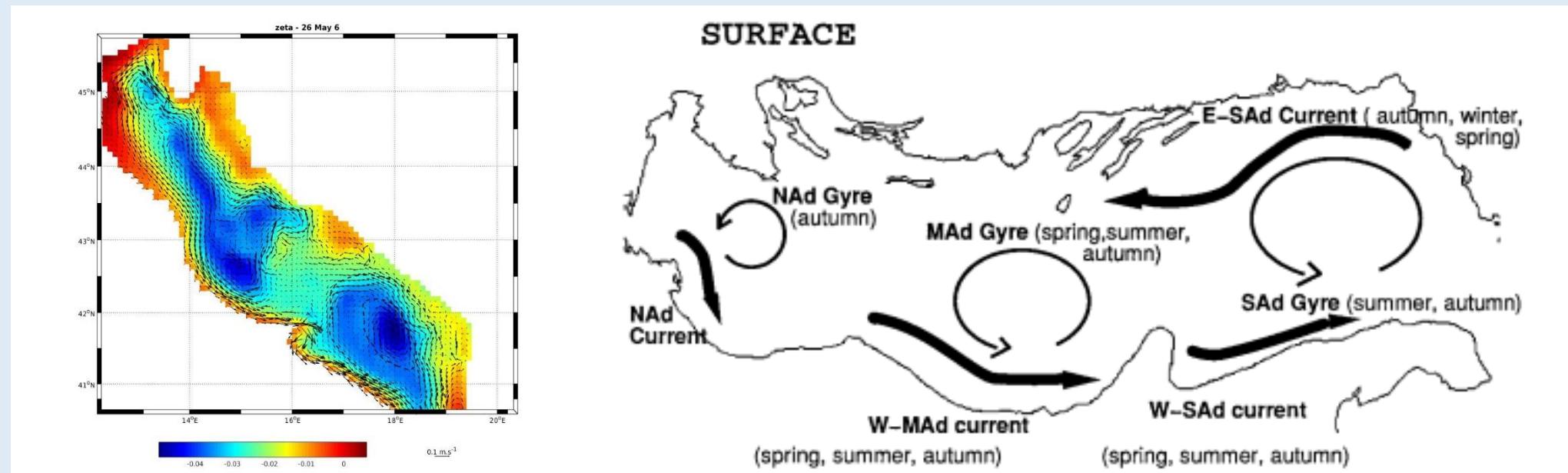


Figure 11: Élévation de la surface libre et vecteurs vitesses de surface simulé par le modèle (droite) et représenté dans la littérature (gauche) au printemps

## IV. Conclusion

- ✓ Bonne représentation de la répartition des variables thermochimiques et masses d'eaux caractéristiques
- ✗ Erreurs dans les valeurs de température et de salinité au printemps
- ✗ Représentation très approximative de la bathymétrie

Amélioration avec topo\_smooth et  $\text{grad}(h)/h$  ?  
Comparaison des données des vecteurs vitesses aux 4 saisons ?  
Inclure un modèle biologique pour comparer les données d'oxygène ?

## IV. Bibliographie

Artegiani.A et al. The adriatique sea general circulation part I: air–sea interactions and water mass structure. *Journal of physical oceanography*, 1997, vol 27 Artegiani.A et al.

The adriatic sea general circulation. Part II: baroclinic circulation structure. *Journal of physical oceanography*, 1997, vol 27 Orlié.M et al.

The currents and circulation of the adriatic sea. *Oceanologica acta*, 1991, vol 15, n°15

Jullien. S et al. Technical and numerical doc. 29/11/2022. <https://data.corco.fermer.fr/DOC/model-v1.3.pdf>

Kumzmic.M et al. Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing. *Continental shelf research*, 1994, vol 14