
Variations saisonnières de la circulation , la température de surface et la salinité en mer Adriatique : Modélisation 3D océanique

Alice ATTALI

Encadré par Andrea Doglioli

M1 sciences de la mer

Avril 2026

Résumé

La mer Adriatique est bassin semi-fermé de la Méditerranée Nord-Occidentale et soumise à des variations saisonnières de circulation, température et salinité. Cette étude implémente le modèle numérique CROCO à une résolution de $1/10^\circ$ pour comparer les caractéristiques principales des paramètres hydrodynamique de l'Adriatique et évaluer la capacité du modèle à représenter la variabilité saisonnière de manière fiable.

Le modèle simule 10 années d'évolution. La phase de spin-up dure deux ans, durant laquelle la salinité a du mal à se stabiliser. Les données sont donc prises après cette phase transitoire, c'est à dire à partir de l'année 3.

Trois variables sont focalisées pendant cette étude : la circulation, la salinité et la température de surface. Certains résultats sont plus ou moins en adéquation avec la littérature. Des pistes d'amélioration sont développées dans la conclusion.

Abstract

The Adriatic Sea is a semi-enclosed basin in the Northwestern Mediterranean and experiences seasonal variations in circulation, temperature, and salinity. This study implements the CROCO numerical model at $1/10^\circ$ resolution to compare the main characteristics of the Adriatic's hydrodynamic parameters and evaluate the model's capacity to reliably represent seasonal variability. The model simulates 10 years of evolution. The spin-up phase lasts two years, during which salinity struggles to stabilize. Therefore, data are analyzed after this transitional phase, starting from year 3 onwards. Three variables are focused on during this study : circulation, salinity, and surface temperature. Some results are more or less consistent with the literature. Improvement pathways are developed in the conclusion.

Table des matières

Introduction	4
1 Matériel et méthode	5
1.1 CROCO et ses fondements physiques	5
1.2 Discrétisation	6
1.3 Implémentation du modèle	6
2 Résultats et discussion	7
2.1 Diagnostique du modèle	7
2.2 Circulation générale	7
2.3 Distribution horizontale de la température de surface	8
2.3.1 Caractéristiques hivernales	8
2.3.2 Caractéristiques estivales	9
2.4 Distribution horizontale de la salinité	10
2.4.1 Caractéristiques hivernales	10
2.4.2 Caractéristiques estivales	10
Conclusion	12
Bibliographie	13

Introduction

Zone d'étude

La mer Adriatique est un bassin semi-fermé, ouvert au sud, au niveau du canal d'Otranto, situé en Méditerranée, entre l'Italie et la péninsule balkanique. Il s'étend de 12°E à 20°E en longitude et de 40°N à 46°N en latitude. Ce bassin a une superficie d'environ 140 000 km² et une profondeur moyenne de 252 m. La Méditerranée Nord-Occidentale, dont l'Adriatique fait partie, est un modèle pour l'océan globale et donc intéressant pour l'étude des processus océanographiques en milieu côtier et d'interactions océan-atmosphère car cette région est rapidement et directement impactée par les forçages climatiques.

Le régime climatique de l'Adriatique est dominé par des variations saisonnières. En hiver, les vents de Bora (vents secs du nord-est) créent des apports d'airs froids et denses, tandis qu'en été, les vents de Scirocco (sud-est) apportent de l'air chaud et humide en provenance du Sahara. La circulation générale est caractérisée par un gyre cyclonique principal avec des branches de courant côtières et une formation de l'eau profonde AdDW (Adriatic Deep Water) dans le sud du bassin (voir figure 2). La côte orientale (courant adriatique oriental) transporte les eaux moins denses de la Méditerranée Nord-Occidentale, tandis que la côte occidentale reçoit des eaux plus denses des fleuves (Pô, Reno, Metauro).



FIGURE 2 – Circulation globale de l'Adriatique

Connaissances de la littérature

De nombreuses études et observations ont démontré l'existence d'une circulation anticyclonique/cyclonique bien organisée en Méditerranée. Plusieurs études semblables ont été menées sur la circulation de bassins fermés ou semi-fermés. Les modèles régionaux de circulation océanique, comme ROMS (Regional Ocean Modeling System) et ses variantes (CROCO), se sont révélés efficaces pour simuler la dynamique des régions côtières.

Les études précédentes sur l'Adriatique ont montré l'importance des forçages atmosphériques dans la détermination de la circulation, ainsi que l'influence des apports fluviaux, en particulier du Pô qui représente plus de 50% des apports d'eau douce au bassin. La stratification thermique saisonnière crée des conditions favorables au développement de structures tourbillonnaires côtières et à l'oscillation des fronts de densité.

Ce travail vise à implémenter le modèle CROCO sur la région Adriatique à une résolution relativement fine (de l'ordre du kilomètre) et à explorer la capacité du modèle à reproduire les caractéristiques principales de la circulation saisonnière. L'objectif est

d'évaluer la qualité de la simulation climatologique et de comparer la cohérence de certaines grandeurs (température, salinité, circulation) avec la littérature et les observations disponibles.

1 Matériel et méthode

1.1 CROCO et ses fondements physiques

CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model) est une plateforme de modélisation permettant de modéliser en trois dimensions des régions océanique à sub meso-échelle et à des échelles de temps de l'ordre de l'évènement à la décennie. CROCO est dérivé de la plateforme ROMS. Plus précisément, il s'agit de la nouvelle version de ROMS AGRIF. Le code source est écrit en langage Fortran, C et shell et configuré à travers plusieurs fichiers liés entre eux. La visualisation des résultats se fait via Matlab. L'implémentation du modèle est développé dans la partie 1.3. Le modèle numérique de CROCO se base sur les équations d'évolution hydrodynamique de la circulation océanique (équations 1, 2, 3, 4, 5, 6) en utilisant quelques hypothèses. Les hypothèses sont les suivantes :

- f-plan : la latitude est considérée comme quasiment constante et donc le paramètre de Coriolis aussi
- Approximation de Boussinesq : les variations de la masse volumiques existent mais sont faibles ($\rho = \rho_0 + \rho'$ avec $\rho_0 \gg \rho'$)
- Fermeture turbulente de Boussinesq : les tenseurs de Reynolds sont proportionnels aux gradients de vitesse, dont les viscosités turbulentes K_h et K_v sont les viscosités turbulentes horizontales et verticales

Les équations d'évolution hydrodynamique utilisées sont :

- Les équations de mouvement respectivement en x et en y :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + K_h \nabla^2 u + K_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + K_h \nabla^2 v + K_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

- La conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

- La conservation de la chaleur :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = K_h \nabla^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

- La conservation du sel :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = K_h \nabla^2 S + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5)$$

- L'équation d'état TEOS-10 :

$$\rho = \rho(T, S, z) \quad (6)$$

1.2 Discrétisation

Le modèle numérique de CROCO repose sur la discrétisation des équations d'évolution hydrodynamique, ce qui permet de transformer des équations continues en un système discret défini sur un maillage en imposant des conditions limites et initiales. Le maillage utilisé ici est une grille Arakawa-C sur l'horizontale et des coordonnées `sigma` sur la verticale afin d'être le plus en adéquation possible avec la bathymétrie.

Pour la discrétisation temporelle, la condition CFL est respectée, i.e le traceur ne se propage pas de plus d'une maille à chaque pas de temps.

1.3 Implémentation du modèle

L'implémentation du modèle CROCO pour la mer Adriatique repose sur plusieurs étapes successives, allant de la définition de la grille spatiale à la configuration des paramètres temporels, en passant par la mise en place des conditions aux limites et des conditions initiales. Chacune de ces étapes est réalisée grâce à différents outils Matlab et la configuration de fichiers propres au code source. Ici, le modèle simule 10 ans d'évolution de l'adriatique, sachant qu'une année fait 12 mois et que l'on a considéré que chaque mois fait 30 jours. Tous les résultats exposés plus tard sont issus de la simulation de l'année 9.

La toute première étape consiste à faire le choix de la zone d'étude. Pour cela, la commande `ad_findgeocoord` doit être exécutée dans Matlab, suivi de la modification du fichier `crocotools_param` permettant de définir les coordonnées géographiques du domaine et la résolution horizontale. Ici, le domaine choisi couvre la mer Adriatique dans son intégralité, avec une résolution horizontale uniforme de $1/10^\circ$. La grille est discrétisée selon 32 niveaux verticaux, permettant une bonne représentation de la bathymétrie du bassin.

La grille numérique est ensuite créée grâce à l'exécution de `make_grid` qui produit simultanément la grille, le masque terre/mer et la bathymétrie. Un ajustement manuel du masque terre/mer est possible via le script `edit_masque`, afin de corriger les artefacts liés à la résolution de la grille dans les zones côtières complexes (notamment lors de la présence d'îles). Les dimensions et autres valeurs liées à la grille peuvent être nécessaires à certains calcul, il est donc recommandé de les sauvegardées.

L'étape suivante est d'exécuter les scripts `make_forcing` (jeu de données COADS, Ocean-Atmosphere Data Set), `make_clim` (jeu de données WOA, World Ocean Atlas) et `make_ini` afin de calculer respectivement les flux air-mer, les forçages climatiques et les conditions aux initiales. Afin que le modèle enregistre les informations, il est indispensable de rentrer les informations du modèle dans les fichiers `param.h` et `cppdefs.h` (notamment les dimensions de la grille et le nombre de couches verticales), voir la table 1.

Intervient ensuite le calcul de pas de temps externe et interne de la simulation sur la base du critère CFL à l'aide du script `ad_cfl`. Afin de fixer ces pas de temps au sein du script, il suffit d'effectuer la modification du fichier `croco.in` (modification des variables `dt` et `NDTFAST` pour les pas de temps externes et internes, `NTIMES` pour la durée de la simulation, `NWRT` et `NAVG` pour la fréquence des sorties instantanées et moyennées variables et des sorties pour relancer le modèle, variable `NRST`).

Tous les paramètres temporels et spatiaux concernant le modèle de cette étude sont rassemblés dans la table 1. Les paramètres `LLM` et `MMm` correspondent aux nombres de mailles sur l'axe `x` et sur l'axe `y` respectivement. Les modifications de la résolution du modèle ainsi que les frontières ouvertes par exemple se font dans le fichier `crocotools_param`.

Résolution	LLm	MMm	N	dt	NTIMES	NDTFAST	NWRT	NAVG	NRST
1/10°	79	82	32	1440	1800	60	180	180	1800

TABLE 1 – Récapitulatif des paramètres temporels du modèle (temps en secondes).

2 Résultats et discussion

2.1 Diagnostique du modèle

Le diagnostique du modèle est donné par la figure 3.

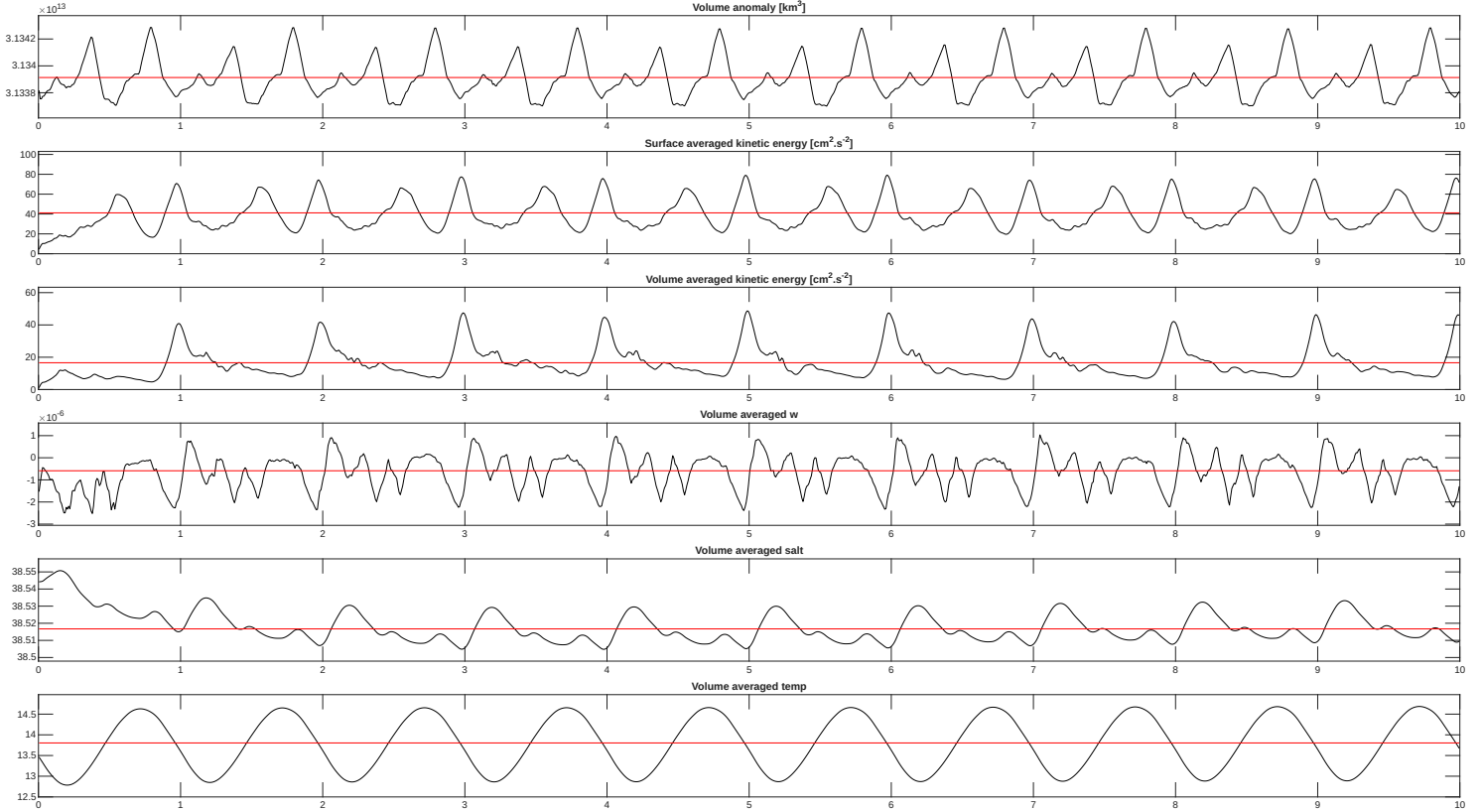


FIGURE 3 – Diagnostique du modèle

Pour analyser le modèle en dehors de sa phase transitoire, il est nécessaire d'identifier la période de spin-up, c'est-à-dire le temps requis pour que le système se stabilise autour de sa moyenne (ligne rouge), calculée sur les dix années de simulation. Une fois cette phase écoulée, seules les années représentatives de l'état d'équilibre sont prises en compte.

Ici, la variable qui met le plus de temps à se stabiliser est la salinité (ce qui n'est pas étonnant car la salinité est une variable sensible aux forçages). En effet, grâce au diagnostique de la figure, on voit que la salinité se stabilise au bout d'environ deux ans. Cela signifie que l'on prend donc en compte uniquement les données à partir de la deuxième année.

2.2 Circulation générale

Le modèle montre une des vitesses moyennes des courants de surface de 0,05 m/s avec un maximum saisonnier atteignant environ 0,2 m/s en hiver. Grâce à la figure 4, on voit que la circulation est en adéquation avec la littérature car une gyre cyclonique dominante est présente ainsi que des courants côtiers intensifiés sur les deux rives et une circulation plus complexe en haute mer. Les gammes de vitesses coïncident avec celles obtenues dans l'article [2].

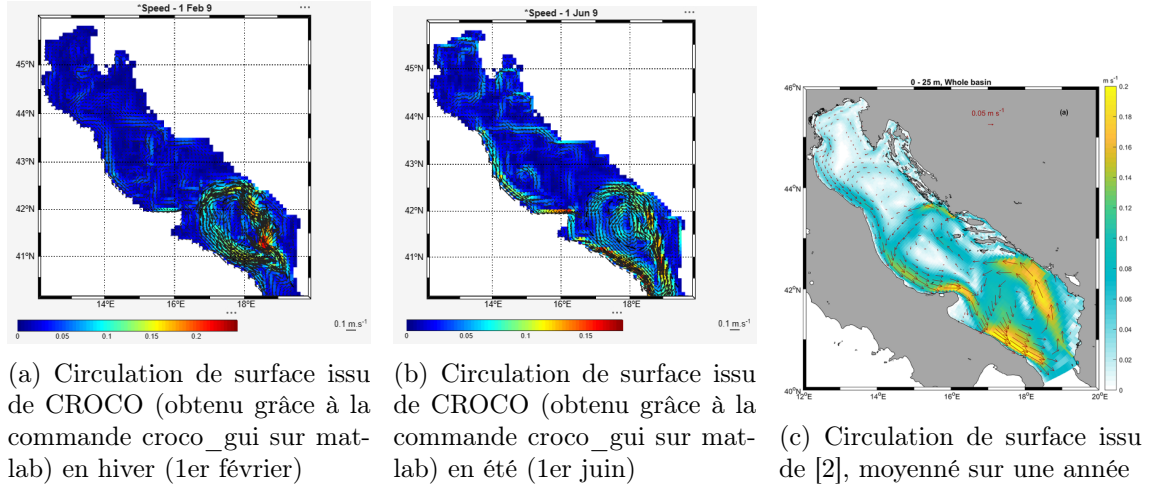


FIGURE 4 – Comparaison de la circulation de surface issu de l'article [2] (figure 4c) et avec le résultat obtenu grâce au modèle (figure 4b pour l'été et figure 4a)

Plus précisément, en hiver (Fig. 4a), la circulation simulée apparaît plus intense que la moyenne décrite dans l'article [2], avec des vitesses plus élevées et des structures tourbillonnaires bien marquées, notamment dans le sud du bassin. Le gyre sud-adriatique est particulièrement marquée, ce qui est cohérent avec les conditions hivernales où le forçage atmosphérique est plus fort.

En été (Fig. 4b), la circulation est plus faible et plus diffuse, mais les structures principales restent comparables à celles observées dans la figure moyennée. Le gyre sud-adriatique est toujours présente mais moins intense et les courants côtiers conservent une présence similaire.

Donc bien que les figures issues de CROCO ont été créées à partir de situations instantanées, elles reproduisent les principales caractéristiques de la circulation moyenne décrite dans la littérature. Les écarts observés, notamment en termes d'intensité, s'expliquent par la variabilité saisonnière.

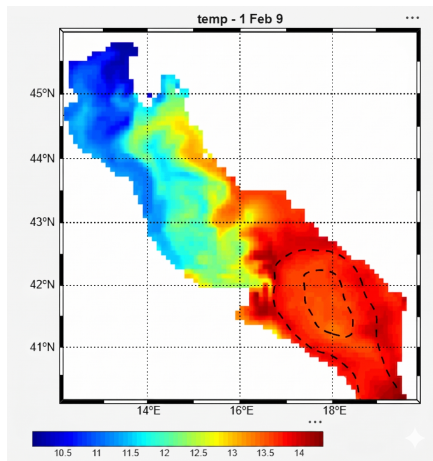
2.3 Distribution horizontale de la température de surface

2.3.1 Caractéristiques hivernales

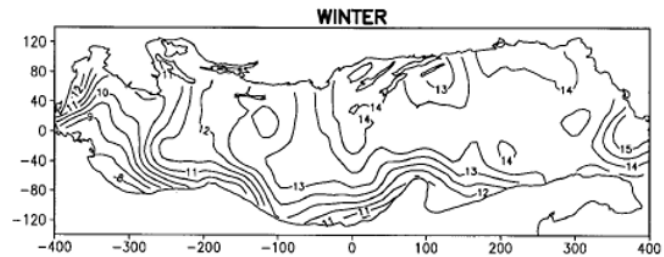
La carte de température hivernale simulée par CROCO (figure 5a) montre un gradient nord-sud marquée, gradient que l'on retrouve dans la littérature (figure 5b). Les températures de surface dans le nord de l'Adriatique (autour de 45°N) sont autour de 10,5–11°C, tandis que le sud (vers 41°N) les températures sont d'environ 13–14°C, ce qui entraîne un gradient thermique d'environ 3–4°C sur la longueur du bassin.

Cependant, une analyse plus profonde montre que le modèle simule des températures hivernales légèrement supérieure aux observations, notamment dans le sud de l'Adriatique où les valeurs peuvent dépasser les 14°C. Cette surestimation locale peut s'expliquer par plusieurs raisons : l'utilisation de forçages atmosphériques climatologiques moyens qui lissent les événements froids extrêmes (package WOA) et l'invariabilité du débit du Pô. Néanmoins, l'amplitude thermique hivernale reste réaliste et comparable aux gammes observées dans la littérature (9–13°C).

La distribution spatiale est également bien reproduite : le gradient côte-large est assez faible en hiver (moins de 1°C), ce qui reflète l'homogénéisation dû aux forçages climatiques forts.



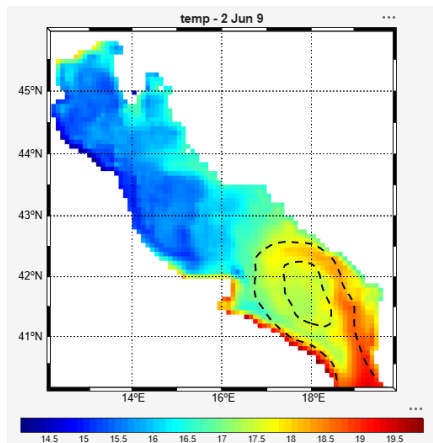
(a) Carte de la température de surface issu de CROCO (obtenu grâce à la commande `croco_gui` sur matlab) en hiver (1er février)



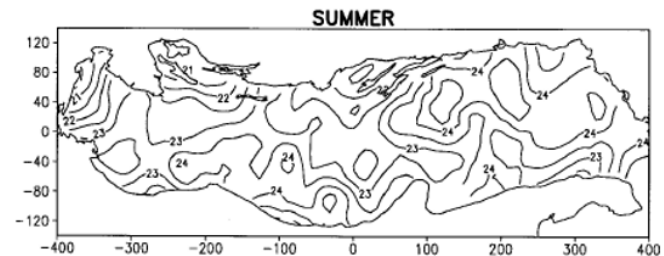
(b) Carte de la température de surface en hiver issu de l'article [1]

FIGURE 5 – Comparaison des température de surface en hiver

2.3.2 Caractéristiques estivales



(a) Carte de la température de surface en été issu de CROCO (obtenu grâce à la commande `croco_gui` sur matlab) en été (1er juin)



(b) Carte de la température de surface en été issu de l'article [1]

FIGURE 6 – Comparaison des température de surface en été

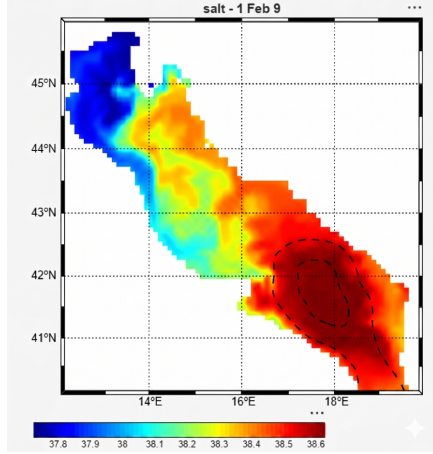
En été (1er juin), le modèle montre un fort réchauffement avec des températures de surface atteignant 18–19,5°C dans le sud et 15–17°C dans le nord, soit un gradient thermique d'environ 4°C. L'article [1] montre des gammes de température assez différentes pour cette période car les températures avoisinent les 24°C dans le sud et 21°C dans le nord. De plus, le modèle affiche des températures plus contrastée mais si le gradient nord-sud persiste en été dans les deux figures. L'article datant de 1997, cet écart de température en été peut-être lié au réchauffement climatique et l'augmentation des canicules marines, surtout dans une zone aussi sensible à ce genre d'évènements.

La distribution estivale du modèle montre aussi des zones de refroidissement et de réchauffement côtier, notamment au niveau de la côte italienne Nord où le Pô fait diminuer la température dans cette zone (14,5–16°C) et la côte italienne sud (19–17°C).

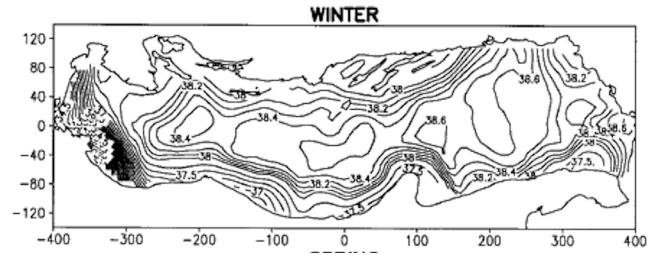
2.4 Distribution horizontale de la salinité

La salinité fait partie des variables les plus critiques et difficiles à évaluer car elle est contrôlée par les apports fluviaux et le bilan précipitation/évaporation.

2.4.1 Caractéristiques hivernales



(a) Carte de la salinité en hiver issu de CROCO (obtenu grâce à la commande `croco_gui` sur matlab) en été (1er juin)



(b) Carte de la salinité en hiver issu de l'article [1]

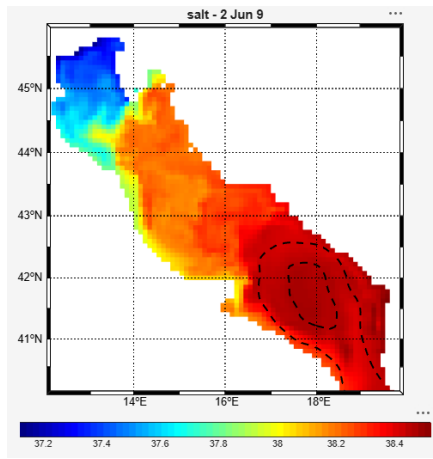
FIGURE 7 – Comparaison des salinités en hiver

La carte de salinité hivernale simulée par CROCO (1er février, année 9) révèle une distribution horizontale dominée par des gradients côte-large et un nord-sud marqués (figure 7a, cohérent avec la figure 7b issu de l'article [1]). En Adriatique nord, la côte occidentale, la où se jette le Pô présente les salinités les plus faibles, atteignant 37,8–38,0 psu, tandis que le sud atteint 38,4–38,6 psu. Ce gradient de 0,6–0,8 psu reflète très bien l'influence du Pô, particulièrement importants en hiver lorsque les débits sont maximaux. La comparaison avec la figure 7b confirme cette structure générale : les isolignes de salinité progressent graduellement du littoral vers le large, avec des valeurs minimales en zone côtière et une augmentation progressive vers le centre du bassin.

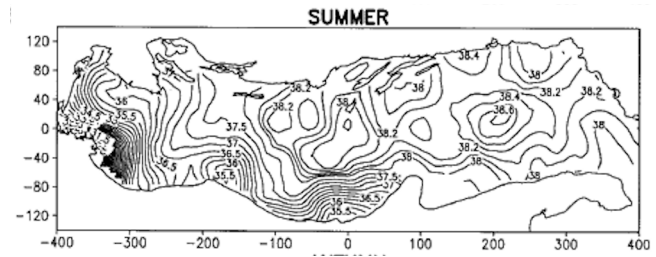
En Adriatique sud (vers 42°N), le modèle montre également un gradient côtier mais moins intense (0,3–0,5 psu), ce qui est prévisible puisque les apports fluviaux sont moins présents vers le sud. Les salinités du sud-Adriatique atteignent 38,4–38,6 psu, reflétant l'influence croissante des eaux méditerranéennes plus salées arrivant via le canal d'Otranto. Cette dynamique est bien décrite dans l'article [1], où l'on observe également une augmentation nord-sud de la salinité moyenne.

2.4.2 Caractéristiques estivales

En été (1er juin), la distribution de salinité révèle des variations différents de l'hiver, malgré la persistance du gradient côte-large. Les salinités minimales côtières diminuent à 37,2–37,4 psu dans le nord, tandis que le sud atteint 38,2–38,4 psu. La comparaison avec la figure 8b confirme cette intensification du gradient nord-sud, en revanche, les gammes de salinité différent beaucoup plus qu'en hiver : dans le nord, la salinité de l'article [1] avoisine les 34–35 psu alors que dans le modèle, la salinité est proche de 37,5 psu. Cette différence peut -être dû à un mauvais bilan évaporation/précipitation ou la difficulté qu'à le modèle



(a) Carte de la salinité en été issu de CROCO (obtenu grâce à la commande `croco_gui` sur matlab) en été (1er juin)



(b) Carte de la salinité en été issu de l'article [1]

FIGURE 8 – Comparaison des salinités en été

à évaluer les apports du Pô ou comme mentionné ci-dessus, l'article date de 1997 et les conditions climatiques font que le débit du Pô a diminué à travers les années.

Conclusion

Cette étude a pour objectif d'évaluer la fiabilité du modèle numérique de CROCO de l'Adriatique en comparant trois variables saisonnières : la circulation, la salinité et la température de surface avec la littérature. Ce modèle a une résolution de $1/10^\circ$. Les résultats obtenus après une période de spin-up de deux ans démontrent une concordance globalement satisfaisante avec la littérature.

L'analyse du spin-up a montré que la salinité était la variable la plus exigeante en termes de stabilisation car elle se stabilise après environ deux ans. Cette durée justifie l'analyse des données à partir de l'année 3 de simulation. Au-delà de cette phase transitoire, le modèle montre une bonne stabilité.

Les principales limitations identifiées sont : le manque de précision sur l'usage de forçages atmosphériques et débits fluviaux, la résolution horizontale de $1/10^\circ$ qui peut manquer de finesse pour certains processus et les conditions aux limites ouvertes au canal d'Otranto qui pourraient être améliorées.

Malgré ces limitations, le modèle CROCO s'avère fiable et capable de reproduire les processus océanographiques majeures de l'Adriatique. Certains points peuvent être largement améliorés par l'utilisateur pour faciliter la comparaison avec la littérature, notamment le fait de moyenniser les résultats sur plusieurs années. Le problème est que ce choix peut-être à double tranchant : cela peut-être utile pour comparer la circulation de surface par exemple et tendre vers des résultats plus stable mais ça empêche de visualiser les variations inter-annuelles. De plus, cela pourrait être problématique pour les années récentes car le réchauffement climatique et les canicules marines en Méditerranées sont de plus en plus conséquentes (voir SOCIB (Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System SOCIB qui crée des indicateurs sous-régionaux de la Méditerranée)). Dû à ça, il a été fait le choix ici de ne pas moyenniser sur les années.

Une perspective intéressante à ajouter ici est la visualisation de la variation inter-annuelles de la température, la salinité et la circulation générale de l'Adriatique.

Bibliographie

Références

- [1] A. ARTEGIANI et al. “The Adriatic Sea General Circulation. Part II : Baroclinic Circulation Structure”. In : *Journal of Physical Oceanography* 27.8 (1997), p. 1515-1532. DOI : 10.1175/1520-0485(1997)027<1515:TASGCP>2.0.CO;2.
- [2] Copernicus Climate Data STORE. “Global analysis and forecast system for physical oceanography”. In : *Ocean Science* 21 (2025), p. 1003-1025. DOI : 10.5194/os-21-1003-2025. URL : <https://os.copernicus.org/articles/21/1003/2025/>.