

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY  
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES SCIENCES DE LA MER  
ET DE L'AMÉNAGEMENT DU LITTORAL



## RAPPORT DE PFE

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN SCIENCES DE MER  
OPTION: AMÉNAGEMENT DU LITTORAL

AINSI QUE LE DIPLÔME DE MASTER 2 **WAPE** DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

---

# Hydrologie et circulation océanique dans le bassin Algérien

---

*Auteur:*

Katia MALLIL

*Encadré par:*

Laurent MORTIER

Stage effectué du 16 Mars au 31 Juillet 2015 au LOCEAN

*Soutenu le 06/10/2015 devant le jury composé de:*

M<sup>me</sup> F. Louanchi

Professeur à l'ENSSMAL

Présidente

M<sup>r</sup> L. Mortier

Professeur à l'ENSTA

Encadreur

M<sup>me</sup> F. Bachari-Houma

Professeur à l'ENSSMAL

Examinatrice

M<sup>r</sup> A. Stegner

Professeur à l'École Polytechnique

Examinateur



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY  
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES SCIENCES DE LA MER  
ET DE L'AMÉNAGEMENT DU LITTORAL



## RAPPORT DE PFE

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR D'ÉTAT EN SCIENCES DE MER  
OPTION: AMÉNAGEMENT DU LITTORAL

AINSI QUE LE DIPLÔME DE MASTER 2 **WAPE** DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

---

# Hydrologie et circulation océanique dans le bassin Algérien

---

*Auteur:*

Katia MALLIL

*Encadré par:*

Laurent MORTIER

Stage effectué du 16 Mars au 31 Juillet 2015 au LOCEAN

*Soutenu le 06/10/2015 devant le jury composé de:*

M<sup>me</sup> F. Louanchi

Professeur à l'ENSSMAL

Présidente

M<sup>r</sup> L. Mortier

Professeur à l'ENSTA

Encadreur

M<sup>me</sup> F. Bachari-Houma

Professeur à l'ENSSMAL

Examinatrice

M<sup>r</sup> A. Stegner

Professeur à l'École Polytechnique

Examinateur

# *Remerciements*

Je tiens à remercier en premier lieu mon promoteur monsieur Laurent Mortier d'avoir encadré ce travail, de m'avoir accueilli et aidé à surmonter les difficultés que j'ai rencontré durant toute la période du master et du stage. Je remercie Pierre Testor pour ses conseils d'expert, sa disponibilité et son aide précieuse. Je tiens à exprimer ma plus grande reconnaissance à Anthony Bosse, qui a toujours répondu présent et m'a accordé de son temps précieux pour m'aider à trouver des solutions quand je faisais appel à lui.

Je remercie également Matthieu Labaste et Hervé Le Goff de m'avoir fourni des données et scripts matlab et d'avoir répondu à mes nombreuses questions. C'est grâce aux données que Katrin Schroeder (de ISMAR/CNR) m'a fournit que la mise en évidence de plusieurs résultats à été possible, je tiens donc à la remercier particulièrement

Je remercie M<sup>me</sup> Bachari de nous avoir fait l'honneur de présider le jury, M<sup>me</sup> Louanchi et M<sup>r</sup> Stegner d'avoir accepté d'examiner le présent travail.

Je remercie M<sup>r</sup> Jean-Yves Champagne, M<sup>me</sup> Louanchi, M<sup>me</sup> Alouache, M<sup>r</sup> Mortier ainsi que tout ceux qui m'ont permis de bénéficier de la bourse RME, d'intégrer le master WAPE, de participer à une campagne océanographique et ainsi d'avoir considérablement enrichi mes connaissances et acquis de nouvelles compétences.

Je remercie tous mes camarades et amis Félix, Amélie, Jens, Tianyang, Jeanne et Jonas d'avoir permis une excellente atmosphère de travail et pour leur aide.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

# Résumé

Nous avons utilisé les premières données récoltées dans le cadre du Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien (SOMBA) lors de la campagne océanographique qui s'est déroulée l'été 2014, ainsi que d'autres données disponibles provenant de sources différentes afin de décrire au mieux la dynamique et l'évolution des eaux du bassin.

Nous avons ainsi pu caractériser un tourbillon Algérien anticyclonique échantillonné sur toute la colonne d'eau, tel que les vitesses orbitales en surface sont de l'ordre de 60 cm/s à sa périphérie, le diamètre est d'environ 130 km, donnant des périodes de retournement de 8 jours.

Nous avons également pu observer les gyres Algériens à travers les mesures de LADCP, tel que, les vecteurs de courant dessinaient des gyres cycloniques centrés vers 6.5 °E, 38 °N (gyre Est), et 2.5 °E 37.5 °N (gyre Ouest), avec une magnitude d'environ 5 cm/s à la périphérie de ces derniers, les vitesses diminuent vers le centre des gyres.

Les sections de température potentielle et de salinité de la radiale Est-Ouest des années 2008, 2010 et 2014 montrent une séparation hydrologique entre les eaux du gyre Est et Ouest, tel que les eaux intermédiaires sont plus chaudes et salées dans le gyre Algérien Est.

Une étude de l'évolution des caractéristiques des eaux montre sans surprise un réchauffement des eaux profondes du bassin en moyenne de  $0.0047 \pm 0.0011$  °C/an et une augmentation de la salinité moyenne de  $0.00148 \pm 0.0005$  psu/an.

## Abstract

We used data collected during the first oceanographic cruise conducted in the framework of the observation system set up for the Algerian basin (SOMBA), added to other available data to describe the dynamics and the evolution of water masses in the aforementioned basin.

We could describe the features of an anticyclonic eddy sampled over the whole water column: its diameter is approximately 130 km, the order of magnitude of the surface orbital velocities at the edge of it is  $\sim 60$  cm/s and a rotational period of approximately 8 days.

We could observe as well the Algerian gyres through LADCP measurements being centered around 6.5 °E, 38 °N (Eastern gyre), and 2.5 °E 37.5 °N (Western gyre) drawn by current vectors with a magnitude of about 5 cm/s at the edge of the gyres.

Potential temperature and salinity sections allowed us to observe a hydrologic separation between the Eastern and the Western gyre, such as it appears that the Levantine Intermediate Water has a higher temperature and salinity in the Eastern Gyre.

A study of the evolution of deep water masses in the Algerian basin showed a positive trend for both temperature and salinity, being respectively  $0.0047 \pm 0.0011$  °C/year and  $0.00148 \pm 0.0005$  psu/year.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Résumé &amp; Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Table des matières</b>	<b>4</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>6</b>
<b>Abréviations</b>	<b>8</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>9</b>
1.1 Contexte scientifique: . . . . .	10
1.1.1 Brève description de la Méditerranée . . . . .	10
1.1.2 Masses d'eau et circulation en Méditerranée Occidentale . . . . .	10
1.1.2.1 Eau Atlantique Modifiée (MAW): . . . . .	10
Le courant Algérien: . . . . .	12
1.1.2.2 Eaux Intermédiaires d'Hiver (WIW pour Winter Intermediate Waters): . . . . .	12
1.1.2.3 Eau Levantine Intermédiaire (LIW pour Levantine Intermediate Waters): . . . . .	12
1.1.2.4 Eau profonde de la Méditerranée occidentale (WMDW pour Western Mediterranean Deep Water): . . . . .	14
1.1.2.5 Variabilité mésoéchelle: . . . . .	16
Tourbillons Algériens (Aes pour Algerian Eddies) . . . . .	16
1.1.3 Les gyres Algériens: . . . . .	17
1.2 Problématique: . . . . .	17
1.3 Objectifs: . . . . .	18
<b>2 Données &amp; Méthodes</b>	<b>19</b>
2.1 Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien (SOMBA): . . . . .	20
2.2 Description du jeux de données: . . . . .	20
2.2.1 Données de SOMBA GE 2014: . . . . .	20
2.2.2 les campagnes d'Urania: . . . . .	23
2.2.3 Base de donnée historique: . . . . .	23
2.2.4 Flotteurs ARGO: . . . . .	24

2.2.5	Données d'altimétrie (AVISO): . . . . .	24
2.3	Méthodes de visualisation des données: . . . . .	24
2.3.1	Section de température potentielle, salinité et densité potentielle: . . . . .	24
2.3.2	Données de courant: . . . . .	25
2.3.3	Séries temporelles: . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>27</b>
3.1	Description du Bassin Algérien à travers la campagne SOMBA-GE2014: . . . . .	28
3.1.1	Tourbillon Algérien: . . . . .	32
3.2	Gyres Algérien . . . . .	36
3.3	Évolution des caractéristiques des masses d'eau du bassin Algérien: . . . . .	41
3.3.1	Température potentielle: . . . . .	41
3.3.1.1	Eaux intermédiaires (entre 200 et 500 m): . . . . .	41
3.3.1.2	Eaux profondes (entre 1000 et 2000 m): . . . . .	41
3.3.1.3	Eaux de fond (> 2000m): . . . . .	43
3.3.2	Salinité: . . . . .	44
3.3.2.1	Eaux intermédiaires (entre 200 et 500 m): . . . . .	44
3.3.2.2	Eaux profondes (entre 1000 et 2000 m): . . . . .	44
3.3.2.3	Eaux de fond (> 2000 m): . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>47</b>
4.1	Tourbillon Algérien: . . . . .	48
4.2	Gyres Algériens: . . . . .	49
4.3	Réchauffement et augmentation de la salinité des eaux du Bassin: . . . . .	49
4.3.1	Eaux intermédiaires: . . . . .	50
4.3.2	Eaux profondes: . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>52</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>54</b>
<b>A</b>	<b>Figures</b>	<b>58</b>
<b>B</b>	<b>Description de la campagne MOOSE 2015</b>	<b>61</b>

# Liste des figures

1.1	Bathymétrie de la Méditerranée et nom des principaux sous-bassins . . . . .	11
1.2	Circulation de surface en Méditerranée Occidentale . . . . .	13
1.3	Circulation des eaux Intermédiaires en Méditerranée Occidentale . . . . .	14
1.4	Les trois phases de la convection profonde . . . . .	15
1.5	Circulation des eaux profondes en Méditerranée Occidentale . . . . .	16
2.1	Plan de campagne océanographique Somba 2014 . . . . .	21
2.2	CTD-Rosette . . . . .	22
2.3	Distribution des données utilisées pour les séries temporelles . . . . .	26
3.1	Diagrammes $\Theta$ -S . . . . .	29
3.2	Section de salinité Carthagène-Mostaganem et Palma-Alger . . . . .	30
3.3	Section de température potentielle et de salinité (Béjaia côte-large) . . . . .	31
3.4	Section de densité potentielle Ibiza-Cherchell et Minorque-El Kala . . . . .	31
3.5	Carte de topographie dynamique absolue du bassin Algérien le 22 Aout 2014 . . . . .	32
3.6	Carte de courant de surface mesuré par le S et le LADCP . . . . .	33
3.7	Section de densité de la radiale ouest-est Somba . . . . .	34
3.8	Section de la composante barocline de la vitesse géostrophique (est-ouest) . . . . .	35
3.9	Carte de courant mesuré par le L-ADCP moyenné sur le colonne d'eau dont la profondeur $\geq 2000$ m . . . . .	36
3.10	Section de température potentielle et salinité ouest-est 2008 . . . . .	37
3.11	Section de température potentielle et de salinité ouest-est 2010 . . . . .	37
3.12	Section de température potentielle et de salinité ouest-est 2014 . . . . .	38
3.13	Profils de température potentielle et de salinité le long de la section est-ouest en 2008, 2010 et 2014 . . . . .	39
3.14	Vecteurs de courant moyenné entre 1000 et 2000 m représentés sur une carte avec la trajectoire de profileurs Argo. . . . .	40
3.15	Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m dans les gyres Algériens . . . . .	42
3.16	Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m près de la côte Algérienne . . . . .	42
3.17	Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus des Baléares . . . . .	42
3.18	Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus Sarde . . . . .	43

3.19	Évolution de la température potentielle moyennée entre 2000 et 2898 m au niveau du gyre Algérien Est . . . . .	43
3.20	Évolution de la température potentielle moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus Sarde . . . . .	43
3.21	Évolution de la température potentielle moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus des Baléares . . . . .	44
3.22	Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m dans les gyres Algériens	45
3.23	Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m près de la côte Algérienne	45
3.24	Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus des Baléares	45
3.25	Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus Sarde . . .	46
3.26	Évolution de la salinité moyennée entre 2000 et 2898 m au niveau du gyre Algérien Est . . . . .	46
3.27	Évolution de la salinité moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus Sarde . . .	46
3.28	Évolution de la salinité moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus des Baléares	46
4.1	Forme de la WMDW sur un diagramme $\theta$ -S en 2004 et 2006 . . . . .	51
A.1	Carte de couleur de la mer du bassin Algérien le 25 aout 2014 . . . . .	59
A.2	Température de surface de la mer le 25 aout 2014 dans le bassin Algérien . . .	59
A.3	Évolution de la température potentielle moyennée entre 200 et 500 m près de la côte Algérienne . . . . .	60
A.4	Évolution de la température potentielle moyennée entre 200 et 500 m dans le gyre Algérien Ouest . . . . .	60
A.5	Évolution de la salinité moyennée entre 200 et 500 m près de la côte Algérienne	60
A.6	Évolution de la salinité moyennée entre 200 et 500 m dans le gyre Algérien Ouest	60

# Abréviations

<b>LOCEAN</b>	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques.
<b>ENSSMAL</b>	École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral.
<b>RME</b>	Réseau Mixte d'Écoles.
<b>SOMBA</b>	Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien.
<b>MOOSE</b>	Mediterranean Ocean Observing System for the Environment.
<b>MAW</b>	Modified Atlantic Water.
<b>AW</b>	Atlantic Water.
<b>LIW</b>	Levantine Intermediate Water.
<b>WIW</b>	Western Intermediate Water.
<b>TDW</b>	Tyrrhenian Deep Water.
<b>WMDW</b>	Western Mediterranean Deep Water.
<b>AE</b>	Algerian Eddy.
<b>GPS</b>	Global Positioning System.
<b>RASMER</b>	Réseau Algérien des Sciences de la MER.
<b>SOCIB</b>	Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System.
<b>EGO</b>	Everyone's Gliding Observatories.
<b>LADCP</b>	Lowered Acoustic Doppler Current Profiler.
<b>SADCP</b>	Ship Acoustic Doppler Current Profiler.

# **Chapitre 1**

## **Introduction**

## **1.1 Contexte scientifique:**

### **1.1.1 Brève description de la Méditerranée**

La Méditerranée est une mer semi-fermée d'une profondeur moyenne de 1500m. Elle communique avec l'océan Atlantique par sa seule ouverture, le détroit de Gibraltar (~ 300 m de profondeur). Cette mer est divisée en Bassin Occidental et Oriental par le détroit de Sicile qui joue le rôle d'une barrière hydrologique. Au sein d'un même bassin, lui-même constitué de plusieurs sous-bassins séparés par des seuils, des chenaux et/ou des détroits, les courants coulant le long des côtes se divisent le plus souvent en deux branches au niveau de ces seuils, chenaux et détroits, entraînant une redistribution de leur eaux dans ces différents sous-bassins. Ainsi, le bassin occidental de la Méditerranée qui comprend le sous-bassin d'Alboran entre l'Espagne et le Maroc, le sous-bassin Tyrrhénien compris entre la Corse et la Sardaigne à l'ouest et la péninsule Italienne à l'est, et le sous-bassin Algéro-Provençal au centre, qui nous intéresse particulièrement dans sa partie sud pour cette étude, va voir ce processus de bifurcation des courants au niveau des séparations entre sous-bassins jouer un rôle important dans le contrôle des différents courants côtiers de ces sous-bassins. A ce premier processus clef, se rajoute celui de l'instabilité de ces courants et des structures de mésoéchelle associées, ainsi que d'autres processus de mélange, qui dispersent les eaux de ces courants vers l'intérieur des bassins ou sous-bassins (Millot, 1999).

### **1.1.2 Masses d'eau et circulation en Méditerranée Occidentale**

On distingue quatre masses d'eau principales en Méditerranée Occidentale:

#### **1.1.2.1 Eau Atlantique Modifiée (MAW):**

Du fait que la Méditerranée est un bassin d'évaporation, un déficit hydrique d'environ 1m par an engendre un flux d'eaux Atlantiques (AW pour Atlantic Waters) relativement légères entrant par le détroit de Gibraltar en surface (flux de  $0.8 \pm 0.1$  Sv (Send et al., 1999), entre

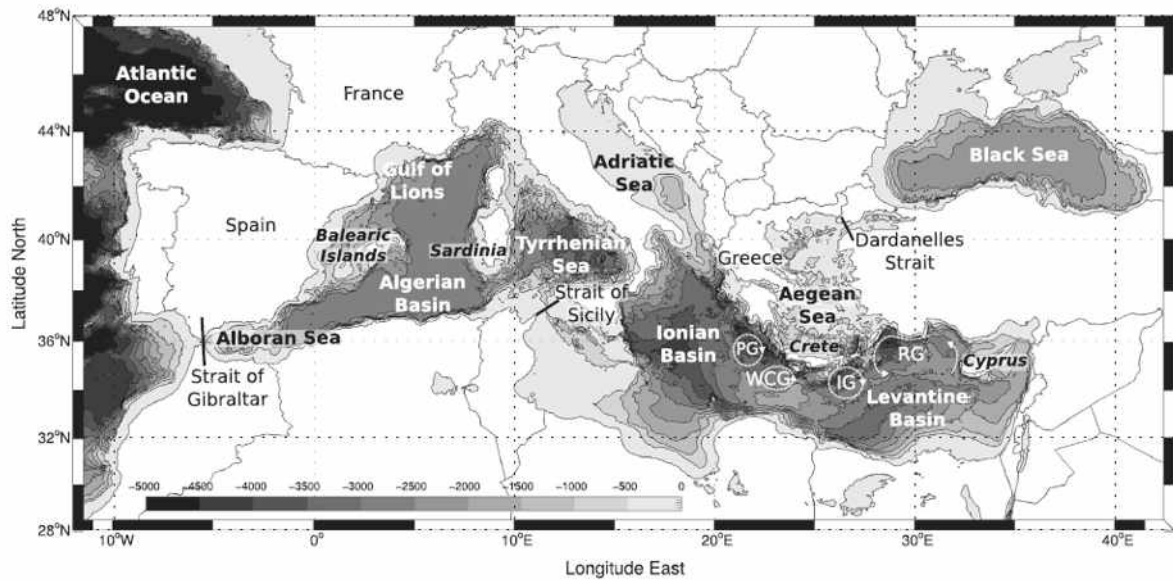


FIGURE 1.1: Bathymétrie de la Méditerranée et nom des principaux sous-bassins (Houpert et al., 2015)

0-100m environ) qui constitue l'un des moteurs de la circulation thermohaline en Méditerranée. Ces AW circulent dans tout le bassin Méditerranéen de manière cyclonique en restant collées à la côte sous l'effet de la force de Coriolis (Millot, 1999) en subissant éventuellement le processus de bifurcation présenté ci-dessus à l'entrée de chaque sous-bassin, les structures de variabilité mésoéchelle jouant, elles un rôle important dans l'étalement de ces eaux vers l'intérieur du bassin.

À leur entrée au détroit de Gibraltar, les eaux atlantiques sont relativement moins salées ( $\sim 36.5$  psu) que les eaux Méditerranéennes de surface. Elles décrivent d'abord un gyre anti-cyclonique quasi-permanent à l'ouest de la mer d'Alboran, puis se prolongent vers l'est par le Almeria-Oran Jet. Les caractéristiques de ces eaux évoluent au cours de leur trajet par effet de mélange (elles atteignent une salinité de 38.0-38.3 psu au nord de la Méditerranée Occidentale) et prennent alors le nom d'Eaux Atlantiques Modifiées (MAW pour Modified Atlantic Waters) (Millot, 1999).

**Le courant Algérien:** L'écoulement de la MAW le long de la côte Algérienne forme un courant d'un débit de  $\sim 1.7$  Sv environ que l'on nomme **Courant Algérien**, d'abord relativement étroit (30-50 km) et profond (200-400m) au niveau d'Oran puis qui devient plus large et moins profond en allant vers l'est (Benzohra and Millot, 1995a).

En arrivant au canal de Sardaigne, une partie de ces eaux, selon un schéma complexe, se détache et remonte le long de la côte Sarde, pour finir par un courant côtier plus ou moins bien organisé au nord-ouest de la Corse, le Courant Ouest-Corse. L'autre partie traverse le Canal de Sardaigne et à l'entrée du détroit de Sicile, le courant se divise à nouveau, deux tiers entrant en Méditerranée Orientale, le troisième tiers entrant dans le bassin Tyrrhénien où, il remonte la côte Italienne et devient le courant Est-Corse, puis revient dans le bassin Provençal en passant le canal Corse, fusionne avec le courant Ouest-Corse en mer Ligure pour donner le **courant Liguro-Provençal** ou **Courant Nord** qui s'écoule le long du Talus continental Français (Testor, 2002). La dynamique dans le bassin Algérien joue, on le voit, un rôle central dans la distribution des MAW dans l'ensemble de la Méditerranée.

#### **1.1.2.2 Eaux Intermédiaires d'Hiver (WIW pour Winter Intermediate Waters):**

Pendant l'hiver, dans le bassin nord Occidental, des vents froids et secs de nord-ouest soufflent fort et souvent, et refroidissant les eaux de surface qui deviennent ainsi plus denses. Elles se retrouvent en sub-surface après avoir été recouvertes par des MAW plus chaudes (donc plus légères), ce qui empêche alors les échanges avec l'atmosphère et leur permet de garder leurs caractéristiques (12.5-13.0°C, 38.1-38.3 psu). On les retrouve un peu partout en Méditerranée Occidentale, notamment sous forme de bulles froides, avec des caractéristiques qui s'atténuent en s'éloignant de leur point de formation.

#### **1.1.2.3 Eau Levantine Intermédiaire (LIW pour Levantine Intermediate Waters):**

Il se forme dans le bassin Oriental entre les îles de Rhodes, de Crète et de Chypre, sous l'effet d'évaporation et de refroidissement engendrés par des vents hivernaux froids et secs, une masse d'eau importante reconnaissable à son maximum de température mais surtout de salinité, stabilisée entre 200 et 600 m. On retrouve cette masse d'eau non seulement partout en

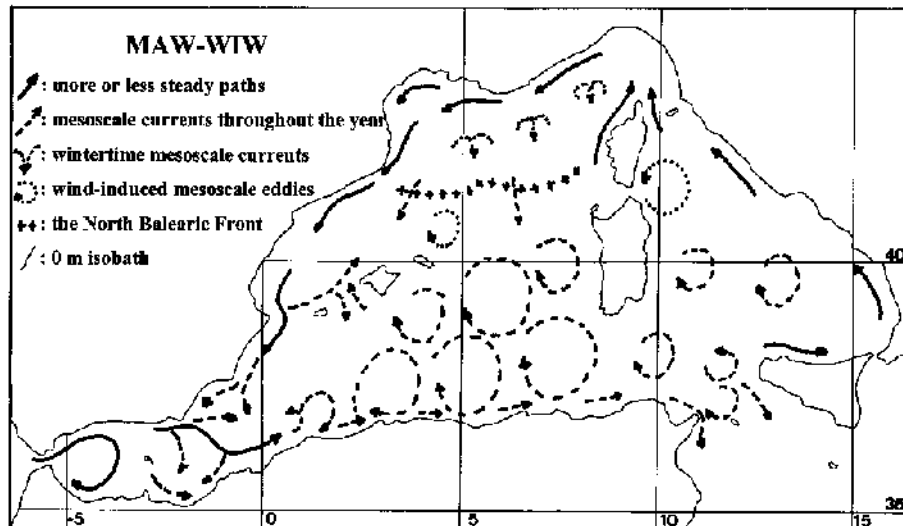


FIGURE 1.2: Circulation de surface en Méditerranée Occidentale (Millot (1999)).

Méditerranée mais elle présente également une signature claire dans l’océan Atlantique, car elle représente la moitié des eaux méditerranéennes qui sortent en profondeur à Gibraltar (Gascard and Richez, 1985).

Après sa formation, la LIW quitte la Méditerranée Orientale par le nord en suivant le talus continental, entre en mer Tyrrhénienne en passant le détroit de Sicile (où sa partie inférieure subit un mélange intense avec d’autres masses d’eau et forme alors l’Eau Profonde Tyrrhénienne (TDW pour Tyrrhenian Deep Waters), elle longe ensuite la côte Italienne jusqu’au Canal corse où elle emprunte deux trajets différents, une partie passant le canal, l’autre contournant le bloc Corse-Sardaigne en restant collée au talus jusqu’à arriver en mer Ligure et rejoignant enfin le Courant Nord (ou Courant Liguro-Provençal). Comme nous allons le voir plus loin, il faut déjà noter ici qu’à son entrée dans le bassin Algérien, une partie de cette LIW est injectée directement à l’intérieur de ce bassin par l’activité de mésoéchelle. En arrivant au détroit de Gibraltar, une partie de la LIW quitte la Méditerranée, l’autre recircule dans le bassin en suivant le même circuit que la MAW (Testor, 2002).

Selon Benzohra and Millot (1995a), les valeurs maximales relatives des Eaux Levantines Intermédiaires dans le Bassin Algérien sont:  $\theta_{\max} \sim 13.2-14.0 \text{ } ^\circ \text{C}$  (entre 300 et 400m),

$S_{\max} \sim 38.5-38.7$  psu (entre 400 et 500m).

La LIW apparait sur un diagramme  $\theta$ - $S$  pris en Méditerranée sous forme d'un pic qui s'atténue le long du circuit que la masse d'eau effectue depuis son site de formation. Cependant, on retrouve au milieu du bassin Algérien, des pics plus prononcés qu'ils ne le seraient à cet endroit si la LIW circulait exclusivement comme décrit auparavant, il y eut d'abord l'hypothèse de la présence d'une veine de courant, transportant cette masse d'eau, qui se détacherait du courant principal au niveau de la pointe sud de la Sardaigne pour longer le talus Algérien en s'écoulant vers l'est (Wüst, 1961). Cette hypothèse a ensuite été réfutée, et il est maintenant établi que c'est bien les tourbillons de MAW en surface, voire des structures de plus petite échelle en subsurface formées au coin sud-ouest de la Sardaigne, qui sont à l'origine de la présence des LIW aux caractéristiques marquées au milieu du bassin Algérien, en détachant des bulles de la veine côtière de LIW, et en les entraînant directement à l'intérieur du bassin Algérien (Millot, 1987, 1999; Benzohra and Millot, 1995a; Millot and Taupier-Letage, 2005).

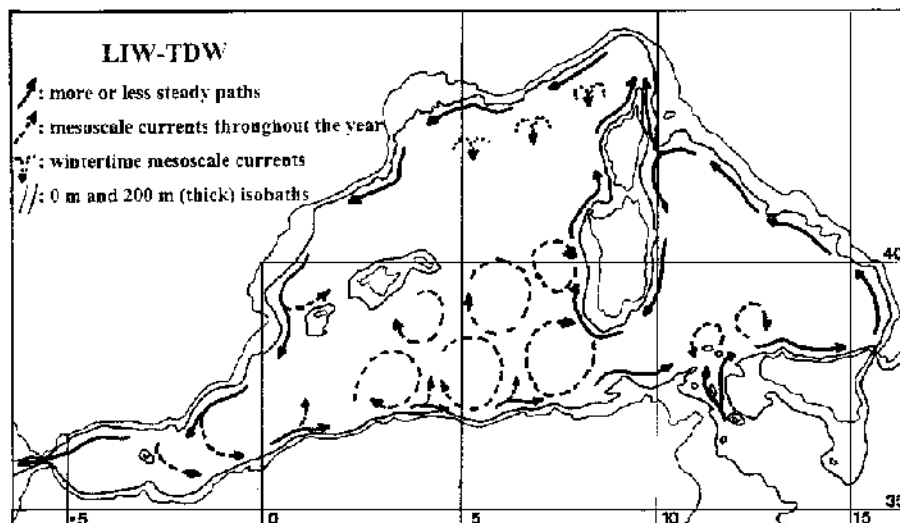


FIGURE 1.3: Circulation des eaux Intermédiaires en Méditerranée Occidentale (Millot, 1999).

#### 1.1.2.4 Eau profonde de la Méditerranée occidentale (WMDW pour Western Mediterranean Deep Water):

La formation d'eaux profondes de la Méditerranée occidentale passe par 3 étapes importantes tel que la figure 1.4 le montre:



FIGURE 1.4: Les trois phases de la convection profonde. **a**: préconditionnement, **b**: mélange vertical, **c**: étalement des eaux néo-formées (Marshall and Schott, 1999).

- **Préconditionnement:** durant cette phase, la circulation cyclonique de type gyrale de la Méditerranée Nord occidentale crée un dôme des isopycnes exposant ainsi les eaux peu stratifiées au centre du gyre à l'influence atmosphérique (Testor, 2002).
- **Mélange vertical:** certains hivers des épisodes violents de Mistral et Tramontane provoquent un refroidissement et une évaporation tellement importante rendant la stabilité de la colonne d'eau si faible dans les zones préconditionnées que des structures d'environ 1 km de diamètre, allant jusqu'à 1000 m de profondeur appelées Plumes apparaissent, où les eaux plongent à des vitesses allant jusqu'à 10 cm/s constituant ainsi la phase de mélange violente permettant le renouvellement des eaux profondes (Testor, 2002).
- **Étalement des eaux néo-formées:** selon Testor (2002), les processus responsable de cette étape sont encore mal connus, néanmoins l'instabilité barocline y jouerait un rôle de première importance. Schott et al. (1996) suggèrent que les WMDW nouvellement formées rejoindraient directement le courant Nord, puis contourneraient les Baléares pour se diriger vers Gibraltar. Une partie se mélangerait avec de la LIW juste avant le détroit, et quitte la Méditerranée. Le reste rejoint les côtes africaines pour poursuivre un circuit cyclonique tel que l'on peut le voir sur la figure 1.5.

Dans le bassin Algérien, les caractéristiques de WMDW sont:  $\theta \sim 12.75-12.90^\circ \text{C}$ ,  $S \sim 38.42-38.47 \text{ psu}$ . (Benzohra and Millot, 1995a).

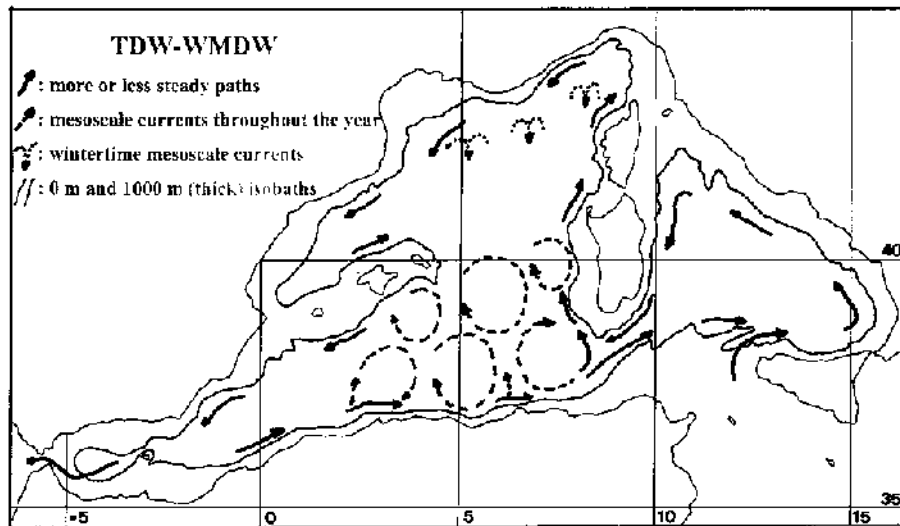


FIGURE 1.5: Circulation des eaux profondes en Méditerranée Occidentale selon Millot (1999).

#### 1.1.2.5 Variabilité mésoéchelle:

Comme beaucoup d'autres mers et océans, la Méditerranée, et notamment le bassin Algérien, se caractérise par une activité de mésoéchelle très importante: fronts, méandres des fronts et courants, tourbillons de surface et de sub-surface, associées à une activité d'ondes internes. La variabilité saisonnière, qui contrôle notamment la stratification en densité, influence également les caractéristiques de cette activité qui dépend de cette stratification. Globalement, l'activité de mésoéchelle joue un rôle capital dans le transport des eaux de la côte vers le large.

#### Tourbillons Algériens (Aes pour Algerian Eddies) :

L'instabilité hydrodynamique du courant Algérien crée des méandres qui aboutissent généralement à la formation de tourbillons anticycloniques qui se détachent du courant. Ces tourbillons ont un diamètre allant de 50-150 km, pouvant aller jusqu'à 250 km et se propagent vers l'est, dans le premier stade de leur formation à des vitesses de l'ordre de quelques km/jour, étant alors responsables du renversement du courant le long de la côte. Ces tourbillons ont une extension verticale importante allant parfois jusqu'au fond, avec des durées de vies de

plusieurs mois, voire années.

Arrivés à proximité du canal Sardaigne-Tunisie, si les tourbillons ne se dissipent pas suite à la forte interaction avec la topographie (ce qui arrive le plus fréquemment), ils remontent le long du Talus continental Sarde, puis s'y détachent pour continuer leur trajet vers l'ouest à travers le bassin Algérien en suivant un circuit cyclonique que l'on peut relier aux Gyres Algériens. Des tourbillons ayant effectué jusqu'à trois fois ce circuit cyclonique ont été observés avant de se dissiper (Millot, 1999; Testor, 2002).

### **1.1.3 Les gyres Algériens:**

En se basant sur la trajectoire de flotteurs isobares de sub-surface de l'expérience LIWEX, et de flotteurs profileurs de l'expérience MEDPROF et sur des mesures de courant par lignes de mouillage de l'expérience ELISA, de rares études ont révélé la présence de deux grands gyres cycloniques dans le bassin Algérien, d'un diamètre de 100-300 km, centré aux alentours de 37.5 °N, 2.5°E pour le gyre Ouest et 38.5 °N, 6°E pour le gyre Est. Ces gyres ont une vitesse orbitale de l'ordre de 5 cm/s qui pourrait expliquer les circuits cycloniques des Aes qui a été observé (Testor et al., 2005). D'après (Testor, 2002), leur présence semble fortement liée à la bathymétrie et à la vortacité planétaire.

## **1.2 Problématique:**

Pour des raisons diverses, le bassin Algérien est beaucoup moins bien documenté, en quantité de données et de production scientifique, que la partie Nord occidentale, et la connaissance de sa dynamique est ainsi très limitée. La principale référence dans cette partie de la Méditerranée sont les travaux de Millot basés sur les campagnes MEDIPROD 5 (1986 - 1987), durant laquelle plus de 100 stations CTD ont été effectuées, 5 bouées dérivantes ont été mises à l'eau et 28 courantomètres déployés sur un réseau de 8 mouillages durant 9 mois environ,

MEDIPROD 6 effectuée en juin 1990 ainsi que ALGIERS/MAST-3 menées de 1996-1997 durant lesquels des phénomènes de mésoéchelle ont été échantillonnés.

Le système d'observation SOMBA (Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien) dédié au bassin Algérien commence à être mis en place depuis 2014 pour pallier ce problème.

### **1.3 Objectifs:**

Mon stage de master/ingénieur, qui entre dans le cadre d'une bourse dont j'ai bénéficié grâce au RME (Réseau Mixte des Écoles ) est le résultat de la volonté de développer les échanges entre l'ENSSMAL et le LOCEAN dans le domaine de l'océanographie physique pour soutenir le développement de SOMBA et permettre de combler un manque presque complet d'effectif dans ce domaine en Algérie.

D'un point de vue scientifique, l'objectif de mon stage était d'explorer les premières données acquises dans le cadre de SOMBA, notamment celles de la première campagne océanographique effectuée en 2014 , d'utiliser les autres sources de données disponibles, y compris historiques, afin de décrire au mieux les grands schémas de circulation dans le bassin Algérien. Il s'agissait notamment de mieux mettre en évidence à partir des données hydrologiques et de courantométrie les gyres Algériens.

Une meilleure connaissance de la dynamique pourrait largement contribuer à expliquer la distribution des paramètres essentiels tels que nutriments et paramètres du système des carbonates, mais aussi des phénomènes divers expliquant l'évolution de l'écosystème marin hauturier, et à terme, mieux comprendre l'évolution des ressources, par exemple la fluctuation importante ces dernières années des quotas de sardines pêchées en Algérie, qui reste inexpiquée jusqu'à présent.

## **Chapitre 2**

### **Données & Méthodes**

## **2.1 Système d’Observation à la Mer du Bassin Algérien (SOMBA):**

SOMBA est le projet de système d’observation côtier et hauturier pour les eaux Algériennes. Quelques séries de mesures à des points fixes côtiers de référence existent déjà et doivent être complétées par des mesures en haute mer permettant de décrire le continuum côte-large. Avec ces mesures hauturières, SOMBA a l’objectif de constituer la composante Algérienne du système intégré d’observation océanique de la Méditerranée en lien avec les autres systèmes d’observation maintenus par les autres pays.

Ce projet, le premier de ce type depuis plusieurs décennies, répond au besoin de développement et de coordination des observations marines récurrentes dans les eaux Algériennes et en Méditerranée pour la recherche fondamentale sur les écosystèmes marins mais aussi pour les acteurs économiques qui peuvent y trouver les données nécessaires pour des applications opérationnelles.

SOMBA est coordonné par le Réseau Algérien des Sciences de la Mer (RASMER), et permet, comme le fait en France le système d’observation MOOSE pour le programme scientifique MERMEX-MISTRALS, de fournir des données de long terme au programme MERMEX-Algérie. Dans le cadre d’un projet ENVIMED soutenu par le MAE, une collaboration a été établie avec les laboratoires qui opèrent avec MOOSE en France et SOCIB autour des Iles Baléares en Espagne.

## **2.2 Description du jeux de données:**

### **2.2.1 Données de SOMBA GE 2014:**

Les principales données utilisées durant mon stage proviennent de la première campagne océanographique de SOMBA , qui s’est déroulé du 16 Août au 10 Septembre 2014 à bord du navire océanographique le Téthys II ayant couvert un réseau de 70 stations hydrologiques dans tout le bassin Algérien (voir figure 2.1). Ces stations ont été organisées en radiales, qui n’ont

pas pu être toutes complètement réalisées, permettant de cartographier au mieux les 2 gyres Algériens. Les stations dans les eaux territoriales Algériennes n'ont pas pu être réalisées.

L'acquisition des données hydrologiques et courantologiques (accessibles librement sur le

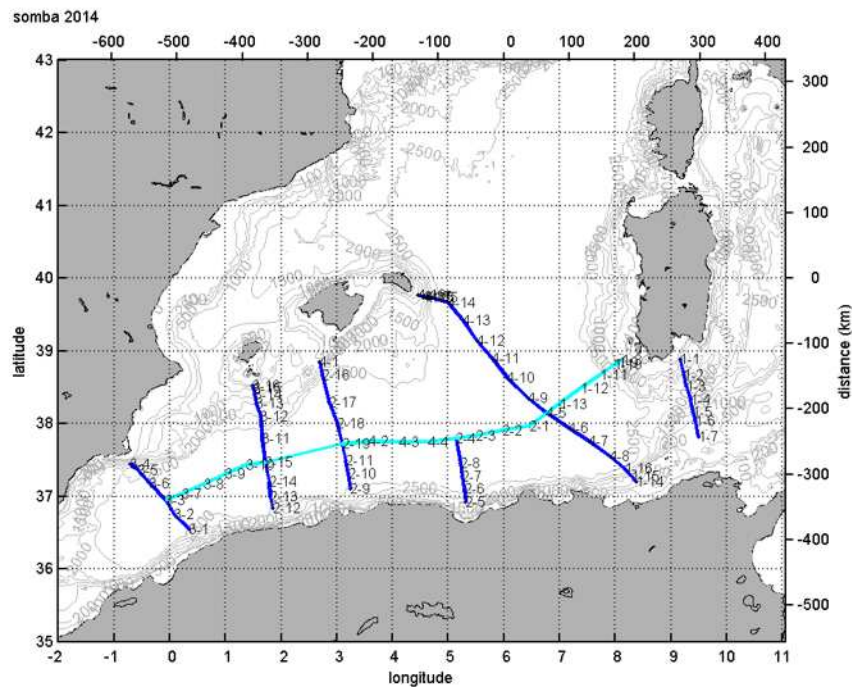


FIGURE 2.1: Plan de campagne océanographique Somba 2014. Les stations sont identifiées comme suit: Leg-numéro. Les stations reliées par un trait continu représentent une radiale

site de **MOOSE**) s'est faite grâce au déploiement d'une bathysonde (figure 2.2) composée d'une CTD-Rosette (SBE911+) munie de 2 paires de capteurs Température-Conductivité suivant deux lignes de pompe indépendantes, un capteur d'oxygène, un fluorimètre, un transmissiomètre, un altimètre de portée 50m, 11 bouteilles Niskin, 2 courantomètres ADCP 300K RDI monitor et leur alimentation indépendante constituant l'ensemble L-ADCP pour Lowered-ADCP, un UVP (Underwater Vidéo Profiler) avec sortie analogique et alimentation indépendante permettant l'acquisition d'image à haute fréquence des particules et organismes marins de tailles comprises entre 100 microns et quelques millimètres.

Les données hydrologiques n'ont pas subi de traitement en amont autre que le traitement standard Seabird, les données des échantillons de salinité permettant la correction éventuelle de ces données, ayant été analysées seulement au cours de mon stage. Cependant il a été nécessaire de corriger les positions GPS de plusieurs stations (des erreurs sont apparues en passant d'un format à un autre), de rassembler des fichiers distincts représentant un même profil à une station

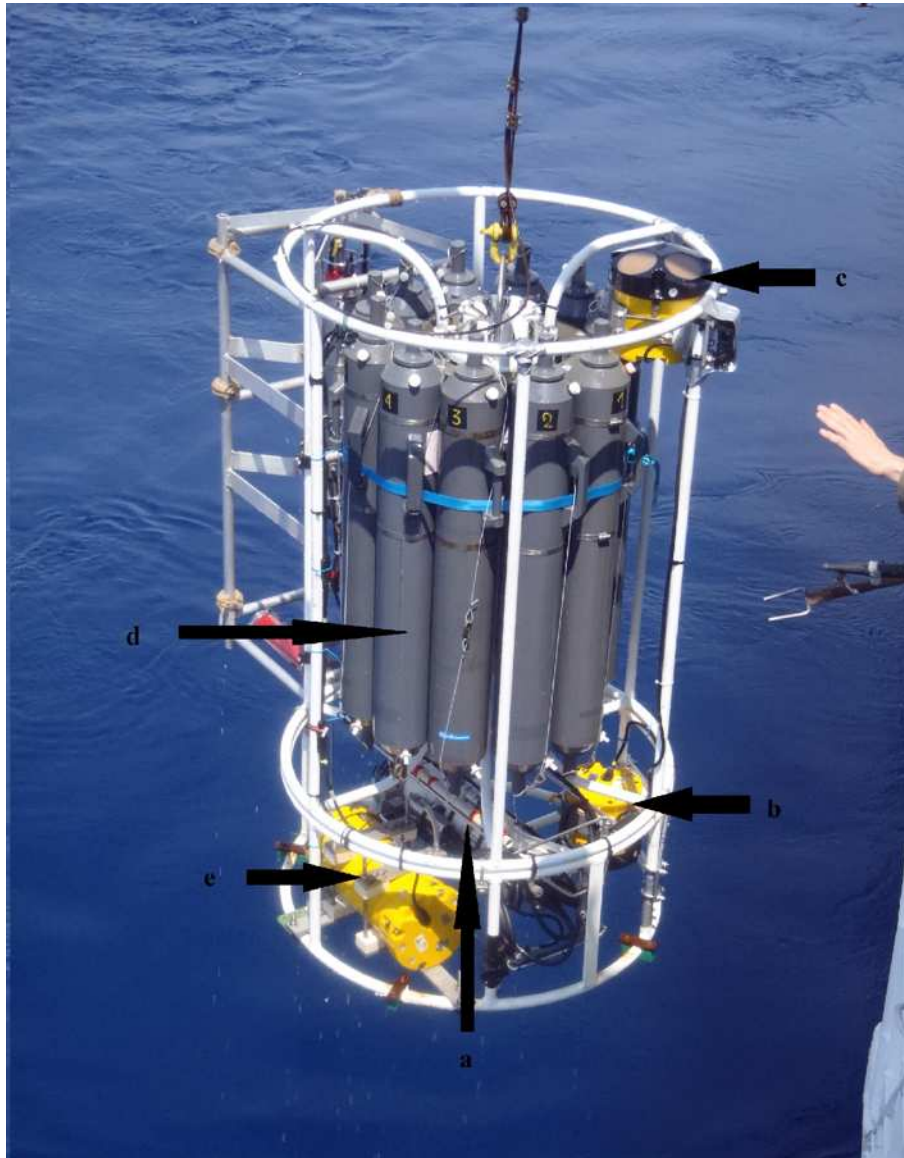


FIGURE 2.2: CTD-Rosette ayant servi durant la campagne SOMBA 2014. a: CTD, b: ADCP downlooking MASTER, c: ADCP uplooking SALVE, d: bouteille Niskin, e: batterie alimentant les ADCP

(problèmes fréquents lors de l'acquisition). Nous avons également choisi de travailler avec une seule paire de capteurs T-C (Température-Conductivité), étant donné que la deuxième paire présentait parfois des gradients trop forts inexplicables au niveau de quelques profils.

Les données de courant quant à elles, ont été traitées par Hervé Le Goff. Elles passent d'abord par un contrôle de qualité, puis au cas par cas, on choisit de contraindre ou non les données du LADCP (profils verticaux de courant mesuré avec la bathysonde) par ceux de S-ADCP (pour Ship ADCP ou ADCP de coque qui fournit un profil vertical de courant sur 350m tout au long

de la trajectoire du bateau), une description plus complète de ce traitement est disponible dans le [rapport LADCP-SADCP de SOMBA 2014](#).

### 2.2.2 les campagnes d'Urania:

Les données qui ont été fournies à ma demande par Katrin Schroeder de l'ISMAR/CNR (Italie), proviennent de plusieurs campagnes du navire océanographique Urania dont:

- **MEDCO08:** entre le 3 et le 24 Novembre 2008, incluant une grande radiale est-ouest dans le bassin Algérien, très intéressante pour notre étude;
- **VENUS1:** du 31 juillet au 25 août 2010, incluant également une radiale est-ouest;
- **BIOFUN010:** du 30 Avril au 17 mai 2010 (domaine d'étude: Mer des Baléares, canal Sardaigne-Tunisie, Mer Tyrrhénienne);
- **ICHNUSSA 2014:** du 13 novembre au 1<sup>er</sup> décembre 2014 (domaine d'étude: Mer Tyrrhénienne, canal Sardaigne-Tunisie, canal de Corse, Mer Ligure).

Ces données complètent la base de donnée historique qui m'a été fournie par Pierre Testor du LOCEAN décrite ci-dessous.

### 2.2.3 Base de donnée historique:

Elle est constituée de toutes les données que Pierre Testor a pu rassembler depuis sa thèse en 2002, complétée par Loic Houpert. Elle contient des données provenant principalement du projet MEDAR-MEDATLAS, mais aussi de World Ocean Database, de Campagnes océanographiques Italiennes et Espagnoles, de la base de donnée [CORIOLIS](#), incluant également les données très récentes de gliders qui ont été déployés dans le cadre du projet Européen JERICO ([voir EGO](#)). Cette base de données est accessible à la demande.

Ces données ont subi un traitement dans le but d'éliminer les erreurs grossières, élimination des doublons, des profils n'ayant pas de données au delà de 10 m sous la surface ou de ceux

présentant un gradient trop important en appliquant la méthodologie décrite par [Houpert et al. \(2015\)](#).

#### **2.2.4 Flotteurs ARGO:**

Les positions GPS de plusieurs flotteurs ARGO acquis grâce à [l'outil de sélection](#) du site de CORIOLIS, ont permis de reconstituer leurs trajectoires, une information lagrangienne très utile pour mettre en évidence la circulation cyclonique des deux gyres Algériens en plus des données hydrologiques et de courant dont nous disposons.

#### **2.2.5 Données d'altimétrie (AVISO):**

La topographie dynamique absolue de la surface de la mer a été téléchargée sur le site de [AVISO](#), dans le but d'avoir une vue synoptique pendant la campagne de l'activité de mésoéchelle et de suivre comme nous allons le voir, la signature en surface d'un tourbillon Algérien présent au large pendant la campagne.

### **2.3 Méthodes de visualisation des données:**

#### **2.3.1 Section de température potentielle, salinité et densité potentielle:**

Nous avons considéré les profils collectés lors des stations de SOMBA en suivant sept transects, à savoir: Sardaigne - Tunisie, Minorque - El kala, Baie de Béjaia (côte-large), Palma-Alger, Ibiza - Cherchell, Cartagena - Mostaganem et enfin une grande section est-ouest (représentées par des lignes sur la figure 2.1); certains transects ont été faits en plusieurs parties, ce qui pose quelques problèmes de synopticit , notamment pour les don es L-ADCP. En plus des données des radiales SOMBA-GE2014, nous avons utilisé les grandes radiales est-ouest de Katrin Schroeder.

Les profils d'un même transect ont servi   établir des sections de température potentielle, salinité

et densité potentielle, puis grâce à différents focus graphiques, nous avons pu visualiser les différentes masses d'eau.

### **2.3.2 Données de courant:**

Le plan de la campagne SOMBA-GE2014 a été élaboré de manière à pouvoir cartographier au mieux les gyres Algériens. Pour cela, nous avons utilisé les données de courant collectées par le L-ADCP, moyennées sur la couche 1000 - 2000 m (à ces profondeurs, la variabilité est plus faible qu'en surface, ce qui permet donc de mieux visualiser les gyres).

Les vecteurs résultants ont été projetés sur un fond de carte représentant les contours  $f/H$  ( $f$  étant la vorticité planétaire,  $H$  la hauteur d'eau) normalisé par  $f_0$  à  $37^\circ 45'$  N,  $H_0 = 2800$ m (Testor et al., 2005). Les trajectoires de quelques flotteurs Argos ont été également tracées sur les figures afin de compléter la vision eulérienne du L-ADCP par une vision lagrangienne et ainsi de mieux analyser l'emplacement des gyres et la distribution des vitesses dans les gyres.

### **2.3.3 Séries temporelles:**

Afin de mettre en évidence l'évolution des masses d'eaux dans le bassin Algérien, nous avons utilisé tous les profils en notre possession pour la période allant de 1980 à 2015 en les regroupant dans 6 polygones choisis de sorte à avoir des masses d'eaux aux différentes phases de leur circulation dans le bassin Algérien et pour chaque polygone, nous avons pris la valeur moyenne de température potentielle ou de salinité dans une épaisseur d'eau donnée, puis nous l'avons représenté dans un repère en fonction de la date à laquelle le profil a été fait. Cette approche permet de s'affranchir de la distribution de données très irrégulière dans le temps comme dans l'espace.

En supposant que l'évolution des caractéristiques physiques des eaux est linéaire par rapport au temps, nous avons alors pu estimer (méthode des moindres carrés) la tendance des caractéristiques de ces eaux dans le bassin Algérien.

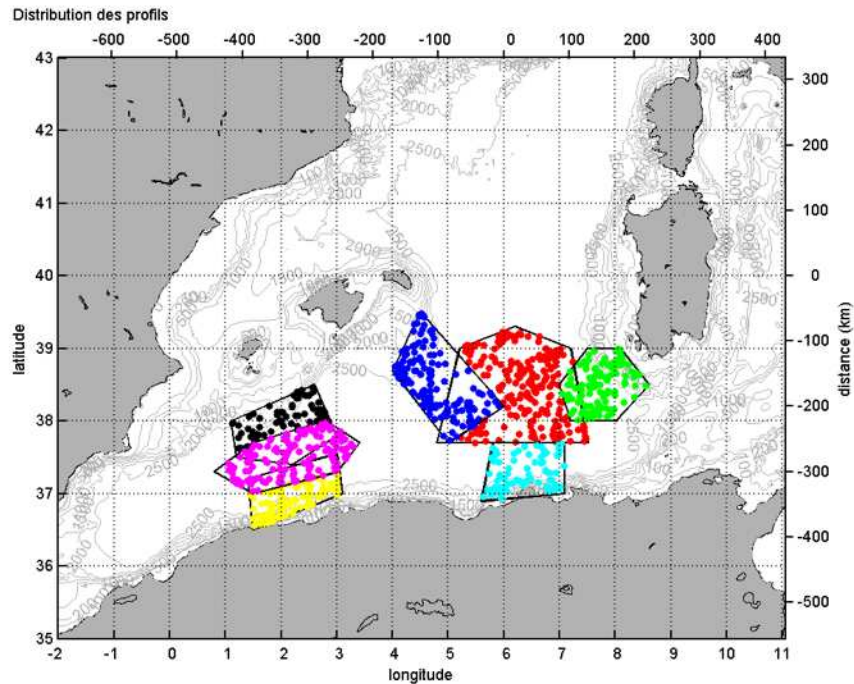


FIGURE 2.3: Distribution des données utilisées: les séries temporelles ont été obtenues à partir des profils contenus dans chacun des sept polygones séparément

- **Polygone 1 (rouge sur la figure 2.3):** nous avons choisi de considérer les données se trouvant dans cette zone, car c'est le coeur du gyre Algérien Est, les eaux qui s'y trouvent, sont  $\pm$  isolées des eaux environnantes.
- **Polygone 2 (magenta sur la figure 2.3):** représente le coeur du gyre Ouest.
- **polygone 3 (vert sur la figure 2.3):** a été choisi car c'est le point d'entrée des LIW dans le bassin Algéro-Provençal.
- **polygone 4 et 5 (cyan et jaune respectivement sur la figure 2.3):** ces deux polygones sont collés au talus continental Algérien (qui est important dans la circulation de bord Est).
- **polygone 6 et 7 (noir et bleu respectivement sur la figure 2.3):** au niveau du talus continental des Baléares qui canalise une partie des eaux profondes selon les schémas de circulation de [Milot \(1999\)](#).

# **Chapitre 3**

## **Résultats**

### 3.1 Description du Bassin Algérien à travers la campagne SOMBA-GE2014:

Nous avons commencé par décrire le bassin Algérien à partir des données de la campagne, d'abord à partir d'une analyse des masses d'eau par diagrammes  $\Theta$ -S en différents endroits du bassin. Ils nous ont permis d'identifier les caractéristiques des principales masses d'eau ainsi que certains traits de circulation.

Nous pouvons clairement identifier la LIW sur la figure 3.1, qui apparaît sous forme d'un pic dans tous les diagrammes nommée dans la littérature "*scorpion tail*" (Millot, 2013). Ce pic est le plus prononcé au niveau du talus Sarde ( $\Theta \simeq 14.1$  °C,  $S \simeq 38.72$ ), puis s'atténue au fur et à mesure que nous nous en éloignons, et il est le moins marqué à l'ouest du bassin Algérien ( $\Theta \simeq 13.35$  °C,  $S \simeq 38.52$ ). Néanmoins, nous constatons que si la LIW suivait un circuit strictement cyclonique dans la Méditerranée Occidentale, nous retrouverions les eaux Levantines les moins marquées au nord-est de la côte Algérienne (Rectangle (5)), là où les eaux ayant fait le tour du bassin et n'ayant pas passé le détroit de Gibraltar reviennent pour poursuivre leur trajet vers le Canal de Sardaigne. Les diagrammes que nous avons obtenus témoignent du fait qu'il y a bien un autre mécanisme responsable de l'étalement des eaux Levantines, vraisemblablement les phénomènes de mesoéchelle (tourbillons de surface ou de subsurface) comme nous l'avons vu précédemment.

La WIW, caractérisée par un minimum relatif de température ( $\Theta \simeq 13.2$  °C), apparaît sur certains diagrammes, preuve que nous la retrouvons systématiquement dans le bassin Algérien bien qu'elle ait été formée plus au nord et que son cheminement vers le bassin Algérien ne soit pas bien défini. Testor et al. (2005) ont montré que les tourbillons de submésoscale (SCV pour Submesoscale Coherent Vortices) formés dans le bassin Provençal sont capables d'atteindre le sud en préservant les caractéristiques T/S des masses d'eaux qui les constituent, entre autres la WIW.

La WMDW est également présente sur tous les diagrammes avec une température potentielle  $\Theta \simeq 12.91$  °C et une salinité  $S \simeq 38.48$ . Là aussi les processus qui expliquent sa présence dans le bassin Algérien peuvent être l'advection par les courant de bord, ou bien des SCVs (Testor

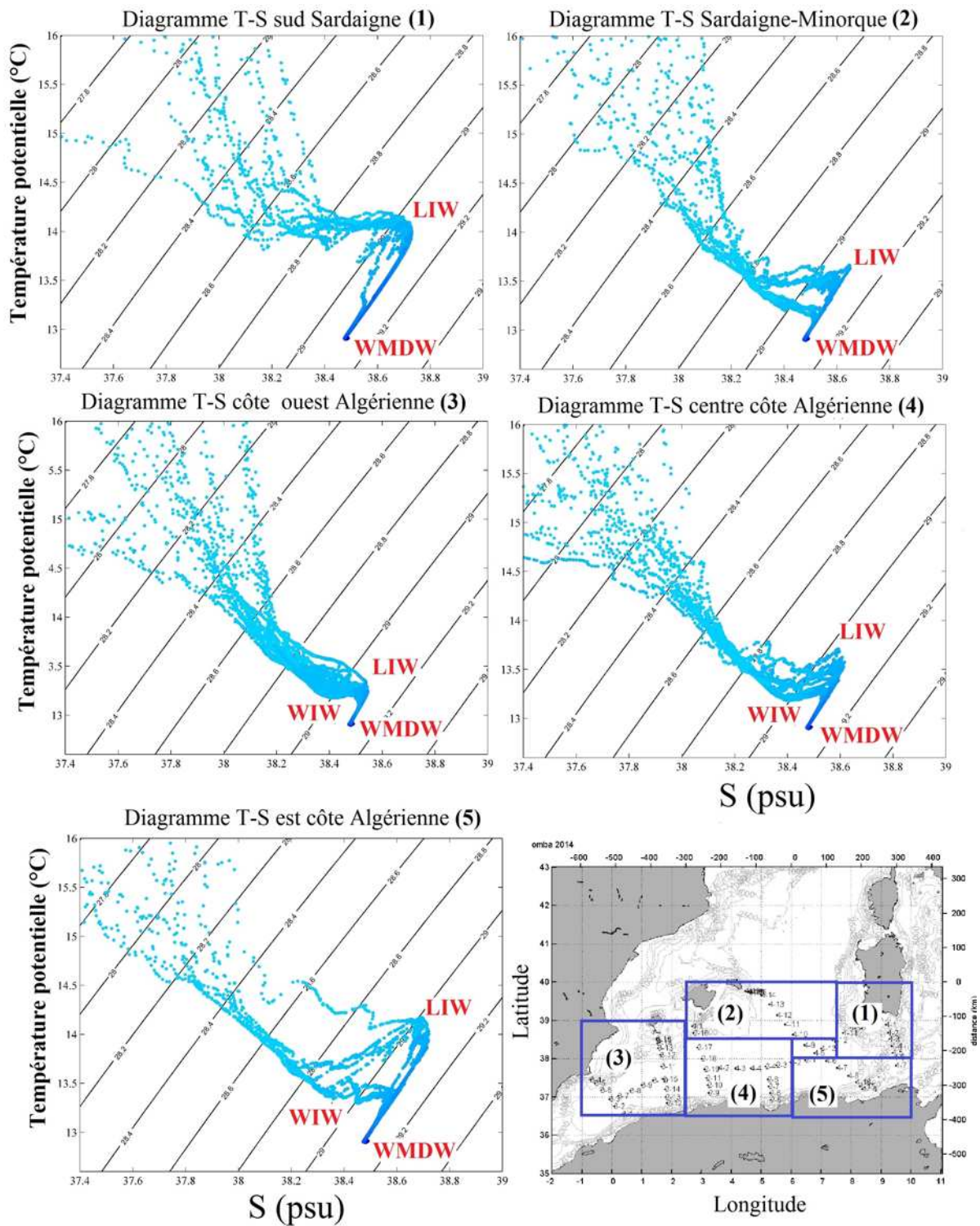


FIGURE 3.1: Diagrammes  $\Theta$ -S faits à partir des données SOMBA-GE2014, à différents endroits du bassin Algérien (les rectangles numérotés sur la carte correspondent aux diagrammes portant le même numéro). Les lignes parallèles des diagrammes représentent les isopycnes. La couleur devient plus foncée en fonction de la profondeur.

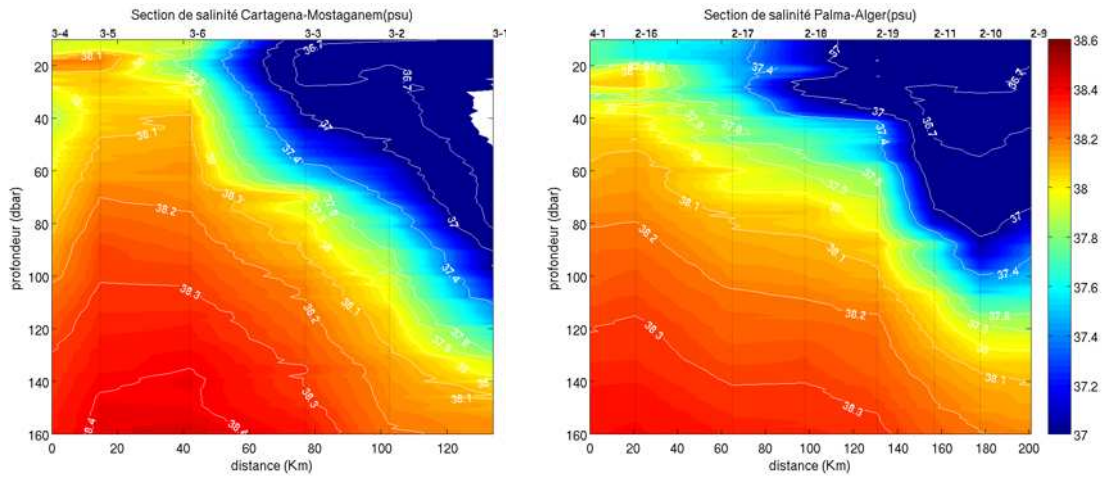


FIGURE 3.2: Section de salinité Carthagène-Mostaganem (à gauche) et Palma-Alger (à droite) dans la couche de surface

et al., 2005).

Les Sections de température potentielle, salinité et densité potentielle nous ont permis aussi de noter quelques résultats intéressants.

Les radiales perpendiculaires à la côte permettent de décrire le courant Algérien durant l'été 2014. Nous distinguons le courant Algérien sur les sections de salinité par le minimum qui caractérise les eaux Atlantiques modifiées (MAW) qu'il transporte. Sur la section la plus à l'ouest du bassin, le courant Algérien est large d' $\sim 80$  km, et profond d' $\sim 120$  m, il semble devenir moins profond sur la section Palma-Alger  $\sim 100$  m (figure 3.2).

Nous avons également pu observer que le cœur de la LIW n'est pas collé à la côte Algérienne, il est à environ 50 km de cette dernière. Nous pouvons voir ceci sur les sections de température potentielle et salinité (figure 3.3) de la radiale allant de la côte de Béjaïa vers le large.

Les eaux qui tapissent le bassin Algérien sont légèrement plus chaudes et plus salées que les eaux sus-jacentes (voir figure 3.12). Cela serait vraisemblablement dû à l'événement

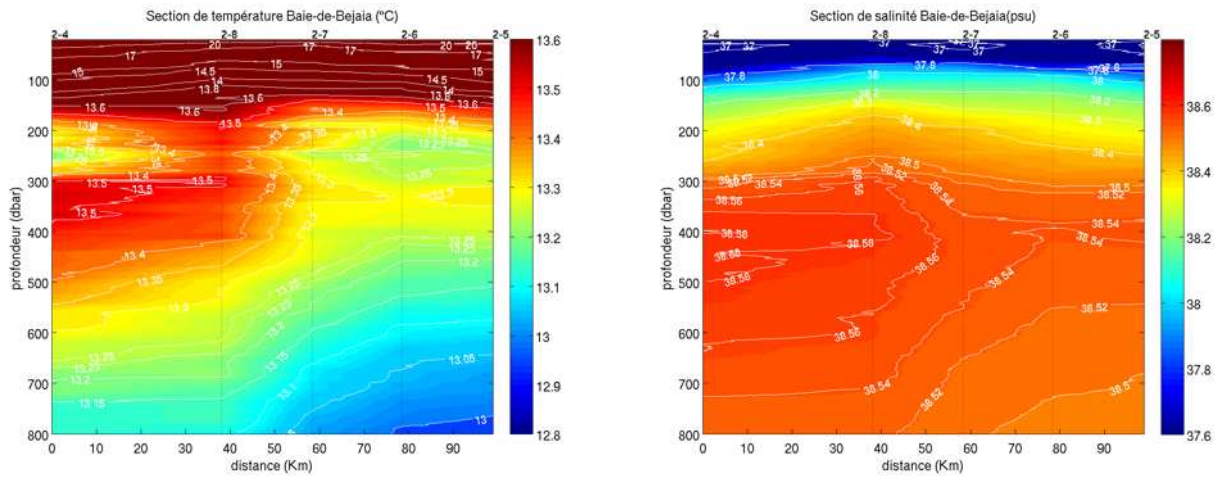


FIGURE 3.3: Section de température potentielle (à gauche) et de salinité (à droite) dans les eaux intermédiaires de la radiale Béjaia (côte-large)

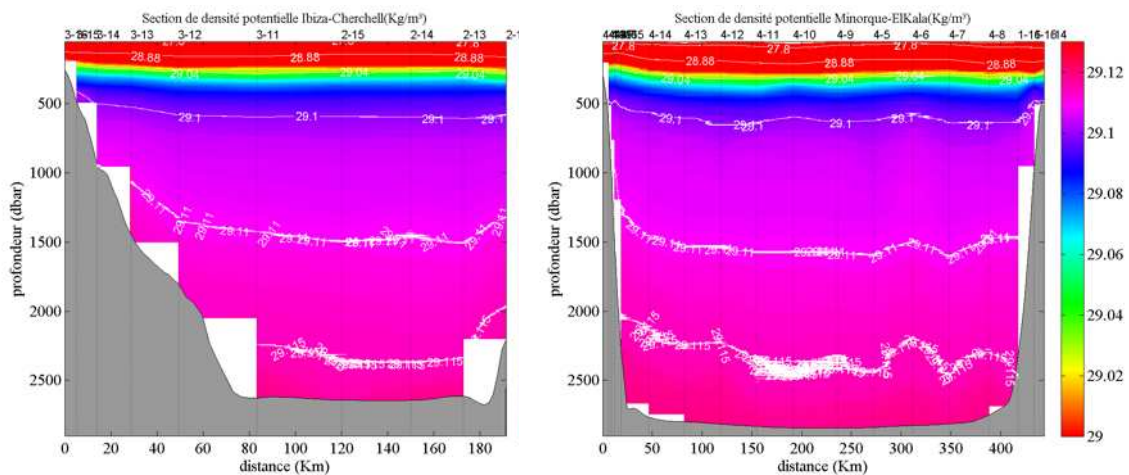


FIGURE 3.4: Section de densité potentielle Ibiza-Cherchell (à gauche) et Minorque-El Kala (à droite)

cité par [Schroeder et al. \(2008\)](#) correspondant à l'augmentation de la température potentielle et de la salinité de la WMDW formée en 2004-2006.

Les sections de densité potentielle Minorque-El kala et Ibiza-Cherchell (figure 3.4) montrent une inclinaison des isopycnas témoignant d'un courant de WMDW allant de l'est vers l'ouest en suivant le talus continental des Baléares, conforme aux schémas de [Millot \(1999\)](#) (voir figure 1.3).

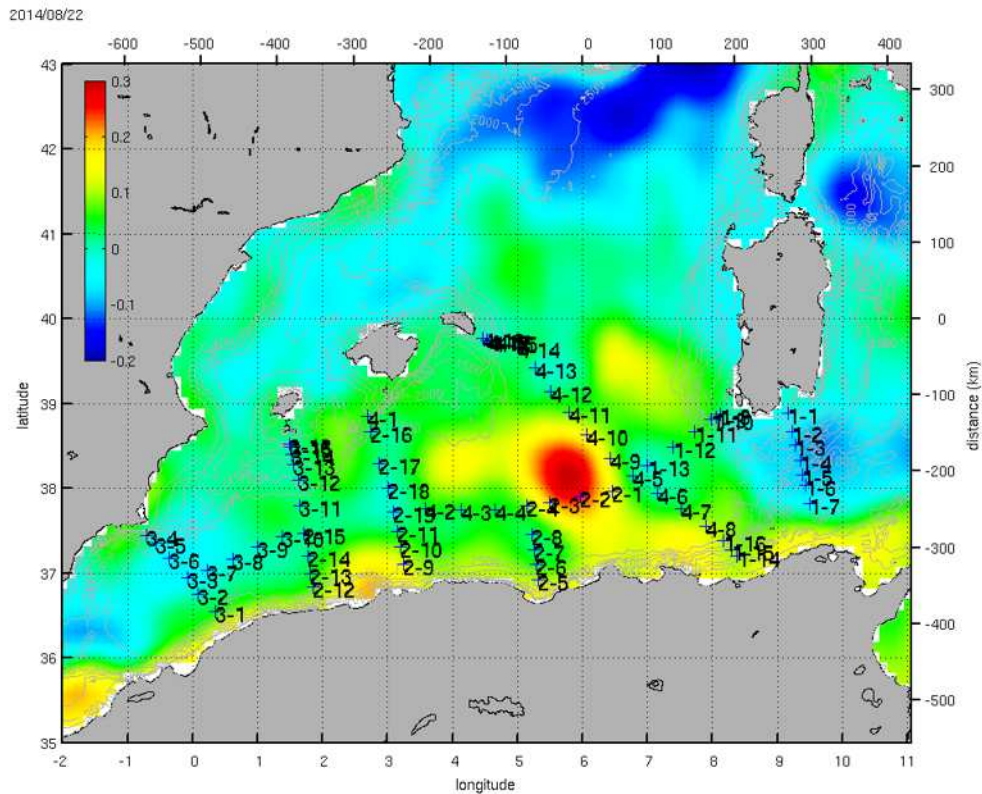


FIGURE 3.5: Carte de topographie dynamique absolue du bassin Algérien le 22 Aout 2014 avec l'emplacement des stations de SOMBA-GE2014. l'échelle est en mètres (données acquises sur AVISO).

### 3.1.1 Tourbillon Algérien:

Durant la campagne SOMBA-GE2014, un tourbillon Algérien a été échantillonné et les données récoltées y sont intéressantes. Afin d'avoir une idée sur l'emplacement des stations par rapport au tourbillon, et d'estimer son diamètre, nous avons représenté la carte de topographie dynamique correspondant à la date où les stations ont été faites au niveau du tourbillon (figure 3.5), ainsi qu'une image de couleur de la mer et de température de surface (figure A.1, A.2 en annexe A).

A partir de ces trois images, nous avons estimé le diamètre du tourbillon à environ 130 km. Le sens de rotation anticyclonique est mis en évidence par la "bosse" que le tourbillon crée, clairement visible sur la figure 3.5. Nous pouvons voir également sur la figure A.1 et A.2 (Annexe A) des eaux côtières plus froides et plus riches en chlorophylle entraînées vers le large par le tourbillon à sa gauche.

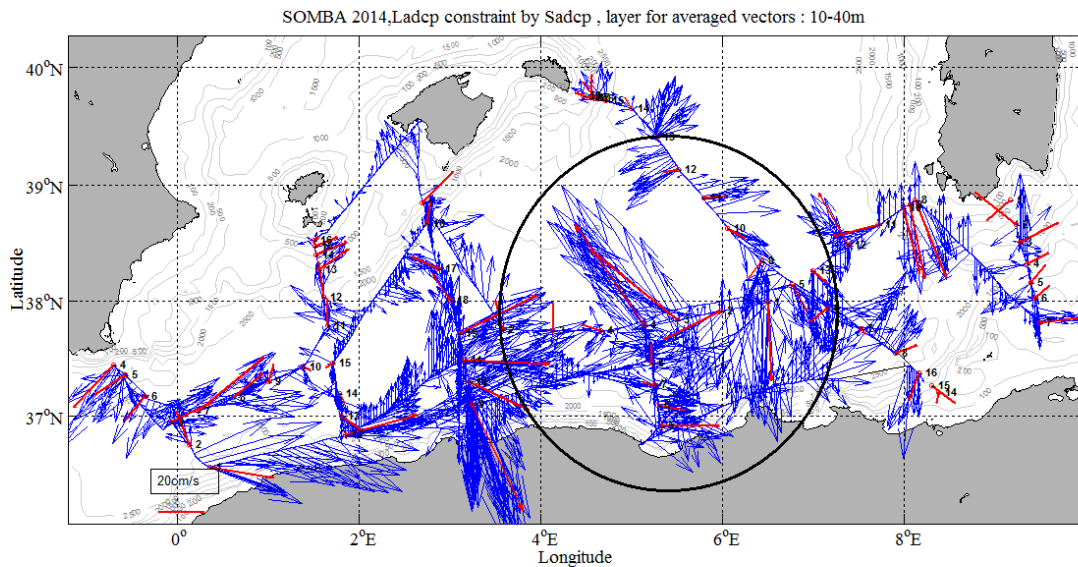


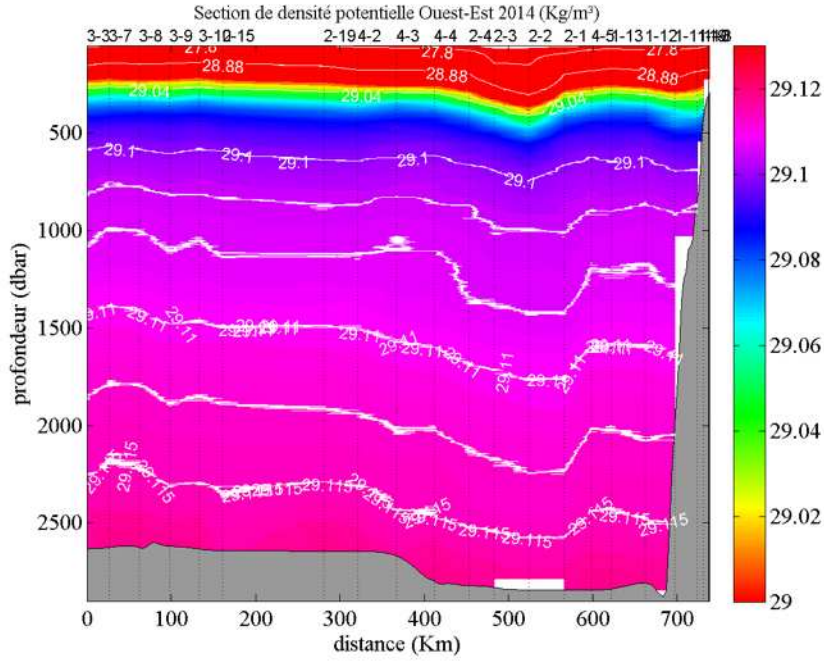
FIGURE 3.6: Courant moyenné entre 10 et 40 m de profondeur. Les vecteurs bleus représentent le courant mesuré par le S-ADCP, les rouges celui mesuré par le LADCP.

Nous avons représenté sur la figure 3.6, en bleu, le courant mesuré par l'ADCP de coque (S-ADCP) qui a fonctionné durant toute la campagne hormis le premier transit Toulon-Sardaigne et en rouge, le courant mesuré par le L-ADCP placé sur la rosette. La trajectoire du bateau effleure la périphérie du tourbillon, les vitesses enregistrées par le S-ADCP vont jusqu'à environ 60 cm/s, celles enregistrées par le LADCP jusqu'à  $\sim 50$  cm/s.

Les données hydrologiques, et de courant acquises lors du déploiement de la rosette vont nous permettre de caractériser ce tourbillon sur toute la colonne d'eau.

Nous savons des données précédentes que les stations qui ont été faites à l'intérieur du tourbillon sont la 2-1, 2-2, 2-3 et 2-4, et nous voyons sur la section de densité (figure 3.7) l'enfoncement des isopycnes et ce jusqu'aux eaux profondes, ce qui laisse présumer que le tourbillon intéresse toute la colonne d'eau.

Le courant géostrophique a été calculé à partir des données de densité en nous basant sur la formule du vent thermique qui relie le gradient horizontal de densité au cisaillement



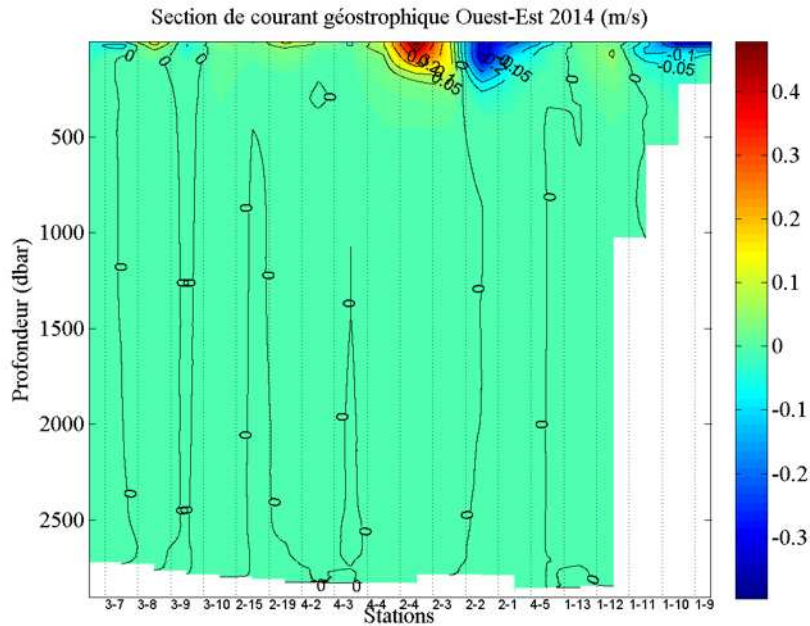


FIGURE 3.8: Section de la composante barocline de la vitesse géostrophique  $V_g$  (est-ouest)

La différence entre la vitesse mesurée par les ADCP et la vitesse calculée par géostrophie peut-être due au fait que dans notre calcul nous n’avons pris en compte que la partie barotrope de la vitesse en posant l’hypothèse que la vitesse au fond est nulle. Nous pouvons estimer la partie barotrope grâce aux mesures faites par le L-ADCP. Nous pouvons supposer que les vitesses mesurées près du fond (figure 3.9) représentent la partie barotrope de la vitesse. D’autant plus qu’elles sont de l’ordre de 10 cm/s (cela correspond à la différence citée précédemment). Elle vient s’ajouter à la vitesse barocline calculée, sur toute la colonne d’eau pour avoir la vitesse de courant absolue.

Pour résumer, durant SOMBA-GE2014, un tourbillon ayant une influence sur toute la colonne d’eau a été échantillonné, son diamètre est d’environ 130 km, les vitesses orbitales d’ $\sim 60$  cm/s, ce qui donne une période de retournement d’environ 8 jours. Ces caractéristiques sont bien en accord avec la littérature (Benzohra and Millot, 1995b; Ruiz et al., 2002).

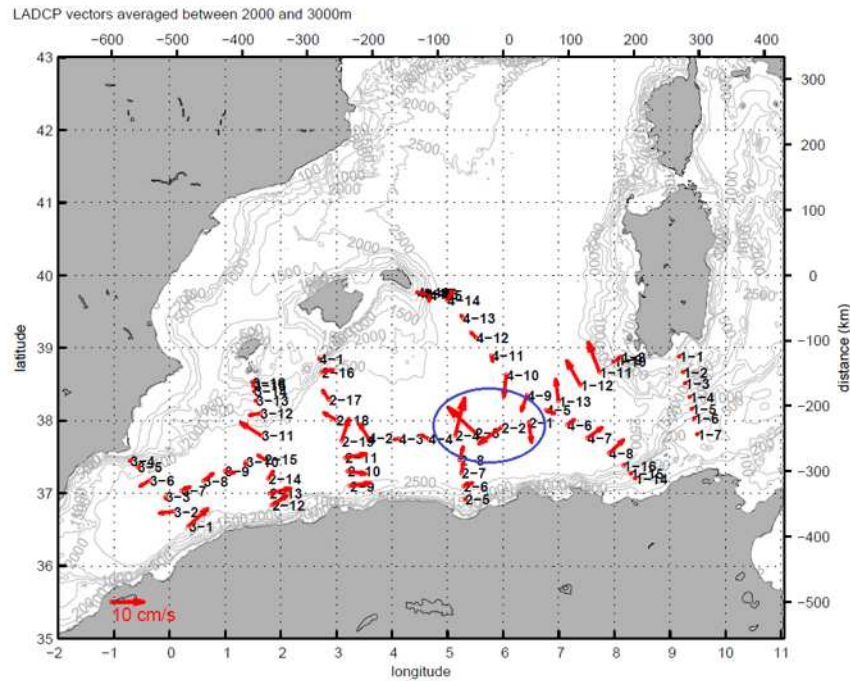


FIGURE 3.9: Carte de courant mesuré par le L-ADCP moyenné sur le colonne d'eau dont la profondeur  $\geq 2000$  m. Le cercle bleu entoure les quatres stations qui ont été faites dans le tourbillon

## 3.2 Gyres Algérien

Les trois sections est-ouest de température et salinité montrent une délimitation hydrologique correspondant approximativement à la limite entre les deux gyres: le gyre Est contient des LIW “récentes” avec des caractéristiques de cette masse d’eau encore très marquées, plus chaudes et plus salées que les eaux environnantes comme nous pouvons le voir sur les figures 3.10, 3.11 et 3.12, où la ligne rouge représente un repère que nous avons choisi pour montrer la délimitation des deux gyres suggérés par l’hydrologie. Ces caractéristiques des LIW dans le gyre Est paraissent proches de celles des LIW de la veine de courant contournant la Sardaigne par le sud.

En traçant les profils de température potentielle et salinité (figure 3.13) de ces trois sections, nous avons remarqué la forme en escalier de certains d’entre eux. Notons que les profils se trouvant à droite et à gauche du repère choisi pour délimiter les deux gyres ont des couleurs différentes. Il est clair que les profils se trouvant dans le gyre Est sont ceux qui présentent cette forme en escalier témoignant du phénomène particulier de **double diffusion**.

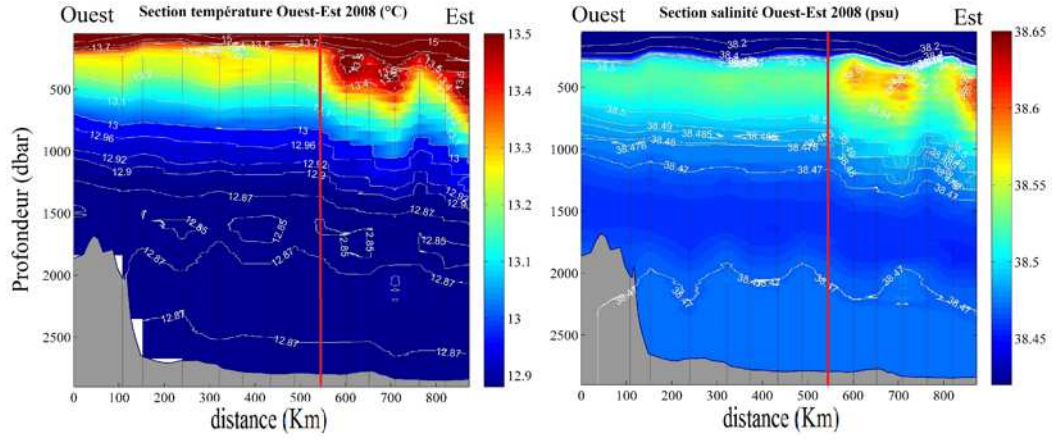


FIGURE 3.10: Section de température potentielle (à droite) et de salinité (à gauche) ouest-est 2008. Le trait rouge représente l'emplacement de la longitude 3.5 °E (le repère choisi pour délimiter les deux gyres)

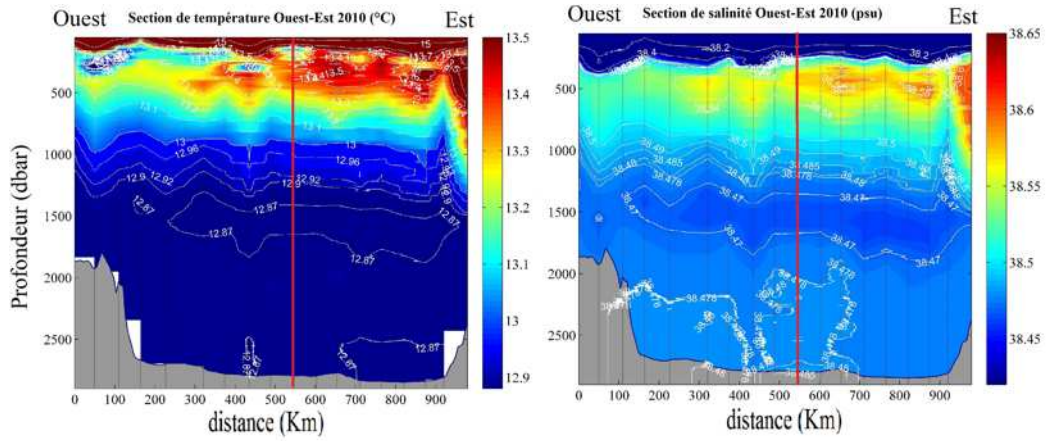


FIGURE 3.11: Section de température potentielle (à droite) et de salinité (à gauche) ouest-est 2010. Le trait rouge représente l'emplacement de la longitude 3.5 °E (le repère choisi pour délimiter les deux gyres)

La double diffusion est un mouvement de mélange convectif induit par une différence de magnitude du coefficient de diffusion moléculaire de la chaleur  $k_T$  et du sel  $k_S$  tel que  $k_T \sim 100 k_S$ . Pour que la double diffusion ait lieu, le ratio de densité noté  $R_\rho$  doit être compris entre 0 et  $\frac{k_T}{k_S}$ .

$$R_\rho = \frac{\alpha T_z}{\beta S_z} \quad (3.2)$$

$T_z$  et  $S_z$  sont les gradients verticaux de température potentielle et salinité respectivement.  $\alpha = \rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial T}$  et  $\beta = \rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial S}$  sont les coefficients d'expansion thermique et saline (Onken and Brambilla, 2003).

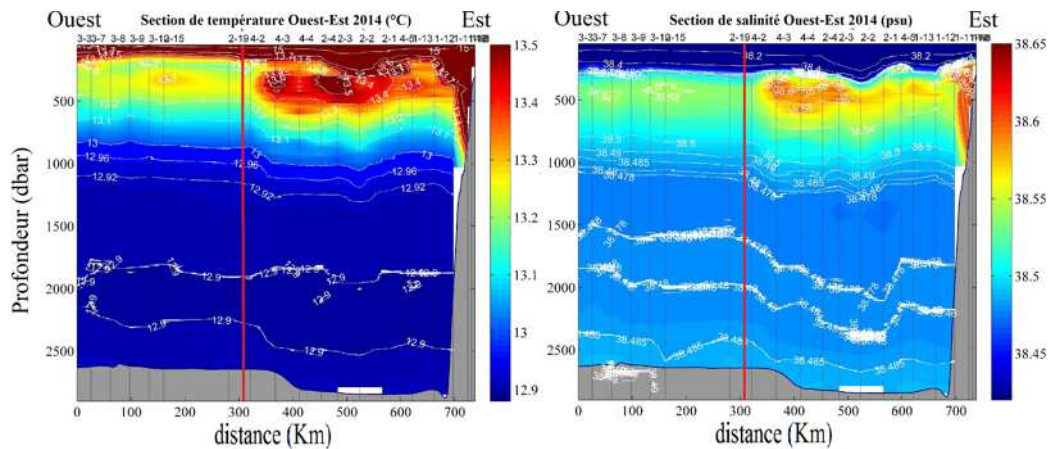


FIGURE 3.12: Section de température potentielle (à droite) et de salinité (à gauche) ouest-est 2014. Le trait rouge représente l'emplacement de la longitude 3.5 °E (le repère choisi pour délimiter les deux gyres)

Sur la figure 3.14, nous voyons clairement se dessiner les gyres à travers les vecteurs représentant le courant, et la bonne concordance avec la trajectoire des flotteurs mis à part au niveau de quelques stations, où il est clair que c'est le tourbillon décrit précédemment, qui influence la circulation profonde. Il est important de rappeler que la trajectoire représentée correspond à plusieurs années de dérive (2013-2015) tandis que les données de courant de la campagne SOMBA-GE2014 sont quasi-synoptiques, et il est donc normal de ne pas avoir une concordance parfaite, les trajectoires ayant pour but de montrer où sont les gyres en moyenne. Les vitesses enregistrées par le L-ADCP à la périphérie des gyres sont de l'ordre de  $5 \pm 2$  cm/s.

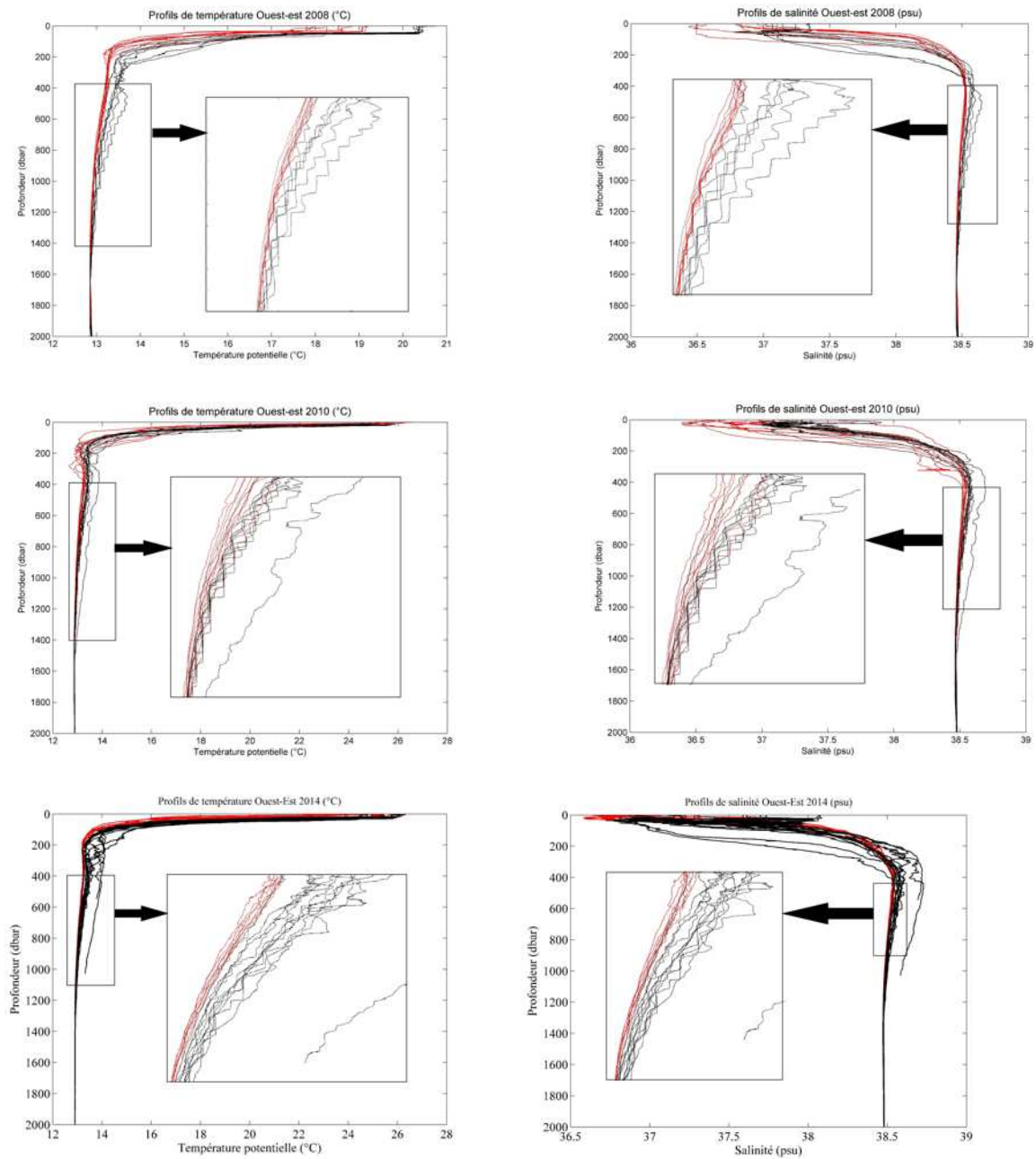


FIGURE 3.13: Profils de température potentielle (à droite) et de salinité (à gauche) le long de la section est-ouest en 2008, 2010 et 2014. Les profils en noir se trouvent dans le gyre Est, ceux en rouge dans le gyre Ouest

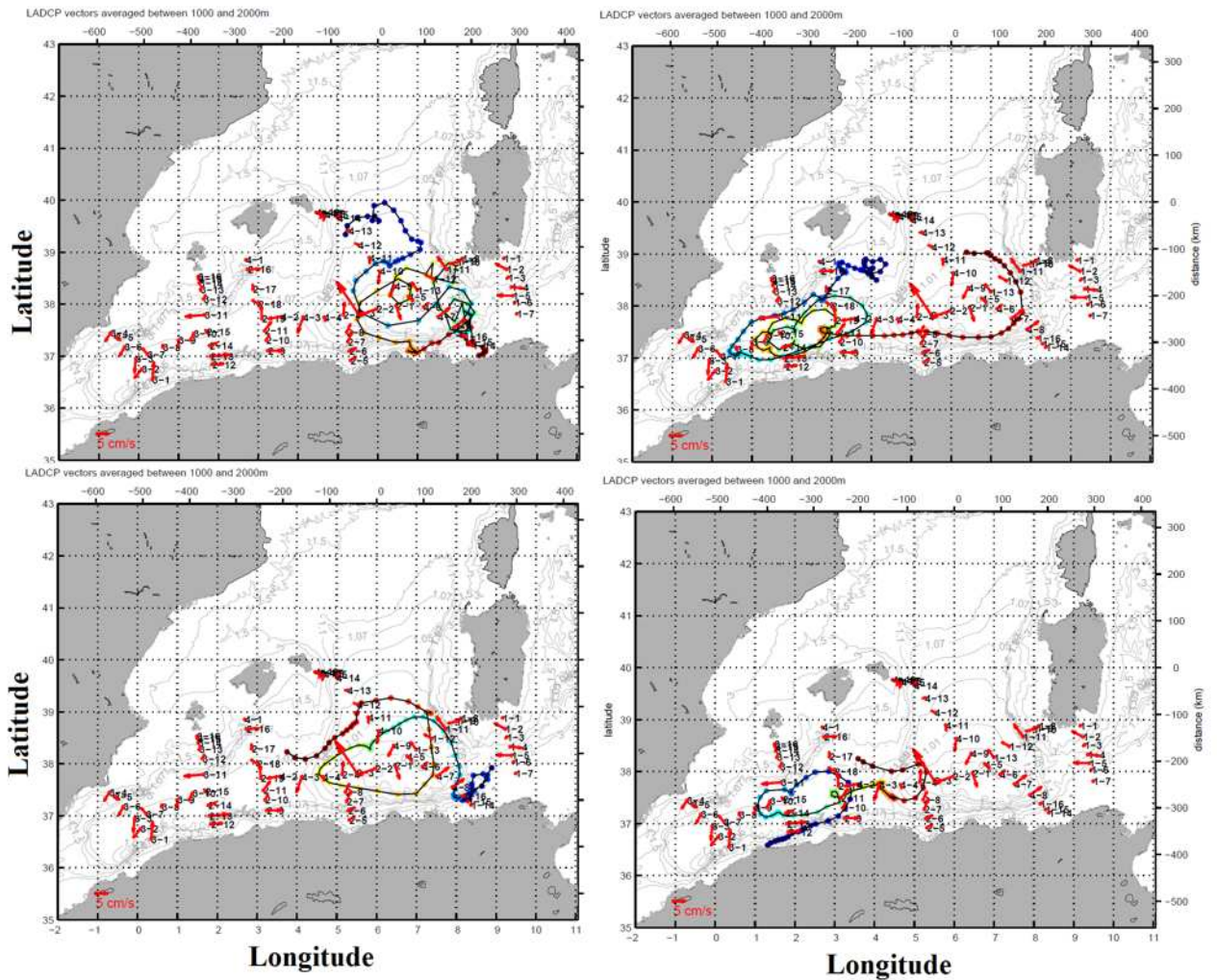


FIGURE 3.14: Vecteurs de courant mesurés par la L-ADCP moyenné entre 1000 et 2000 m représentés sur une carte avec la trajectoire de profilers Argo dérivants à des profondeurs allant de 700 à 1000 m, la couleur des positions du flotteur étant fonction de la date (bleu la plus ancienne, rouge la plus récente). Les contours gris représentent les lignes d'iso  $f/H$  ( $f$  étant la vorticité planétaire,  $H$  la hauteur d'eau) normalisé par  $f_0$  à  $37^\circ 45' N$ ,  $H_0 = 2800m$

### **3.3 Évolution des caractéristiques des masses d'eau du bassin**

#### **Algérien:**

L'irrégularité de la distribution des données de la base constituée, engendrée par l'influence du cycle saisonnier, la variabilité mésoéchelle et submésoéchelle sur les caractéristiques des eaux, ne nous permet pas de dégager des tendances claires de l'évolution des caractéristiques des eaux de surface et intermédiaires. Cependant dans les eaux plus profondes, où l'influence de cette variabilité est moins ressentie, les tendances à long terme des eaux du bassin peuvent être mises en évidence.

#### **3.3.1 Température potentielle:**

##### **3.3.1.1 Eaux intermédiaires (entre 200 et 500 m):**

Tel que précisé précédemment, la représentation des données dans les eaux intermédiaires n'a pas été très concluante car le nuage de point ne montre pas de forme particulière dans la plupart des cas. Quelques figures montrent cependant une tendance au réchauffement (figures A.3 et A.4 en annexe A); notamment au niveau de la partie ouest du bassin Algérien de l'ordre de  $0.005\text{ }^{\circ}\text{C/an}$ .

##### **3.3.1.2 Eaux profondes (entre 1000 et 2000 m):**

A cette profondeur, nous avons eu des résultats plus satisfaisants, avec dans tous les polygones considérés, un nuage de point de forme allongée permettant de faire une régression linéaire. La pente des courbes traduit une tendance au réchauffement constante allant de  $0.0036$  à  $0.0069\text{ }^{\circ}\text{C/an}$  (voir les figures 3.15, 3.16, 3.17, 3.18).

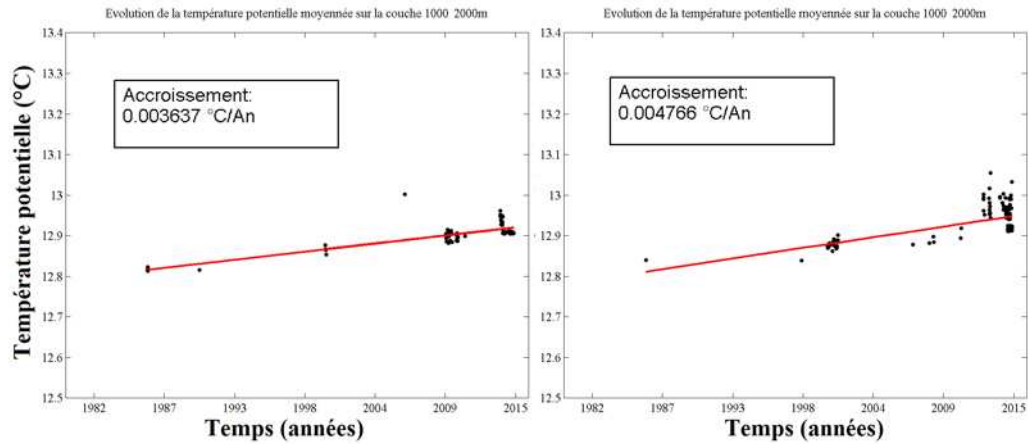


FIGURE 3.15: Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m dans les gyres Algériens (Gyre Ouest à gauche, Est à droite)

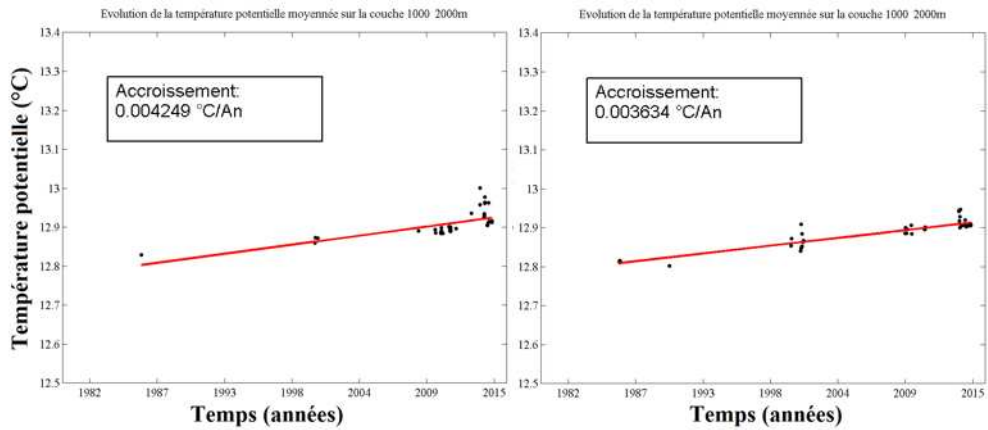


FIGURE 3.16: Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m près de la côte Algérienne (polygones 4, 5)

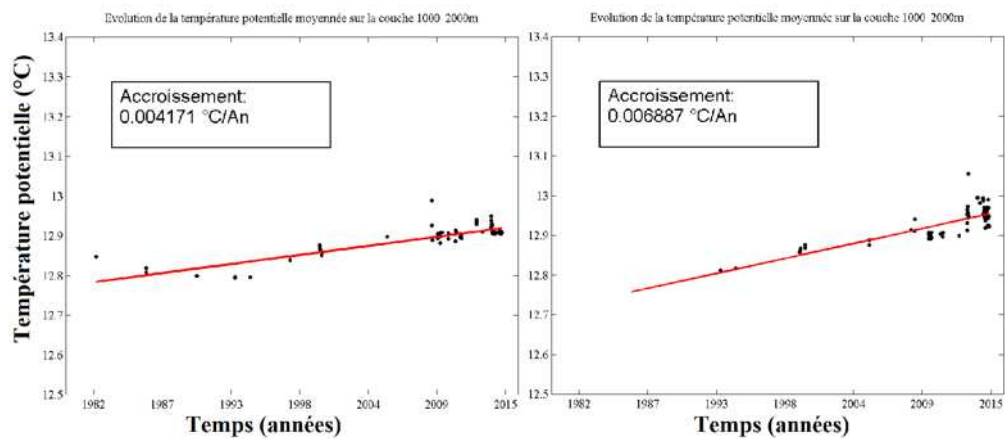


FIGURE 3.17: Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus des Baléares (polygone 6 et 7)

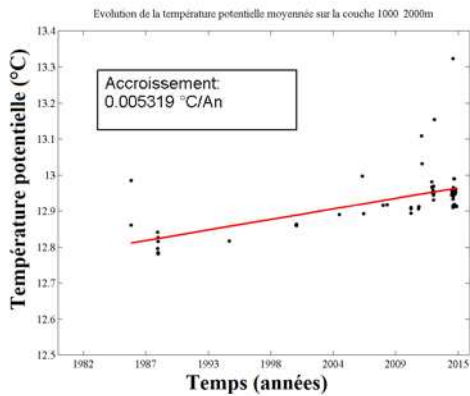


FIGURE 3.18: Évolution de la température potentielle moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus Sarde

### 3.3.1.3 Eaux de fond (> 2000m):

Pour les eaux de fond, malgré un nombre de points réduits pour faire notre régression, nous avons tout de même des résultats très satisfaisants. Les eaux de fond se réchauffent, selon notre régression, de 0.0047 à 0.0067 °C/an.

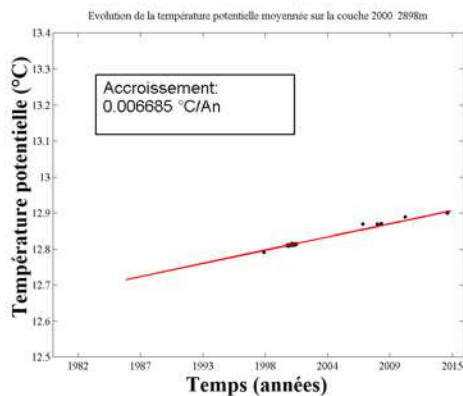


FIGURE 3.19: Évolution de la température potentielle moyennée entre 2000 et 2898 m au niveau du gyre Algérien Est

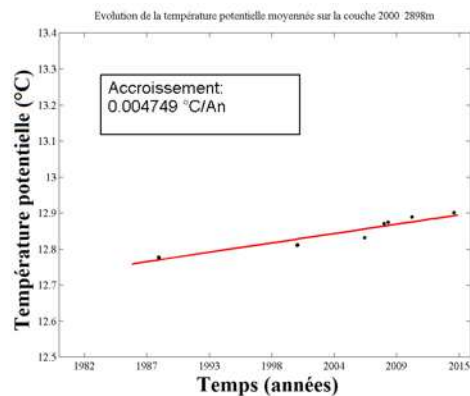


FIGURE 3.20: Évolution de la température potentielle moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus Sarde

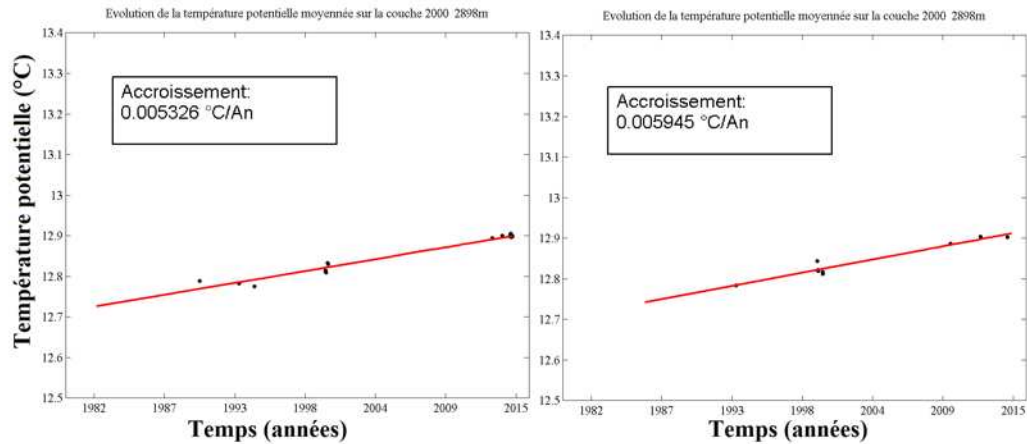


FIGURE 3.21: Évolution de la température potentielle moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus des Baléares (polygone 6 et 7)

### 3.3.2 Salinité:

#### 3.3.2.1 Eaux intermédiaires (entre 200 et 500 m):

Nous avons représenté également l'évolution de la salinité dans les eaux intermédiaires dans les mêmes polygones qui présentaient une tendance au réchauffement, et, malgré une régression linéaire moins bonne, la tendance est nettement à l'augmentation de la salinité 0.0031 psu/an à l'ouest de la côte Algérienne (données en jaune sur la figure 2.3), et de 0.0046 psu/an dans le gyre Ouest (données en magenta sur la figure 2.3).

#### 3.3.2.2 Eaux profondes (entre 1000 et 2000 m):

Toutes les régressions linéaires montrent une pente positive allant de 0.0007 à 0.0020 psu/an.

#### 3.3.2.3 Eaux de fond (> 2000 m):

Pour les eaux profondes, là où les données nous ont permis de le faire, les courbes présentent une augmentation de la salinité allant de 0.0003 à 0.0026 psu/an.

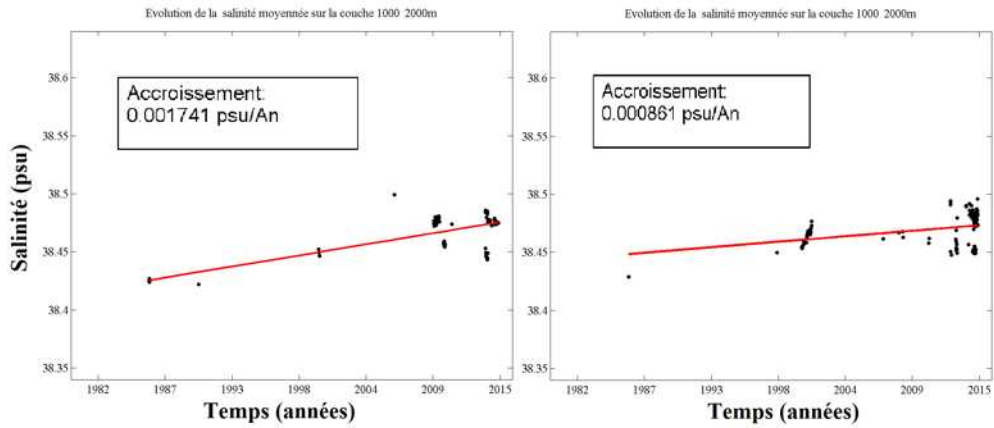


FIGURE 3.22: Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m dans les gyres Algériens (Ouest à gauche, Est à droite)

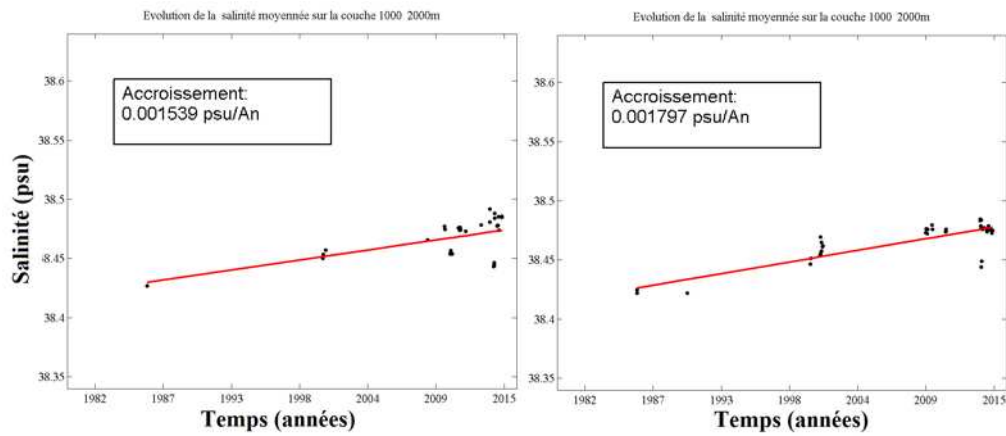


FIGURE 3.23: Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m près de la côte Algérienne (polygones 4 et 5)

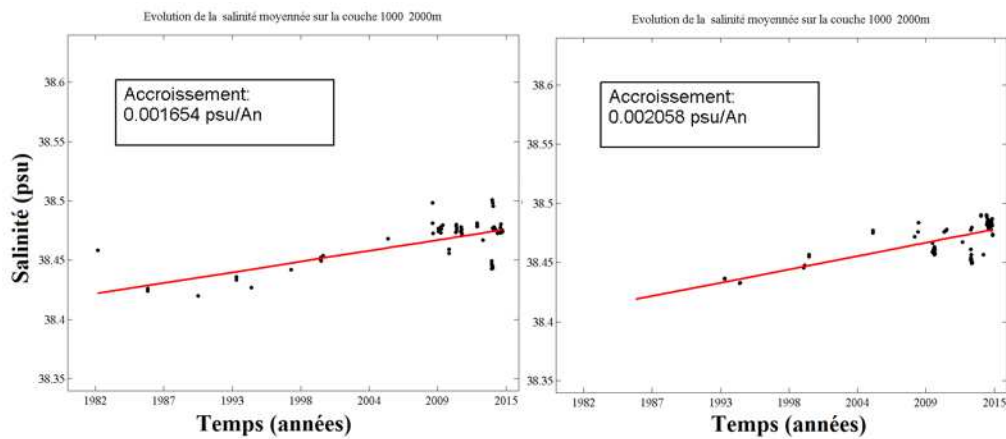


FIGURE 3.24: Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus des Baléares (polygone 6 et 7)

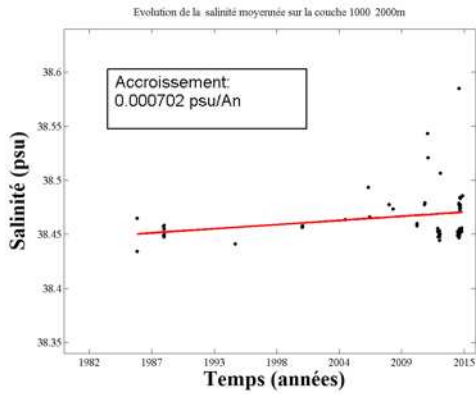


FIGURE 3.25: Évolution de la salinité moyennée entre 1000 et 2000 m sur le talus Sarde

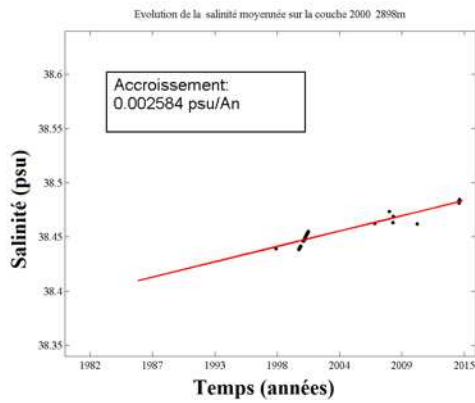


FIGURE 3.26: Évolution de la salinité moyennée entre 2000 et 2898 m au niveau du gyre Algérien Est

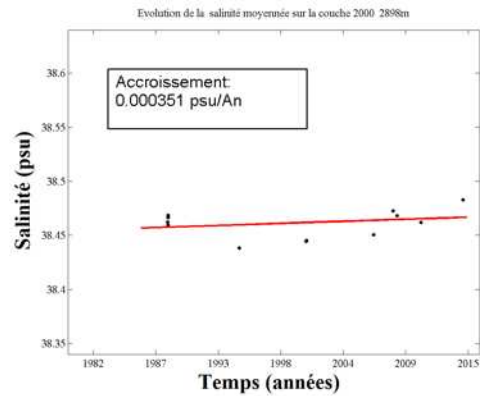


FIGURE 3.27: Évolution de la salinité moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus Sarde

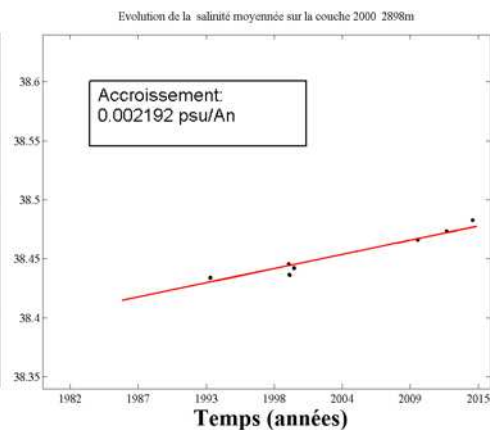
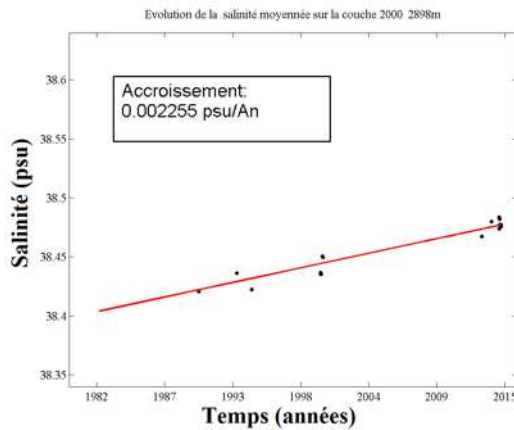


FIGURE 3.28: Évolution de la salinité moyennée entre 2000 et 2898 m sur le talus des Baléares (polygone 6 et 7)

# **Chapitre 4**

## **Discussion**

## 4.1 Tourbillon Algérien:

Les tourbillons Algériens, ont été d'abord observés principalement en surface à partir d'images infrarouges, ce n'est que plus tard que quelques campagnes océanographiques ont permis d'échantillonner ces derniers verticalement.

[Benzohra and Millot \(1995b\)](#) ont étudié les caractéristiques d'un tourbillon Algérien anticyclonique échantillonné durant Mai-Juin 1986 lors de la campagne océanographique MEDIPROD-5 au moyen de stations espacées d'environ 10 Km, les profils collectés allant jusqu'à 800 dbar. Les données hydrologiques alors récoltées ont permis d'identifier les quatre masses d'eau principales présentes dans le bassin Algérien, celles-ci étant la MAW, LIW, WIW et la WMDW avec des caractéristiques plus ou moins hétérogènes. Les sections de densité ont révélé un enfoncement des isopycnes en dessous de 50 m, ceci étant une caractéristique des tourbillons anticycloniques. Le rayon du tourbillon est de 120 - 140 km, et les vitesses horizontales de 25-30 cm/s.

Ce n'est qu'en Mai 1998 durant la campagne océanographique MATER qu'un tourbillon anticyclonique a été échantillonné sur toute la colonne d'eau. [Ruiz et al. \(2002\)](#) ont déduit en comparant les caractéristiques de la MAW se trouvant dans le tourbillon à celles de la MAW du AC (Algerian Current), qu'il s'agissait bien d'un tourbillon Algérien s'étant détaché du courant principal et ayant dérivé dans le bassin. Les vitesses maximales mesurées sont de 50 cm/s, le diamètre du tourbillon d'environ 80 km. La différence entre le courant mesuré et le courant géostrophique calculé étant de quelques cm/s, ils ont suggéré une absence de mouvement agéostrophique significatif.

Le tourbillon Algérien échantillonné lors de SOMBA-GE2014 est caractérisé par des vitesses horizontales d'environ 60 cm/s en surface, un diamètre d'environ 130 km et des périodes de retournement de 8 jours. L'estimation du nombre adimensionnel de Rossby ( $R_o$ ) qui représente le rapport entre les forces d'inertie (force de Coriolis) et l'accélération de la vitesse du tourbillon étant  $R_o \simeq 0.051$  suggère que la composante géostrophique est prédominante dans la vitesse du tourbillon.

## 4.2 Gyres Algériens:

Les sections de température potentielle et de salinité le long de la radiale est-ouest semblent montrer une délimitation hydrologique entre les deux gyres, le gyre Est piégeant des eaux Levantines plus récentes. La théorie que l'on peut proposer est que ces eaux sont probablement arrachées par des tourbillons à la veine de LIW qui contourne la Sardaigne. Ces tourbillons relâcheraient ensuite leurs eaux à l'intérieur du gyre. Le transport zonal de ces eaux vers le gyre Ouest ne semble pas effectif car dans ce dernier les LIW ont des caractéristiques qui se sont atténuées, ce qui laisse supposer qu'elles ont subi plus de mélange avec les eaux environnantes. Selon [Testor et al. \(2005\)](#), les vitesses orbitales des gyres Algériens seraient de l'ordre de 5 cm/s, ce qui est en bonne adéquation avec nos résultats bien que l'étude précédente soit basée sur des expériences menées de 1997 à 2002 avec des mesures purement lagrangiennes.

L'un des flotteurs profileurs capturé dans les gyres a une trajectoire variable selon la saison. Bien que nous ne puissions pas tirer de conclusion de la trajectoire d'un seul flotteur, il serait tentant de voir un rapport entre la variation de taille de cette trajectoire et celle du diamètre des gyres, qui serait lié à la variabilité du forçage (par exemple un courant de bord plus intense en hiver ([Millot, 1999](#))) ce que les données disponibles en trop petit nombre ne permettent pas de montrer.

## 4.3 Réchauffement et augmentation de la salinité des eaux du Bassin:

Toutes les études menées dans la Méditerranée occidentale et qui s'intéressent à l'évolution des caractéristiques des masses d'eaux, se rejoignent sur le fait que les eaux se réchauffent et deviennent plus salées hormis certains événements considérés comme singuliers notamment le fort refroidissement enregistré à la fin des années 70, et début des années 80 ([Brankart and Pinardi, 2001](#)). Les valeurs des tendances révélées par ces études sont très variables selon la période considérée et la méthode d'analyse de données adoptée, et ce, principalement à cause d'une irrégularité de collecte de données ([Vargaz-Yáñez et al., 2009](#)).

### 4.3.1 Eaux intermédiaires:

En se basant sur le calcul de bilans de chaleur et de volume, [Béthoux et al. \(1990\)](#) ont estimé qu'il y a eu une augmentation de la température potentielle de 0.005 °C/an (1959 et 1989). Les études ultérieures ont montré des taux de réchauffement plus élevés: 0.0091 °C/an ainsi qu'une augmentation de la salinité de 0.0019 psu/an ([Sparnocchia et al., 1994](#)) au niveau de la Mer ligurienne (1950-1987), 0.0068 °C/an et 0.0018 psu/an ([Béthoux and Gentili, 1996, 1999](#)). Bien que ces études de référence concernent pour la plupart le bassin Algéro-Provençal et pas le bassin Algérien, les taux de réchauffement et d'augmentation de salinité sont dans le même ordre de grandeur.

### 4.3.2 Eaux profondes:

La tendance au réchauffement et à l'augmentation de la salinité révélée lors de notre étude a déjà été rapportée par les auteurs ayant travaillé sur les eaux Méditerranéennes, avec des valeurs allant de 0.0039 °C/an et de 0.00097 psu/an respectivement selon [Béthoux et al. \(1990\)](#), 0.0036 °C/an et 0.0011 psu/an selon [Béthoux and Gentili \(1996\)](#), 0.0035 °C/an et 0.0011 selon [Béthoux et al. \(1998\)](#); [Béthoux and Gentili \(1999\)](#). Quant à [Rixen et al. \(2005\)](#), il conclut à une augmentation de la température potentielle et de la salinité quasi constante de 1950 à 1985, avec une importante accélération de 1985 à 2000, pour arriver à des valeurs de 0.0055 °C/an et 0.0012 psu/an. Ayant travaillé sur la partie ouest du bassin Algéro-Provençal, [Vargaz-Yáñez et al. \(2009\)](#) ont estimé le réchauffement à environ 0.22 °C de 1948 à 2000, et l'augmentation de la salinité à 0.06 psu en moyenne, ce qui donne respectivement de taux de 0.0042 °C/an et 0.0011 psu/an, dont nos résultats sont les plus proches.

L'analyse de [Schroeder et al. \(2008\)](#) a montré qu'entre 2004 et 2006, il y a eu un réchauffement brutal des eaux profondes, d'environ 0.038 °C et une augmentation de la salinité d'environ 0.016 psu, ce qui est de 5 à 7 fois plus important que les taux indiqués par [Béthoux and Gentili \(1999\)](#), et 4 fois plus grands que les taux estimés par [Rixen et al. \(2005\)](#) pour la période 1985-2000. Bien que cet événement n'apparaisse pas sur nos figures, les diagrammes  $\theta$ -S de la campagne SOMBA-GE2014, ont la forme induite par ce changement brutal, avec un angle caractéristique à l'extrémité du diagramme (voir figure 4.1).

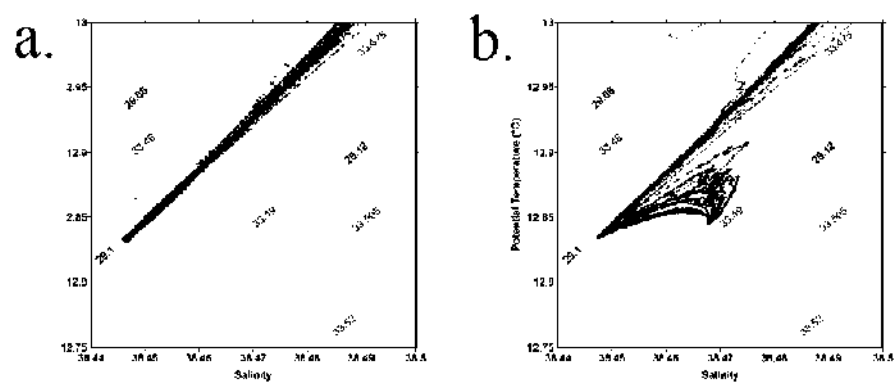


FIGURE 4.1: Forme de la WMDW sur des diagrammes  $\theta$ -S faits au même endroit à des temps différent. a: en octobre 2004, b: en octobre 2006 (Schroeder et al., 2008)

## **Chapitre 5**

## **Conclusions**

L'objectif de mon stage était de m'approprier et d'explorer les données hydrologiques et de courant de la première campagne océanographique SOMBA-GE2014 ainsi que les données historiques ou connexes pour une analyse de la capacité du futur réseau SOMBA à restituer les grands traits de la circulation et de l'hydrologie du Bassin Algérien décrit dans la littérature, surtout d'un point de vue qualitatif.

Notre étude a permis de caractériser le courant Algérien durant la campagne (environ 100 m de profondeur, et 100 km de de largeur), de détecter un tourbillon anticyclonique de type AE ayant une influence sur toute la colonne d'eau, avec des vitesses orbitales allant jusqu'à 60 cm/s en surface et environ 10 cm/s près du fond, un diamètre d'environ 130 km et une période de retournement de 8 jours. Les données de la campagne nous ont également permis d'observer la présence de WMDW relativement chaudes et salées tapissant tout le bassin que nous avons relié à l'évènement cité par [Schroeder et al. \(2008\)](#).

L'ensemble des données dont nous disposons nous a permis de dégager les tendances évolutives des eaux du bassin Algérien, elles se réchauffent de  $\sim 0.0036 - 0.0069$  °C/an, et leur salinité augmente de  $\sim 0.0007 - 0.0020$  psu/an entre 1000 et 2000 m, les eaux de fond ( $> 2000$  m) montrent une augmentation de la température de  $\sim 0.0047 - 0.0067$  °C/an, et de salinité de  $\sim 0.0003 - 0.0026$  psu/an.

Les échanges que nous avons eu avec l' ISMAR/CNR (Conziglio Nazionale delle Ricerche) nous ont permis d'enrichir la base de données du LOCEAN et de mettre en évidence grâce aux grandes radiales Est-Ouest des années 2008 et 2010 qu'ils nous ont fourni (en plus de celle faite en 2014 durant SOMBA), la signature hydrologique des gyres Algériens, qui réalisent une nette séparation entre les LIW présentes dans le gyre Est et celles du gyre Ouest. Nous pourrions expliquer cette différence par le fait que les LIW nouvellement entrées en Méditerranée occidentale (encore chaudes et salées) seraient transportées vers le gyre Est où elles resteraient confinées et engendrent de la double diffusion dans ce dernier, à l'opposé, les eaux intermédiaires du gyre Ouest viendraient de LIW plus vieilles ayant recirculé dans le

## *Bibliographie*

---

bassin Occidental. L'étude des caractéristiques fines des masses d'eau des gyres, la variabilité de ces caractéristiques, des forçages dynamiques de ces gyres et leurs interactions avec les tourbillons Algériens, pourrait constituer une suite intéressante à notre travail dont les implications pour l'étude des cycles biogéochimiques et de la productivité primaire de cette région sont majeures.

# Bibliographie

- Benzohra, M. and Millot, C. (1995a). Characteristics and circulation of the surface and intermediate water masses off Algeria. *Deep-Sea Research*, 42(10):1803–1830.
- Benzohra, M. and Millot, C. (1995b). Hydrodynamics of an open sea Algerian eddy. *Deep-Sea Research*, 42(10):1831–1847.
- Brankart, J.-M. and Pinardi, N. (2001). Abrupt cooling of the Mediterranean Levantine Intermediate Water at the beginning of the 1980s: Observational evidence and model simulation. *Journal of Physical Oceanography*, 31(8):2307–2320.
- Béthoux, J. P. and Gentili, B. (1996). The Mediterranean Sea, coastal and deep-sea signatures of climatic and environmental changes. *Journal of Marine Systems*, 7:383–394.
- Béthoux, J. P. and Gentili, B. (1999). Functioning of the Mediterranean sea: past and present changes related to freshwater input and climate changes. *Journal of Marine Systems*, 20:33–47.
- Béthoux, J. P., Gentili, B., Raunet, J., and Tailliez, D. (1990). Warming trend in the western Mediterranean Deep Water. *Nature*, 347:660 – 662.
- Béthoux, J. P., Gentili, B., and Tailliez, D. (1998). Warming and freshwater budget change in the Mediterranean since the 1940s, their possible relation to the greenhouse effect. *Geophysical Research Letters*, 25(7):1023–1026.
- Gascard, J.-C. and Richez, C. (1985). Water masses circulation in the western Alboran Sea and in the strait of Gibraltar. *Progress in Oceanography*, 15:157–216.

- Houpert, L., Testor, P., Durrieu de Madron, X., Somot, S., D'Ortenzio, F., Estournel, C., and Lavigne, H. (2015). Seasonal cycle of the mixed layer, the seasonal thermocline and the upper-ocean heat storage rate in the Mediterranean sea derived from observations. *Progress in Oceanography*, 132:333–352.
- Marshall, J. and Schott, F. (1999). Open-ocean convection: observations, theory, and models. *Review of Geophysics*, 37(1):1–64.
- Millot, C. (1987). The circulation of the Levantine Intermediate Water in the Algerian basin. *Journal of Geophysical Research*, 92(C8):8265–8276.
- Millot, C. (1999). Circulation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, 20:423–442.
- Millot, C. (2013). Levantine Intermediate Water characteristics: an astounding general misunderstanding! *Scientia Marina*.
- Millot, C. and Taupier-Letage, I. (2005). Additional evidence of LIW entrainment across the Algerian subbasin by mesoscale eddies and not by a permanent westward flow. *Progress in Oceanography*, 66:231–250.
- Onken, R. and Brambilla, E. (2003). Double diffusion in the Mediterranean Sea: Observation and parameterization of salt finger convection. *Journal of Geophysical Research*, 108(C9).
- Rixen, M., Beckers, J.-M., Levitus, S., Antonov, J., Boyer, T., Maillard, C., Fichaut, M., Balopoulos, E., Iona, S., Dooley, H., Garcia, M.-J., Manca, B., Giorgetti, A., Manzella, G., Mikhailov, N., Pinardi, N., and Zavatarelli, M. (2005). The Western Mediterranean Deep Water: A proxy for climate change. *Geophysical Research Letters*, 32(L12608).
- Ruiz, S., Font, J., Emelianov, M., Isern-Fontanet, J., Millot, C., Salas, J., and Taupier-Letage, I. (2002). Deep structure of an open sea eddy in the Algerian basin. *Journal of Marine Systems*, 33-34:197–195.
- Schott, F., Visbeck, M., Send, U., Fischer, J., Stramma, L., and Desaubies, Y. (1996). Observation of deep convection in the Gulf of Lions, Northern Mediterranean, during the winter 1991/92. *Journal of Physical Oceanography*, 26:505–524.

## Bibliographie

---

- Schroeder, K., Ribotti, A., Borghini, M., Sorgente, R., Perilli, A., and Gasparini, G. P. (2008). An extensive Western Mediterranean Deep Water renewal between 2004 and 2006. *Geophysical Research Letters*, 35.
- Send, U., Font, J., Krahnemann, G., Millot, C., Rhein, M., and Tintoré, J. (1999). Recent advances in observing the physical oceanography of the western Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 44:37–64.
- Sparnocchia, S., Manzella, G., and Violette, P. L. (1994). The interannual and seasonal variability of MAW and LIW core properties in the Western Mediterranean sea. in: P.E La Violette (ed.), seasonal and interannual variability of the Western Mediterranean sea. *Coastal and Estuarine Studies*, pages 177–194.
- Testor, P. (2002). *Etude Lagrangienne de circulation tourbillonnaires de submésos et mésoéchelle en Méditerranée occidentale sur la base d'observations et de simulations numériques: phénoménologie et interactions avec la circulation générale*. PhD thesis, Université Paris 6, 151.
- Testor, P., Send, U., Gascard, J., Millot, C., Taupier-Letage, I., and Béranger, K. (2005). The mean circulation of the southwestern Mediterranean Sea: Algerian Gyres. *Journal of Geophysical Research*, 110(C11):017.
- Vargaz-Yáñez, M., Moya, F., Tel, E., García-Martínez, M. C., Guerber, E., and Bourgeon, M. (2009). Warming and salting in the Western Mediterranean during the second half of the 20th century: inconsistencies, unknowns and the effect of the data processing. *Scientia Marina*, 73.
- Wüst, G. (1961). On the vertical circulation of the Mediterranean sea. *Journal of Geophysical Research*, 66(10).

# **Annexe A**

## **Figures**

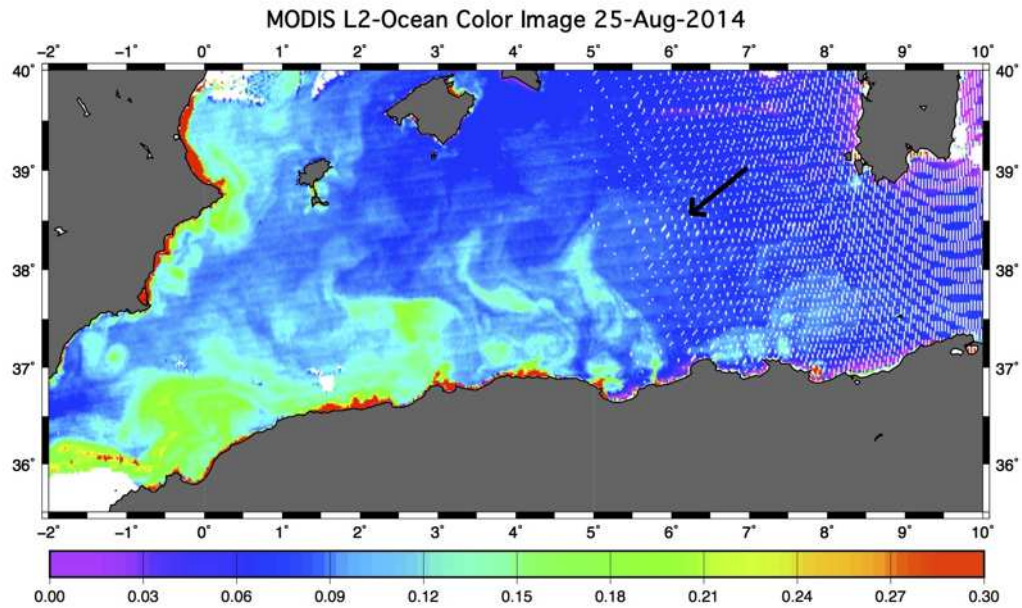


FIGURE A.1: Carte de couleur de la mer du bassin Algérien le 25 aout 2014 représentant la concentration en chlorophylle a ( $\text{mg} / \text{m}^3$ ) La flèche noire indique l'emplacement du tourbillon. (source: MODIS, mise en forme par H. le Goff)

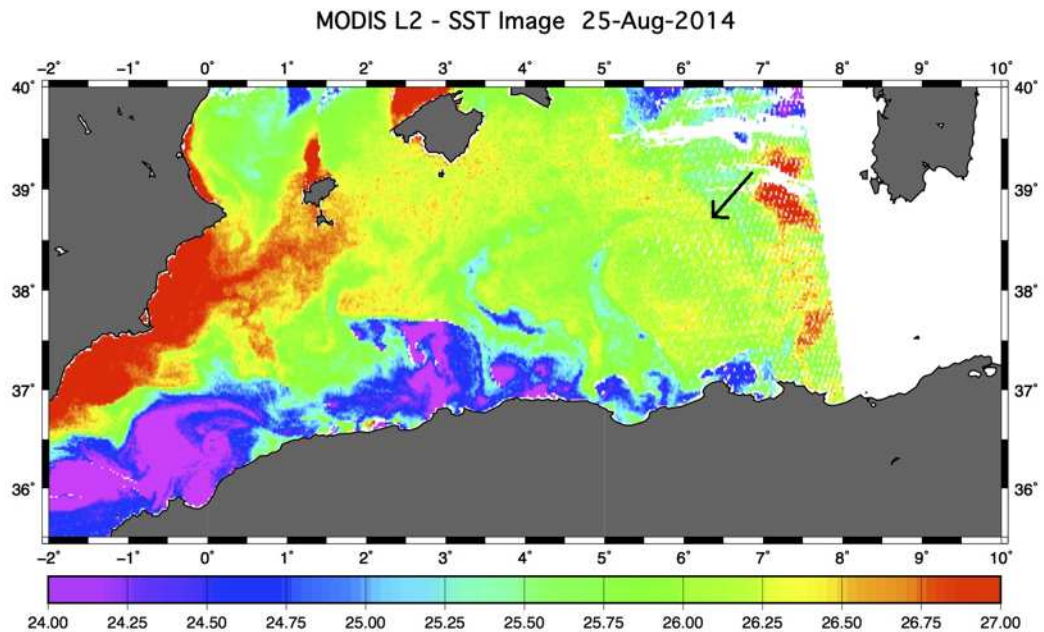


FIGURE A.2: Température de surface de la mer le 25 aout 2014 dans le bassin Algérien. L'échelle étant en °C. La flèche noire indique l'emplacement du tourbillon. (source: MODIS, mise en forme par H. le Goff)

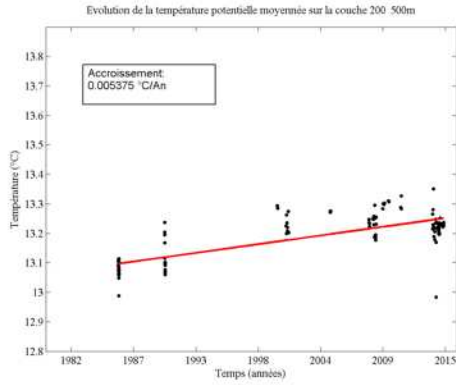


FIGURE A.3: Évolution de la température potentielle moyennée entre 200 et 500 m près de la côte Algérienne

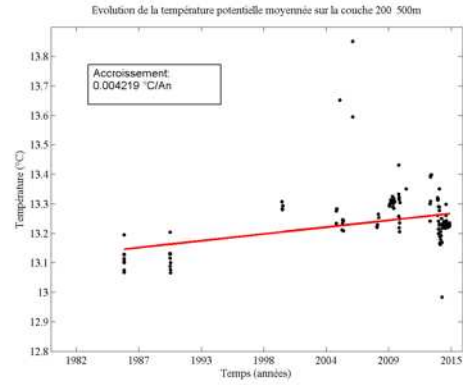


FIGURE A.4: Évolution de la température potentielle moyennée entre 200 et 500 m dans le gyre Algérien Ouest

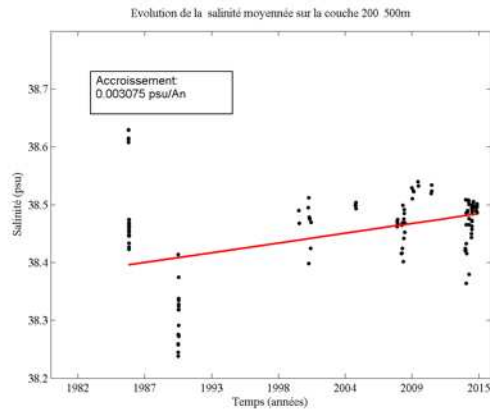


FIGURE A.5: Évolution de la salinité moyennée entre 200 et 500 m près de la côte Algérienne

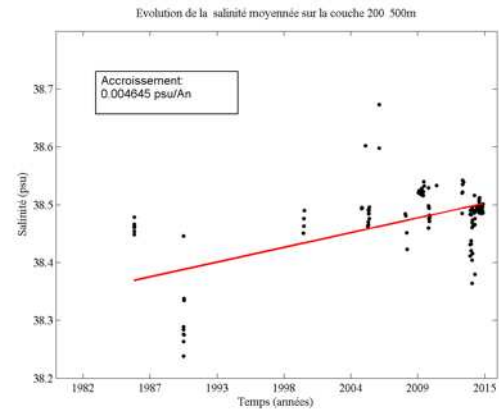


FIGURE A.6: Évolution de la salinité moyennée entre 200 et 500 m dans le gyre Algérien Ouest

## **Annexe B**

### **Description de la campagne MOOSE 2015**

Durant mon stage, j'ai travaillé avec des données provenant de sources diverses sans avoir participé à leur processus d'acquisition. Cependant, dans le cadre d'un cours du master WAPE intitulé "observation et expérimentation de l'océan" donné par Pierre Testor, j'ai eu la chance, ainsi que les camarades qui le souhaitaient, d'embarquer sur MOOSE 2015 à bord du navire océanographique le Suroit qui effectuait d'ailleurs sa dernière mission.

Cela m'a permis de connaître et de manier les instruments indispensables en océanographie, remonter à la source des données, comprendre les éventuels problèmes que l'on peut rencontrer et surtout de beaucoup échanger avec les scientifiques à bord et les marins le tout dans un agréable cadre.

Cette expérience est essentielle dans la perspective de la continuation des campagnes SOMBA-GE auxquelles je prendrai sans doute part plus tard à l'ENSSMAL.

Durant le leg 1, auquel j'ai participé, nous avons effectué 40 stations hydrologiques assurées par les différents quarts qui se relayaient, nous avons relevé, téléchargé les données, changé ou entretenu les instruments de deux lignes de mouillage importants puis remis à l'eau ces mouillages Lion et Dyfamed. Nous avons la responsabilité, Marjorie Roscian (étudiante au MIO (Mediterranean Institute of Oceanography)) et moi-même de nous occuper du filet à zooplancton (Bango). Nous avons également tous participé au travail qui se fait au laboratoire humide et sec (prélèvements, fixation, analyses)

#### **Le travail qui se fait à chaque station:**

- Préparer la rosette: vérifier que les bouteilles Niskin sont vides, les armer (ouvrir les clapets qui se trouvent à leurs extrémités), fermer les robinets, débrancher l'UVP et les L-ADCP de la source d'alimentation et remettre les capuchons de protection sur les connecteurs, enlever le capuchon qui protège le capteur d'oxygène.
- Mettre la rosette à l'eau, vérifier que toutes les bouteilles sont ouvertes puis donner le signal à la personne au treuil de commencer la descente.

- Noter l'heure et les coordonnées puis réaliser une procédure de rinçage nécessaire pour enclencher l'UVP: faire descendre (filer) la rosette à 5 m de profondeur, faire un palier de 60", puis filer à 20 m, stopper et remonter en surface. Vérifier que l'UVP est en marche (flash rouge).
- Commencer la descente de la rosette à une vitesse de 1 m/s, noter les profondeurs auxquelles les bouteilles vont être claquées (maximum de chlorophylle, salinité, oxygène ...etc., selon les prélèvements qui sont prévus), noter les éventuelles remarques. Stopper la rosette à environ 10 m au dessus du fond et noter l'heure et les nouvelles coordonnées (il y a toujours une différence due à la dérive du bateau).
- Remonter la rosette avec la même vitesse de descente, ralentir avant chaque palier puis s'arrêter, claquer les bouteilles dans l'ordre (1 la plus profonde, ensuite 2 ..) jusqu'à arriver en surface, noter de nouveau l'heure et les coordonnées puis ramener la rosette à bord.
- Faire les prélèvements au laboratoire humide selon l'ordre de priorité en suivant un protocole précis, emmener les échantillons au laboratoire sec où ils seront analysés, et les résultats notés, ou bien fixés et rangés en attendant de débarquer si l'analyse n'est pas possible à bord.

**Filet à zooplancton:** Nous avons utilisé deux filets Bango de mailles différentes 120 et 180  $\mu\text{m}$  montés sur un cerclage attaché au treuil. Le prélèvement se fait en station.

- Déplier les filets et vérifier qu'ils sont en bon état, virer le câble auquel ils sont attaché pour les mettre en position verticale, les mettre à l'eau en veillant à ce qu'ils ne soient pas entortillés, et filer (faire descendre) à 0.5 m/s jusqu'à une profondeur de 200 m.
- Remonter les filets avec la même vitesse jusqu'à les ramener hors de l'eau, les maintenir en position verticale et les rincer à l'eau de mer de l'extérieur vers l'intérieur afin de récupérer dans le collecteur (pièce en plastique se trouvant à l'extrémité du filet) les organismes qui seraient restés collés sur le filet.

- Détacher le collecteur, et récupérer les organismes sur un tamis en rinçant de l'extérieur vers l'intérieur à l'eau de mer.
- Récupérer le zooplancton dans des flacons en plastique à l'aide d'une pissette contenant une solution tampon (c'est généralement de l'eau de mer très pauvre).
- Fixer les organismes en rajoutant le volume adéquat de formol, compléter avec du tampon jusqu'à avoir le volume cité dans le protocole, fermer les flacons avec des bouchons hermétiques pour éviter l'évaporation puis les conserver en attendant leur analyse.