

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر و تهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MEMOIRE DE POST-GRADUATION EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MAGISTER

OPTION : ENVIRONNEMENT DE L'HYDROSPHERE

Thème :

**Contribution à l'étude du cycle biogéochimique des sels nutritifs au
niveau du bassin Algérien (données SOMBA-GE 2014)**

Présenté par:

BENHALIMA Moustafa

Soutenu le 16/10/2016 à 13H devant le jury :

Mr SEMROUD R.	Professeur (ENSSMAL)	Président
Mr REFES W.	MCA (ENSSMAL)	Examineur
Mme CHERNAI S.	MCA (ENSSMAL)	Examinatrice
Mr BOULAHIDID M.	Professeur (ENSSMAL)	Directeur
Mme LOUANCHI F.	Professeur (ENSSMAL)	Co-directrice
Mme ILLOUL H.	MCA (ENSSMAL)	Invitée

Remerciements

Je suis très heureux de pouvoir exprimer ma gratitude à toute les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Mes plus vifs remerciements s'adressent à :

Mr Boulahdid M., Professeur à l'ENSSMAL, qui m'a encadré avec patience et m'a orienté tout au long de mon stage. Je suis profondément reconnaissant pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour l'empressement qu'il a manifesté à le voir aboutir, puisse-t-il trouver ici la marque de mon profond respect ainsi que mes remerciements les plus sincères ;

Mme LOUANCHI F., Professeur à l'ENSSMAL, pour avoir accepté de Co-encadrer ce travail.et pour ses précieux conseils ;

Mr SEMROUD R., Professeur à l'ENSSMAL, qu'il m'a fait l'honneur de présider ce jury. Qu'il trouve dans ces lignes le témoignage de mes respectueuses reconnaissances ;

Mr REFES W., Maître de conférences à l'ENSSMAL, d'avoir accepté d'examiner mon travail ;

Mme CHERNAI S., Maître de conférences à l'ENSSMAL, pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit et de participer à ce jury.

Mme ILLOUL H., Maître de conférences à l'ENSSMAL, d'avoir acceptée de participer à ce jury.

Je remercie toute les personnes qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail, et plus particulièrement Keragel, Zerrouki, Ait Kaci, Boudjelal et toute l'équipe de SOMBA.

*

Liste des figures

Figure 1: Représentation schématique du cycle océanique de l'azote et de son couplage avec les cycles de l'oxygène, du phosphore et du carbone (Gruber, 2008).	18
Figure 2: Distribution des espèces chimiques du silicium dissous en fonction du pH.	18
Figure 3: Cycle de silicium dans l'océan mondial d'après Tréguer et al (1995). Les flux ont pour unité 10^{12} g Si /an.	19
Figure 4: Cycle global des sels nutritifs : production et minéralisation de la matière organique (Jacques et Tréguer, 1986).	19
Figure 5 : Situation géographique du bassin Algérien.	24
Figure 6 : La circulation générale en mer méditerranée (Millot et al., 2005).	26
Figure 7 : Circulation des eaux de surface en Méditerranée occidentale (Millot, 1999).	28
Figure 8 : Circulation des eaux intermédiaires en Méditerranée occidentale (Millot, 1999).	29
Figure 9 : Circulation des eaux profondes en Méditerranée occidentale (Millot, 1999).	30
Figure 10: Localisation des stations de prélèvement dans le bassin Algérien pendant la campagne SOMBA-GE 2014.	33
Figure 11: Courbe d'étalonnage des nitrates.	39
Figure 12 : Courbe d'étalonnage des phosphates.	39
Figure : 13 Courbe d'étalonnage des phosphates.	39
Figure 14 : Courbe d'étalonnage des nitrates.	39
Figure 15: Localisation des stations de la campagne MEDIPROD V.	41
Figure 16: Localisation des stations de la campagne MEDIPROD VI.	42
Figure 17: Profil vertical de la température potentielle au niveau du bassin Algérien.	44
Figure 18: Section verticale de variation de la température potentielle (transect Sardaigne – mer d'Alboran).	45
Figure 19: Section verticale de variation de la température potentielle (transect Minorque – El Kala).	46
Figure 20: Distribution spatiale de la température potentielle en surface.	46
Figure 21: Distribution horizontale de la température potentielle à 50m de profondeur.	46
Figure 22: Distribution horizontale de la température potentielle à 100m de profondeur.	47
Figure 23: Distribution horizontale de la température potentielle à 200m de profondeur.	47
Figure 24: Distribution horizontale de la température potentielle à 400 m de profondeur.	47
Figure 25: Distribution horizontale de la température potentielle à 1000 m de profondeur.	48
Figure 26: Profil vertical de salinité au niveau du bassin Algérien.	48
Figure 27: Section verticale de variation de la salinité (transect Sardaigne – mer d'Alboran).	50
Figure 28: Section verticale de variation de la température (transect Minorque – El Kala).	50
Figure 29: Distribution spatiale de la salinité en surface au niveau du bassin Algérien.	50
Figure 30: Distribution spatiale de la salinité à 50m de profondeur.	51
Figure 31: Distribution spatiale de la salinité à 100m de profondeur.	51
Figure 32: Distribution spatiale de la salinité à 200m de profondeur.	51
Figure 33: Distribution spatiale de la salinité à 400m de profondeur.	52
Figure 34: Distribution spatiale de la salinité à 1000m de profondeur.	52
Figure 35: Diagramme Température-Salinité (θ -S).	53
Figure 36: Profil vertical de fluorescence au niveau du bassin Algérien.	54
Figure 37: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Sardaigne-Tunisie).	55
Figure 38: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Minorque – El Kala).	55
Figure 39: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Mallorca-Alger).	55
Figure 40: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Ibiza-Tipaza).	56

Figure 41: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Espagne-Ténès).	56
Figure 42: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Sardaigne – mer d’Alboran).	56
Figure 43: Distribution spatiale de la fluorescence à 40m de profondeur.....	57
Figure 44: Distribution spatiale de la fluorescence à 60m de profondeur.....	58
Figure 45: Distribution spatiale de la fluorescence à 80 m de profondeur.....	58
Figure 46: Profil vertical de l’oxygène dissous au niveau du bassin Algérien.....	59
Figure 47: Profil vertical de l’oxygène dissous mesuré, oxygène de saturation et l’UAO au niveau du bassin Algérien.....	59
Figure 48: Sursaturation en oxygène dissous.....	60
Figure 49: Section verticale de variation de l’oxygène dissous (transect Minorque – El Kala).	61
Figure 50: Section verticale de variation de l’oxygène dissous (transect Mallorca-Alger).	61
Figure 51: Section verticale de variation de l’oxygène dissous (transect Ibiza-Tipaza).	61
Figure 52: Section verticale de variation de l’oxygène dissous (transect Espagne-Ténès).....	62
Figure 53: Section verticale de variation de l’oxygène dissous (transect Sardaigne – mer d’Alboran).....	62
Figure 54: Profil vertical de la concentration des nitrates au niveau du bassin Algérien.....	63
Figure 55: Section verticale de variation des nitrates (transect Sardaigne-Tunisie).	65
Figure 56: Section verticale de variation des nitrates (transect Minorque-El Kala).	65
Figure 57: Section verticale de variation des nitrates (transect Mallorca-Alger).	65
Figure 58: Section verticale de variation des nitrates (transect Ibiza-Tipaza).	66
Figure 59: Section verticale de variation des nitrates (transect Espagne-Ténès).	66
Figure 60: Section verticale de variation des nitrates (transect Sardaigne-mer d’Alboran).....	66
Figure 61: Distribution spatiale des concentrations des nitrates en surface.	67
Figure 62: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 80m de profondeur.	67
Figure 63: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 100m de profondeur.	67
Figure 64: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 200m de profondeur.	68
Figure 65: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 400m de profondeur.	68
Figure 66: Profil de la concentration des phosphates au niveau du bassin Algérien.	71
Figure 67: Section verticale de variation des phosphates (transect Sardaigne-Tunisie).	71
Figure 68: Section verticale de variation des phosphates (transect Minorque-El Kala).	71
Figure 69: Section verticale de variation des phosphates (transect Mallorca-Alger).....	72
Figure 70: Section verticale de variation des phosphates (transect Ibiza-Tipaza).	72
Figure 71: Section verticale de variation des phosphates (transect Espagne-Ténès).	72
Figure 72: Section verticale de variation des phosphates (transect Sardaigne-mer d’Alboran).....	73
Figure 73: Distribution spatiale des concentrations des phosphates en surface.	73
Figure 74: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 80m de profondeur.	73
Figure 75: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 100m de profondeur.	74
Figure 76: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 200m de profondeur.	74
Figure 77: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 400m de profondeur.	74
Figure 78: Profil vertical des concentrations des silicates au niveau du bassin Algérien.	76
Figure 79: Section verticale de variation des silicates (transect Sardaigne-Tunisie).	76
Figure 80: Section verticale de variation des silicates (transect Minorque-El Kala).	77
Figure 81: Section verticale de variation des silicates (transect Mallorca-Alger).	77
Figure 82: Section verticale de variation des silicates (transect Ibiza-Tipaza).	77
Figure 83: Section verticale de variation des silicates (transect Espagne-Ténès).	78
Figure 84: Section verticale de variation des silicates (transect Sardaigne-mer d’Alboran).....	78
Figure 85: Distribution spatiale des concentrations des silicates en surface.	78

Figure 86: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 80m de profondeur.....	79
Figure 87: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 100m de profondeur.....	79
Figure 88: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 200m de profondeur.....	79
Figure 89: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 400m de profondeur.....	80
Figure 90: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 600m de profondeur.....	80
Figure 91: Distribution spatiale des concentrations des silicates au fond.....	80
Figure 92: Diagramme de corrélation de nitrate/phosphates (SOMBA-GE 2014).	82
Figure 93: Distribution du rapport N/P en fonction de la profondeur (SOMBA-GE 2014).	82
Figure 94: Diagramme de corrélation de nitrate/phosphates (Mediprod V).	83
Figure 95: Distribution du rapport N/P en fonction de la profondeur (Mediprod V).....	83
Figure 96: Diagramme de corrélation de nitrate/phosphates (Mediprod VI).	83
Figure 97: Distribution du rapport N/P en fonction de la profondeur (Mediprod VI).	84
Figure 98: Diagramme UAO-Nitrate.	84
Figure 99: Diagramme UAO-Phosphate.	85
Figure 100: Diagramme θ -S pour les trois campagnes (MEDIPRODV, MEDIPRODV, SOMBA-GE).....	86
Figure 101: Concentrations des nitrates entre 100 et 300 m de profondeur pour les différentes campagnes.	88
Figure 102: Concentrations des phosphates entre 100 et 300 m de profondeur pour les différentes campagnes.	88
Figure 103: Concentrations des silicates entre 100 et 300 m de profondeur pour les différentes campagnes.	88
Figure 104: Concentrations des nitrates entre 300 et 600 m de profondeur pour les différentes campagnes.	89
Figure 105: Concentrations des phosphates entre 300 et 600 m de profondeur pour les différentes campagnes.	89
Figure 106: Concentrations des silicates entre 300 et 600 m de profondeur pour les différentes campagnes.	89
Figure 107: Concentrations des nitrates entre 600-fond pour les différentes campagnes.	90
Figure 108: Concentrations des phosphates entre 600-fond pour les différentes campagnes.	90
Figure 109: Concentrations des silicates entre 600-fond pour les différentes campagnes.....	90

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeurs historiques pour les éléments nutritifs en $\mu\text{mol/l}$ dans la Méditerranée occidentale (Bethoux et <i>al.</i> , 1998).....	23
Tableau 2: Tableau récapitulatif du nombre de stations et d'échantillons des sels nutritifs lors de la campagne.	35
Tableau 3: Concentrations des nitrates à différentes couches le long de la colonne d'eau.	64
Tableau 4: concentrations des phosphates ($\mu\text{mol/l}$) à différentes couches le long de la colonne d'eau.....	70
Tableau 5: Concentrations des silicates à différentes couches le long de la colonne d'eau.	76
Tableau 6: différentes valeurs calculées pour le rapport N/P en mer méditerranée.....	82
Tableau 7 : Concentration des nitrates en $\mu\text{mol/l}$ à différent couches lors des trois campagnes océanographiques.....	87
Tableau 8 : Concentration des phosphates en $\mu\text{mol/l}$ à différent couches lors des trois campagnes océanographiques.....	87
Tableau 9 : Concentration des silicates en $\mu\text{mol/l}$ à différent couches lors des trois campagnes océanographiques.....	87

Liste des acronymes

BW	Bottom Water
CNRS	Centre National français de la Recherche Scientifique
CTD	Conductivity-Temperature-Depth
D.O	Densité Optique
DIC	Dioxide Inorganic Carbon
ENSSMAL	Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral
HPLC	High-performance liquid chromatography
LIW	Eau Levantine Intermédiaire
MAW	Eau Atlantique Modifiée
MERMEX	Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment
MIO	Mediterranean Institute of Oceanography
MOOSE	Mediterranean Ocean Observing System on Environment
ODV	Ocean Data View
RASMER	Réseau Algérien des Sciences de la MER
SOMBA-GE	Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien- Grande Echelle
WIW	Winter Intermediate Water
WMDW	Western Mediterranean Deep Water
UAO	Utilisation Apparent d'Oxygène

Sommaire

Introduction	12
1 Généralités	15
1.1 Nutriments minéraux dissous	15
1.1.1 Origine des sels nutritifs	15
1.1.1.1 Sources internes.....	15
1.1.1.2 Sources externes	16
1.1.2 Les différentes formes de sels nutritifs.....	16
1.1.2.1 L'azote.....	16
1.1.2.1.1 Les nitrates	16
1.1.2.1.2 Les nitrites	16
1.1.2.1.3 L'azote ammoniacal	17
1.1.2.2 Les composés phosphorés	17
1.1.2.3 La silice dissoute	18
1.1.3 Le cycle biogéochimique des sels nutritifs.....	19
1.1.3.1 La photosynthèse.....	20
1.1.3.2 La minéralisation.....	20
1.1.3.3 L'excrétion et la sécrétion	21
1.1.3.4 La nitrification.....	21
1.1.3.5 La dénitrification	21
1.2 Les sels nutritifs en mer Méditerranée.....	22
1.3 Evolution des concentrations de sels nutritifs en Méditerranée occidentale.....	22
1.4 Zone d'étude : Le bassin Algérien.....	24
1.4.1 Caractéristiques géomorphologiques.....	24
1.4.2 La circulation générale des eaux en mer Méditerranée	25
1.4.3 Principales eaux-types du bassin Algérien	26
1.4.3.1 MAW (Modified Atlantic Water)	26
1.4.3.2 WIW (Winter Intermediate Water)	26
1.4.3.3 LIW (Levantine Intermediate Water).....	26
1.4.3.4 WMDW (Western Mediterranean Deep Water)	27
1.4.3.5 BW (Bottom Water).....	27
1.4.4 Circulation des eaux du bassin Algérien	27
1.4.4.1 Eaux de surface	27

1.4.4.2	Eaux intermédiaires.....	28
1.4.4.3	Eau profonde	29
2	Matériel et Méthodes	32
2.1	La campagne SOMBA-GE 2014.....	32
2.1.1	Présentation générale de la campagne	32
2.1.2	Site d'étude et période d'observation	32
2.1.3	Objectifs de la campagne.....	34
2.1.4	Travaux réalisés	34
2.1.4.1	En mer	34
2.1.4.2	Au laboratoire : Analyse des sels nutritifs	36
2.1.4.2.1	Principe d'analyse des différents sels nutritifs.....	36
2.1.4.2.1.1	Nitrates	37
2.1.4.2.1.2	Phosphates	37
2.1.4.2.1.3	Silicates.....	38
2.1.4.2.2	Etalonnage et calcul des concentrations des sels nutritifs.....	38
2.1.4.2.3	Tests de reproductibilité	40
2.1.4.3	L'Oxygène dissous dans l'eau de mer.....	40
2.1.4.3.1	Concentration de saturation.....	40
2.1.4.3.2	Le déficit d'oxygène dissous dans les eaux profondes (UAO)	40
2.2	La campagne MEDIPROD V.....	41
2.3	La campagne MEDIPROD VI.....	41
3	Résultats et discussions	44
3.1	Etude des paramètres physicochimiques.....	44
3.1.1	Variation de la température potentielle	44
3.1.2	Variation de la salinité.....	48
3.1.3	Digamme Température Potentielle – Salinité	52
3.1.4	Variation de la concentration de chlorophylle dans le bassin Algérien	53
3.1.4.1	Profil vertical de la fluorescence.....	53
3.1.4.2	Distribution verticale de la fluorescence.....	54
3.1.4.3	Distribution horizontale de la fluorescence.....	57
3.1.5	Variation de l'oxygène dissous au niveau du bassin Algérien	58
3.1.5.1	Distribution verticale de l'oxygène dissous	60
3.2	Résultats des sels nutritifs au niveau du bassin Algérien.....	62

3.2.1	Les nitrates.....	62
3.2.2	Les phosphates.....	68
3.2.3	Les silicates	75
3.3	Analyse des rapports élémentaires.....	81
3.3.1	Digramme Nitrates/Phosphates et le rapport N/P	81
3.3.2	Digramme UAO-Nitrate	84
3.3.3	Digramme UAO-Phosphate.....	85
3.4	Comparaison entre trois campagnes (SOMBA GE 2014, MEDIPROD V, MEDIPROD VI).....	85
3.4.1	Le diagramme θ -S	85
3.4.2	Concentrations des sels nutritifs	86
3.4.2.1	Couche 100-300 m	88
3.4.2.2	Couche 300-600 m	89
3.4.2.3	Couche 600- fond	90
	Conclusion générale.....	92
	Bibliographie	
	Annexes	
	Résumé	

Introduction

Introduction

La mer Méditerranée est un bassin semi-fermé enserrée au milieu des continents. Elle reçoit d'importantes charges de nutriments, d'origine naturelle et anthropique, drainées par les cours d'eaux à travers les bassins versants qui l'entourent et véhiculées aussi par voie éolienne (Bethoux et Gentili, 1996). Malgré cette situation, la Méditerranée reste une mer oligotrophe. A toutes profondeurs, ses concentrations en nutriments sont très inférieures à celles que l'on observe dans l'océan mondial (Coste et *al.*, 1988). Cette situation, a priori surprenante, est due au régime hydrologique de cette mer. Par le détroit de Gibraltar, elle reçoit un courant d'eau superficielle atlantique déjà appauvrie en nutriments par l'activité biologique. A l'intérieure du bassin, les apports continentaux augmentent les teneurs initiales des eaux entrantes par le détroit de Gibraltar, mais les nutriments ne s'accumulent pas ; ils sont captés et précipités par les organismes marins et évacués par le contre-courant profond sortant à Gibraltar, beaucoup plus riche que l'eau superficielle entrante (Béthoux, 1981 ; Coste, 1969). Grâce à cet écrémage, les concentrations en sels nutritifs en Méditerranée restent très inférieures à celles de l'océan adjacent. Une autre caractéristique de cette mer est que le rapport N/P est voisin de 20 dans sa partie occidentale et d'environ 22 dans sa partie orientale (Moutin et *al.*, 2002), alors qu'il n'est que de 15 à 16 pour l'océan mondial (Redfield et *al.*, 1963).

Dans ce cadre, le présent mémoire s'intéresse à l'étude des variations spatiales horizontales et verticales des paramètres physicochimiques et des sels nutritifs en période estivale dans le bassin Algérien. Dans ce contexte, on a exploité les données acquises lors de la campagne océanographique pluridisciplinaire SOMBA-GE (Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien- Grande Echelle) réalisée en Aout- Septembre 2014 à bord du « Téthys II » dont l'objectif :

1/ Comprendre les cycles biogéochimiques et les budgets dans le bassin Algérien pour les principaux biocomposants (C, N, P) ; Evaluer la pénétration du carbone et le flux anthropiques air-mer d'O₂ et de CO₂ ; Etudier les changements dans la circulation et leur effet sur la distribution de l'oxygène dans les eaux souterraines, ainsi que sur la productivité.

2/ Comprendre les interactions entre les contaminants, les cycles biogéochimiques et la chaîne alimentaire, avec la variabilité d'entrée terrestre, afin de définir un panneau d'indicateurs (physique / biologique / chimique) qui aidera les décideurs à assurer un développement durable le long de la côte algérienne (et autres parties des côtes du bassin

occidental de la mer méditerranée). SAMBA comprend également la compréhension et le suivi de la côte avec une application sur sa gestion.

Le présent travail est organisé en trois chapitres :

- dans le premier chapitre, des rappels sur l'hydrologie du bassin Algérien, l'importance des paramètres physicochimiques, le rôle et la distribution des différentes formes des sels nutritifs.
- dans le deuxième chapitre, le matériel utilisé pour les prélèvements des échantillons d'eau de mer ainsi que les méthodologies appliquées sur terrain et au laboratoire pour la mesure des paramètres physicochimiques et l'analyse des sels nutritifs sont décrites.
- le troisième chapitre est consacré au traitement des données acquises dans le bassin Algérien, à leur analyse, discussion et un essai d'interprétation. Ce traitement et cette analyse sont basés sur l'utilisation du logiciel Ocean Data View (ODV, Version 4.6.5).

Enfin, une conclusion générale clôture ce travail.

Généralités

1 Généralités

Dans ce chapitre nous abordons brièvement l'hydrologie du bassin algérien, les sels nutritifs et leurs évolutions à l'échelle spatiotemporelle. Ceci permettra de nous donner une idée sur ces paramètres et les processus qui interagissent dans leur comportement, leurs évolutions et leur rôle capital dans l'identification, la caractérisation et l'étude des masses d'eaux marines.

1.1 Nutriments minéraux dissous

Les éléments nutritifs (azote, phosphore, silicium) sont des descripteurs hydrologiques indispensables à l'étude ou la caractérisation d'un écosystème marin (Aminot et *al.*, 2004). Ils se présentent sous plusieurs formes minérales en solution (Aminot et *al.*, 1983). Ils sont indispensables à la nutrition des organismes. L'azote et le phosphore ne représentent respectivement que 6 % et 1 % de la biomasse (Aminot et *al.*, 2004). Le silicium intervient essentiellement dans la formation des coquilles siliceuses de certains organismes marins. Ces composés minéraux forment un substrat chimique, base de la production primaire photosynthétique et de la chaîne alimentaire marine.

1.1.1 Origine des sels nutritifs

Les éléments nutritifs proviennent de sources variées, situées aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur du milieu marin. Les sources exogènes potentielles sont constituées d'effluents ponctuels d'origines municipales ou industrielles et de sources diffuses (non ponctuelles), telles que les ruissellements et les dépôts atmosphériques. Le relargage des nutriments à partir des sédiments et les infiltrations constitue d'importantes sources endogènes (Aminot et *al.*, 2004).

Les sels nutritifs dissous en milieu marin ont diverses origines et peuvent être classés en deux sources principales : sources internes et sources externes.

1.1.1.1 Sources internes

Elles représentent l'origine la plus importante, car à elle seule présente environ 97% (Boulahdid, 1987). Cette origine est assurée par la régénération des sels nutritifs à partir du matériel biogénique produit dans les eaux marines superficielles. Elle comprend donc toutes les réactions biogéochimiques et autres réactions (oxydation, dégradation de la matière organique) qui s'effectuent le long de la colonne d'eau de mer. Les sels nutritifs peuvent être aussi régénérés et rediffusés à partir du sédiment marin.

1.1.1.2 Sources externes

Regroupent tous les apports continentaux qui sont transportés à la mer, soit par la voie éolienne ou par voie fluviale. Ces derniers peuvent contenir des substances toxiques pour le milieu marin (Boulaïdid, 1987).

1.1.2 Les différentes formes de sels nutritifs

1.1.2.1 L'azote

L'azote présent dans l'eau de mer se trouve sous forme organique et minérale. L'azote organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces composés ne se retrouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral, il constitue la majeure partie de l'azote total marin et existe sous différentes formes et à plusieurs degrés d'oxydation : l'azote moléculaire (N₂), les nitrates (NO₃⁻), les nitrites (NO₂⁻) et l'azote ammoniacal (NH₃⁺ et NH₄⁺) (Rodier et *al.*, 2009 ; Aminot et *al.*, 2009).

1.1.2.1.1 Les nitrates

Le nitrate (ou l'azote nitrique) est une forme chimique stable, il entre dans le cycle de l'azote comme support principal de la croissance du phytoplancton. Sa concentration varie entre 0 µmol/l à la surface à plus de 45 µmol/l dans les eaux profondes des océans. Mais, dans les estuaires, lorsque la salinité décroît par l'effet des apports terrigènes, la concentration des nitrates peut atteindre plusieurs centaines de micromoles par litre (Aminot et *al.*, 1983). Les nitrates résultent de l'oxydation des nitrites uniquement. Cette réaction s'opère par des bactéries (*Nitrobacter*), et on parle de nitratisation.

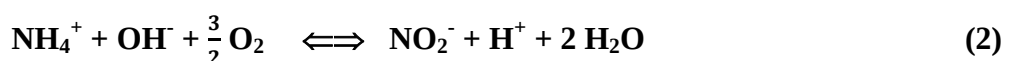


1.1.2.1.2 Les nitrites

Les nitrites (ou azote nitreux) sont souvent en quantités très faibles de zéro à quelques micromoles par litre, car c'est une forme chimique très instable (forme intermédiaire entre l'ammonium et les ions nitrates) (Aminot et *al.*, 1983).

Les nitrites résultent de :

- L'oxydation de l'ammonium : Cette réaction s'opère par des bactéries (*Nitrosomonas*) et s'appelle la nitrosation.



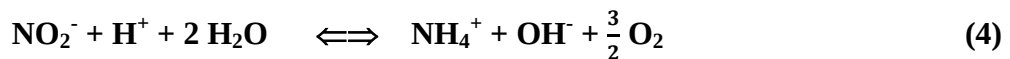
- La réduction des nitrates dans les milieux anoxiques ou pauvres en oxygène dissous. Cette réduction est opérée par des bactéries anaérobiques, selon la réaction suivante :



- Les organismes, dans leurs excréments, rejettent aussi des nitrites, surtout en zones eutrophes où les concentrations peuvent atteindre quelques $\mu\text{mol/l}$.

1.1.2.1.3 L'azote ammoniacal

L'ammonium dans l'eau de mer provient de la décomposition de l'azote organique par les bactéries (ammonification) ou des rejets directs d'animaux (urines, excréments) (Aminot et *al.*, 2004). Il résulte aussi de la réduction des nitrites en ammonium qui se fait par un mécanisme bactérien en milieu anaérobique selon la réaction suivante :



La variation de la concentration de NH_4^+ est en fonction du lieu et de la saison, elle est de l'ordre de $1\mu\text{mol/l}$ en eaux côtières non polluées et en milieu océanique, et nulle dans les eaux profondes. Cette concentration augmente dans les estuaires sous l'influence des rejets urbains et/ou agricoles (Aminot et *al.*, 1983).

1.1.2.2 Les composés phosphorés

Le phosphore est un élément nutritif qui existe dans l'eau de mer sous forme dissoute et particulaire, organique et inorganique dont les formes majoritaires sont les orthophosphates. Dans l'eau de mer, les orthophosphates sont présents essentiellement sous trois formes ioniques : i) PO_4^{3-} avec un taux de 10%, ii) HPO_4^{2-} avec un taux de 90% et iii) H_2PO_4^- qui représente un taux inférieur à 1% (Aminot et *al.*, 1983).

Les concentrations des orthophosphates sont de l'ordre de 0 à $1\mu\text{mol/l}$ dans les eaux de surface océaniques et les eaux côtières non polluées. Ces concentrations augmentent avec la profondeur, au-dessous de la zone euphotique, ou lorsque l'on se rapproche des estuaires (indice des apports domestiques et agricoles) (Aminot et *al.*, 1983).

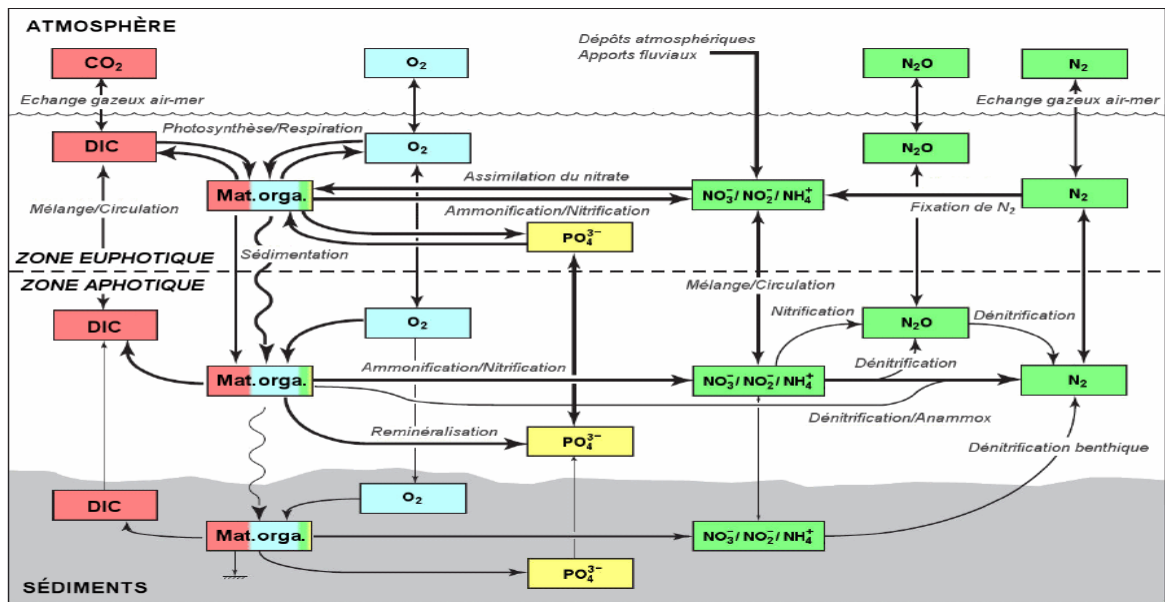


Figure 1: Représentation schématique du cycle océanique de l'azote et de son couplage avec les cycles de l'oxygène, du phosphore et du carbone (Gruber, 2008).

1.1.2.3 La silice dissoute

Le silicium est présent dans l'eau de mer sous deux formes, dissoute et particulaire (Riley et *al.*, 1971). Le silicium dissous au pH de l'eau de mer ($\approx 8,2$) se trouve à 95 % sous la forme d'acide orthosilicique Si(OH)_4 et entre dans la composition des squelettes de certaines espèces phytoplanctoniques (diatomées, radiolaires ...) (Aminot et *al.*, 1983). A pH moyen de l'eau de mer, l'acide orthosilicique se trouve ionisé à 5 % sous la forme SiO(OH)_3^- (Ingri, 1959).

Les eaux océaniques de surface sont pauvres en silicium ($< 1 \mu\text{mol/l}$), à l'exception des zones côtières et en particulier les estuaires qui sont plus riches en silicium ; tandis que les eaux océaniques profondes ont des concentrations plus élevées qui peuvent atteindre en certaines zones environ $150 \mu\text{mol/l}$ (Aminot et *al.*, 1983).

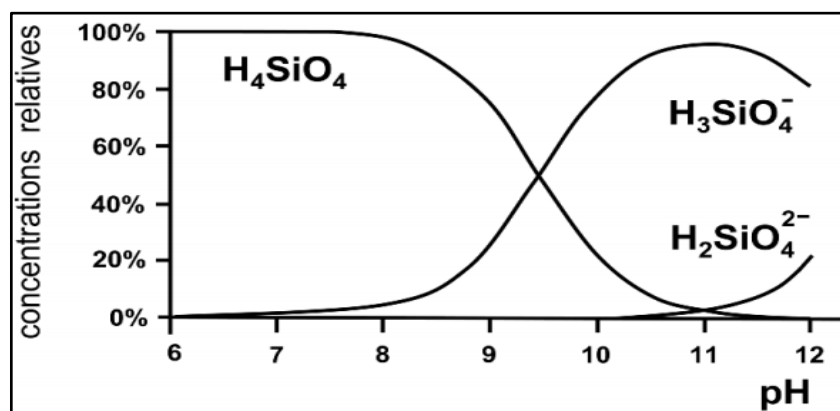


Figure 2: Distribution des espèces chimiques du silicium dissous en fonction du pH.

Selon Sjöberg et *al.* (1981) les réactions acide-base de l'acide orthosilicique en solution saline (25°C, salinité ≈ 34.5) sont les suivantes:

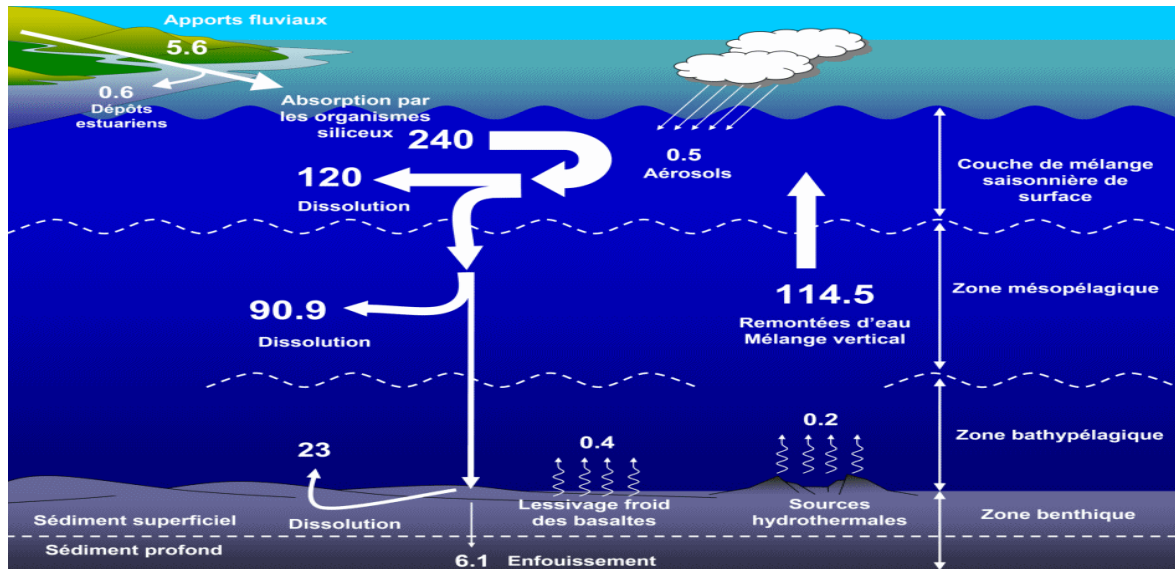
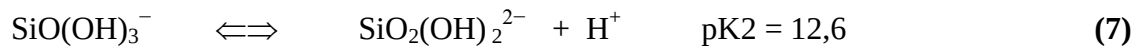
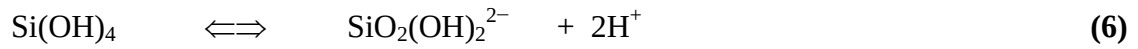


Figure 3: Cycle de silicium dans l'océan mondial d'après Tréguer et *al* (1995). Les flux ont pour unité 10^{12} g Si /an.

1.1.3 Le cycle biogéochimique des sels nutritifs

La figure suivante résume le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans le milieu marin.

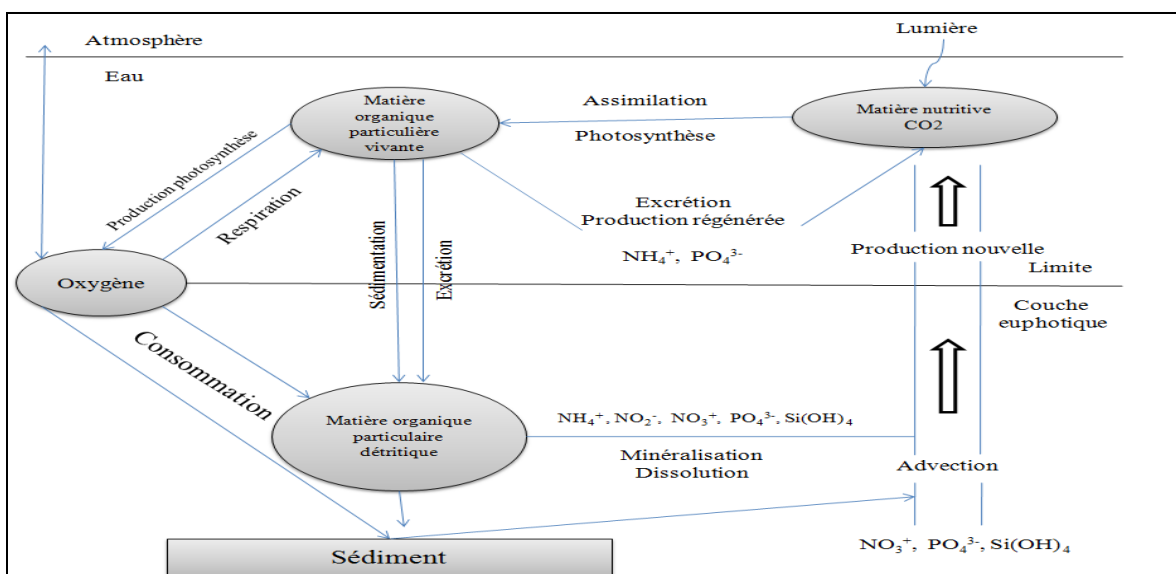


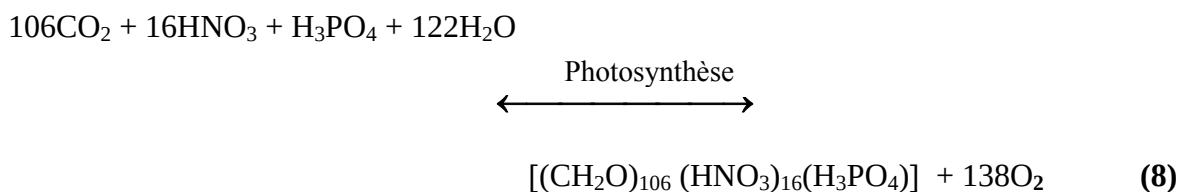
Figure 4: Cycle global des sels nutritifs : production et minéralisation de la matière organique (Jacques et Tréguer, 1986).

1.1.3.1 La photosynthèse

C'est le principal mécanisme de production primaire de la biomasse dans le milieu marin. La lumière est une source d'énergie indispensable, c'est pourquoi seules les eaux superficielles sont le siège de ce processus.

L'azote inorganique assimilé peut provenir d'ammonium et/ou de nitrite. Toutefois, la dépense énergétique de la cellule sera d'autant plus élevée que l'azote est plus oxydé.

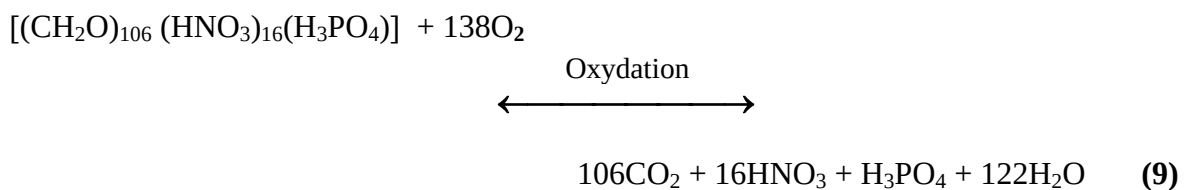
Le phosphore est fourni par le phosphate, mais les cellules sont capables d'hydrolyser le phosphore organique dissous grâce à des enzymes externes (fixées ou non à la cellule) en cas de déficit en phosphate (Aminot et *al.*, 2004).



1.1.3.2 La minéralisation

La matière organique dissoute (sécrétée par les cellules ou libérée à leur mort) et la matière organique particulaire détritique (excrétée par les organismes supérieurs ou constituée de débris de cellules mortes) sont converties en nutriments minéraux essentiellement par les bactéries, c'est la phase de minéralisation, indispensable au fonctionnement du cycle de la vie aquatique. La minéralisation est la réaction inverse de la photosynthèse, aboutissant à la formation de nitrate et de phosphate. Cependant, cette réaction ne représente que l'aboutissement final des processus conduisant à l'oxydation complète des éléments de la matière organique (dissoute ou particulaire) (Aminot et *al.*, 2004).

La minéralisation résulte de la nutrition des bactéries hétérotrophes dont le métabolisme comporte deux voies complémentaires ; la voie énergétique qui récupère l'énergie stockée dans la matière organique par l'oxydation du carbone organique en CO_2 (respiration) et la voie synthétique (assimilation) qui construit la biomasse bactérienne en utilisant les éléments minéralisés pour constituer une biomasse (Aminot et *al.*, 2004).



1.1.3.3 L'excrétion et la sécrétion

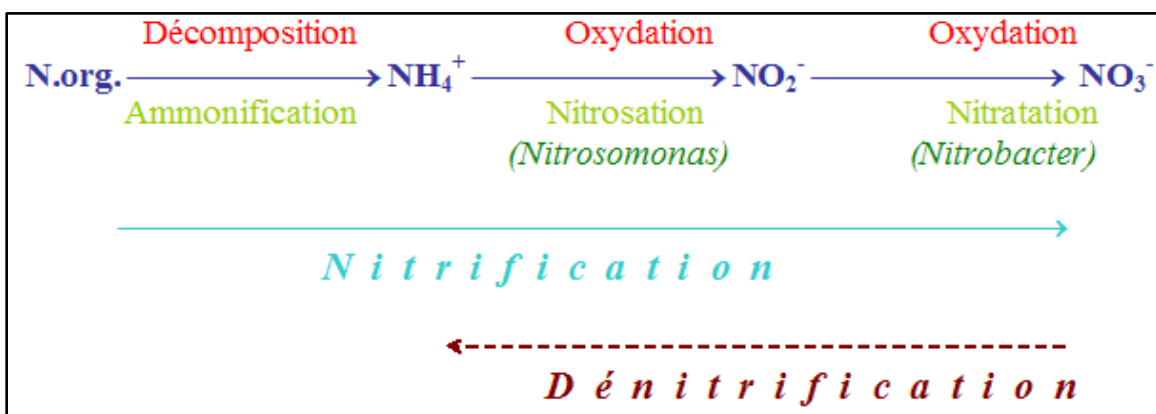
L'excrétion et la sécrétion de nutriments sont considérées en dehors de la minéralisation bactérienne. Des composés organiques solubles sont sécrétés par le phytoplancton vivant, les plus connus étant les acides aminés et les polysaccharides. De l'ammonium et du phosphate sont excrétés par les microflagellés hétérotrophes, les ciliés et le zooplancton. Les organismes zooplanctoniques excrètent en outre du matériel organique particulaire (Aminot et *al.*, 2004).

1.1.3.4 La nitrification

Dans les milieux où l'oxygène est disponible, l'ammonium produit par ammonification est oxydé en nitrite puis nitrate par les bactéries nitrifiantes. La conversion d'ammonium en nitrite (Nitritation ou nitrosation) est réalisée par les bactéries *Nitrosomonas* et celle de nitrite en nitrate (nitratisation) par les bactéries *Nitrobacter*.

1.1.3.5 La dénitrification

Dans les milieux anoxiques, l'ammonium rejeté par la minéralisation n'est pas oxydé et s'accumule. Dans ces milieux, des bactéries se développent néanmoins en trouvant d'autres sources d'oxygène, dont celui du nitrate lorsqu'il est présent. La dénitrification est un processus hétérotrophe. Différents processus consommant le nitrate sont regroupés sous le terme de dénitrification. Au sens strict, il s'agit de la production finale de diazote N_2 , mais de l'oxyde nitreux est aussi produit N_2O . Au sens large, on y inclut la réduction du nitrate en ammonium. Dans les sédiments, les deux types de processus sont présents (Aminot et *al.*, 2004).



1.2 Les sels nutritifs en mer Méditerranée

La mer Méditerranée est un milieu très oligotrophe¹ (Dugdale et *al.*, 1988). L'oligotrophie du bassin est principalement due à la circulation anti-estuarienne au détroit de Gibraltar (Bethoux et *al.*, 1998). Les eaux de surface qui entrent dans la Méditerranée sont relativement pauvres en éléments nutritifs alors que les eaux sortantes en sont plus concentrées. Les pertes au détroit de Gibraltar sont compensées par les apports terrestres (principalement fluviaux) et atmosphériques (Bethoux, 1989; Bethoux et *al.*, 1992). L'oligotrophie augmente vers l'est du bassin méditerranéen. Elle est marquée par une diminution des concentrations des principaux nutriments (nitrates et phosphates) et un approfondissement de la profondeur de la nitracline et de la phosphacline (Moutin et *al.*, 2002; Pujo-Pay et *al.*, 2011). La nitracline (phosphacline) correspond à la zone (profondeur) de l'océan marquée par un gradient vertical important de la concentration en nitrate (phosphate) (Cullen et *al.*, 1983). Les concentrations en nitrate et phosphate dans les eaux profondes de la mer Méditerranée sont respectivement de 9 μM et 0,4 μM dans le bassin ouest et 5 μM et 0,19 μM dans le bassin est (Bethoux et *al.*, 1998; Ribera d'Alcalà et *al.*, 2003).

1.3 Evolution des concentrations de sels nutritifs en Méditerranée occidentale

Les données de nutriments acquises à des profondeurs supérieures à 400 m dans le bassin algéro-provençal (y compris la mer Ligure et la mer Alboran) sont résumées dans le tableau 1. Les données de Gostan (1967) ont été acquises dans la mer Ligure, entre Nice et Calvi (Corse), à partir de la surface jusqu'à une profondeur de 2600m à la fin de l'année 1962, en 1963 et au début de 1964. La campagne « Mediprod 1 » a étudié la partie nord du bassin (au nord de 41° 20 N) en 1969, avec des mesures à des profondeurs d'environ 1000 m (Minas, 1971). « Mediprod 3 » a de nouveau travaillé entre Nice et Calvi en 1972, avec des stations limitées à des profondeurs de 1000 m, sauf pour une station qui atteint 2400 m. « Mediprod 4 » a, quant-à-elle, couvert l'ensemble du bassin en 1981, avec 15 stations avec des mesures à des profondeurs comprises entre 2500 et 2700 m (Coste et *al.*, 1984). « Phycemed 2 » a également couvert l'ensemble du bassin en 1983, avec des stations profondes (Delmas et *al.*, 1984). La campagne « Mediprod 5 », en 1986, s'est principalement concentrée sur le bassin algérien jusqu'à Minorque, avec des stations limitées à des profondeurs de 800 m (Raimbault et *al.*, 1990). Les stations profondes de la campagne « Medatlante » en 1989 étaient situées dans le centre du bassin (40° N, 6° E) et à

¹ Pauvre en sel nutritifs (sels d'azote, du phosphore et du silicium)

l'ouverture de la mer d'Alboran (Bethoux et *al.*, 1992). « Mediprod 6 » en 1990 s'est de nouveau concentré sur le bassin algérien, jusqu'à 39° N, avec des stations essentiellement limitées à des profondeurs de 1000 m, à l'exception de trois stations qui ont été étendues à des profondeurs de plus de 2000 m (Raimbault et *al.*, 1990). La campagne « Semaphore » en 1994 a été effectuée dans le bassin algéro-provençal avec des stations de la surface jusqu'au fond (Bethoux et *al.*, 1998).

Tableau 1: Valeurs historiques pour les éléments nutritifs en $\mu\text{mol/l}$ dans la Méditerranée occidentale (Bethoux et *al.*, 1998).

Année	Campagne	Phosphate			Nitrate			Silicate			Ratio N/P
		μ	s	n	μ	s	n	μ	s	n	
1962.8	Gostan 1	0,363	0,026	110	-	-	-	-	-	-	-
1963.6	Gostan 2	0,340	0,029	304	-	-	-	-	-	-	-
1964.3	Gostan 3	0,343	0,030	171	-	-	-	-	-	-	-
1969.2	Mediprod 1/1	0,388	0,048	189	6,32	0,82	220	-	-	-	16,3
1969.3	Mediprod 1/2	0,381	0,056	230	6,58	0,83	223	-	-	-	17,3
1972.5	Mediprod 3	0,355	0,055	79	7,68	0,75	81	7,43	1,12	79	21,6
1981.9	Mediprod 4	0,387	0,037	307	8,13	0,40	301	8,34	1,00	289	21,0
1983.3	Phycemed 2	0,387	0,024	80	7,77	0,44	70	7,73	0,79	71	20,0
1986.5	Mediprod 5/1	0,394	0,022	183	8,59	0,48	186	7,61	0,77	188	21,8
1987.3	Mediprod 5/2	0,379	0,012	87	8,16	0,47	87	7,82	0,53	87	21,5
1989.0	Medatlante 1	0,392	0,014	24	8,18	0,31	24	8,38	0,39	23	20,9
1989.7	Medatlante 2	0,378	0,018	16	8,32	0,23	17	8,33	0,35	16	22,0
1990.5	Mediprod 6	0,389	0,030	210	8,47	0,27	210	7,76	0,50	199	21,8
1994.8	Semaphore	0,404	0,024	102	8,68	0,29	115	8,37	0,53	115	21,5

Année de déroulement ; nom de la campagne; Valeur moyenne pour les profondeurs supérieures à 400 m (μ) en $\mu\text{mol/l}$, écart-type (s), nombre d'échantillons (n), pour les phosphates, nitrates et silicates ; Rapport molaire nitrate vs. phosphate (N/P)

À l'exception des données acquises par GOSTAN (1967) en utilisant la spectrophotométrie manuelle, toutes les autres données ont été acquises par l'utilisation d'un autoanalyseur II-Technicon adapté à l'analyse automatisée des sels nutritifs.

Entre 1963 et 1994, les données provenant d'environ 2100 échantillons de phosphate, 1500 échantillons de nitrate et 1000 échantillons de silicate, ont été signalées dans des

expéditions expérimentales. La plupart des écarts-types pour les données de phosphate étaient inférieurs à $0,04 \mu\text{M}$. Ces résultats démontrent la cohérence interne des données recueillies et vérifient l'homogénéité de la concentration de phosphate à une profondeur supérieure à 400m (Bethoux et *al.*, 1998). Les écarts-types pour les nitrates étaient assez faibles pour les quatre dernières campagnes (Medatlante 1, Medatlante 2, Mediprod 6, Semaphore), mais étaient significativement plus grands pour les sept campagnes précédentes. Les écarts-types pour les concentrations de silicates sont encore plus grands, mais la plus grande partie de cette variation pourraient résulter de la dissolution plutôt lente de silicate dans la matière particulaire (Bethoux et *al.*, 1998).

1.4 Zone d'étude : Le bassin Algérien

1.4.1 Caractéristiques géomorphologiques

Le bassin Algérien est la région centre de la Méditerranée sud-occidentale, il est délimité à l'ouest par la mer d'Alboran, à l'est par la mer Tyrrhénienne, au sud par l'Algérie et au nord par les îles Baléares et la Sardaigne (figure 5). Ce bassin est situé entre 40° et 35° nord de latitude et entre 2° ouest et 8° est de longitude.

Le plateau continental algérien est très étroit. Des profondeurs supérieures à 2000 m sont observées 10 à 20 km plus au large avec une profondeur moyenne qui peut dépasser les 2600 m (Obaton, 1998).



Figure 5 : Situation géographique du bassin Algérien.

1.4.2 La circulation générale des eaux en mer Méditerranée

La mer Méditerranée est connue pour être un bassin de concentration où l'évaporation, excédant les apports fluviaux et les précipitations, est responsable d'une baisse de niveau de la mer estimée à 1 m par an (Millot et *al.*, 2005). Ce déficit est compensé par un flux entrant d'eau Atlantique, par le détroit de Gibraltar à environ 1,6 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) (Millot et *al.*, 1990).

Cette eau Atlantique relativement froide et peu salée entre dans le bassin par le détroit de Gibraltar et circule en surface (jusqu'à 200m de profondeur) vers l'est devenant de plus en plus chaude et salée (Wüst, 1961) : On parle alors de l'Eau Atlantique Modifiée (MAW). Dans le bassin levantin, l'association de conditions hydrologiques et atmosphériques favorables génèrent un mélange hivernal relativement profond et provoque la plongée des eaux de surface jusqu'à 600m de profondeur formant alors l'Eau Levantine Intermédiaire (LIW) (Lascaratos et *al.*, 1993; Lascaratos et *al.*, 1998). La LIW, caractérisée par un maximum de salinité en sub-surface variant entre 39 dans le bassin levantin et 38,4 dans le bassin occidental, s'écoule d'est en ouest entre 200m et 600m de profondeur et quitte la Méditerranée par le détroit de Gibraltar (Wüst, 1961). Des cellules thermohalines verticales associées à des zones de formation d'eau profonde (plus de 1600m) ont été observées dans chaque sous bassin (Millot, 1999; Malanotte-Rizzoli et *al.*, 1988). Dans le bassin ouest, les épisodes de convection profonde sont centrés sur la région du golfe du Lion et la mer Ligure (MEDOC-Group, 1970; Madec et *al.*, 1991; Schott et *al.*, 1996; Smith et *al.*, 2008). Le bassin oriental, le sud de la mer Adriatique et la mer Egée ont été identifiés comme des zones de formation d'eau profonde (Roether et *al.*, 1991; Cardin et *al.*, 2003). Les eaux denses nouvellement formées au cours d'épisodes de convection s'étalent ensuite en profondeur repoussant les masses d'eau de densités inférieures. La circulation méditerranéenne est également marquée par la présence de structures à l'échelle des sous bassins mais aussi à la meso (~100km) et submeso (~10km) échelle comme des tourbillons (ou gyres), des fronts et des jets (Brankart et *al.*, 1998; Puillat et *al.*, 2002; Hamad et *al.*, 2005; Rio et *al.*, 2007). En particulier, la circulation de la MAW dans le bassin algérien est marquée par la présence de tourbillons dont le diamètre varie entre 50 et 150km. Ces tourbillons peuvent se maintenir jusqu'à 3 ans (Puillat et *al.*, 2002).

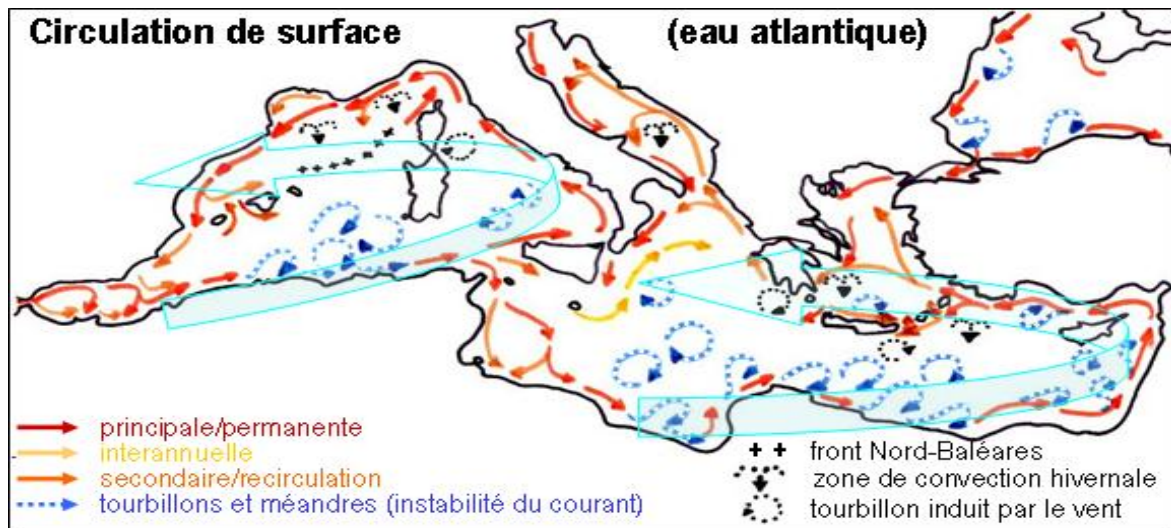


Figure 6 : La circulation générale en mer méditerranée (Millot et al., 2005).

1.4.3 Principales eaux-types du bassin Algérien

Les principales masses d'eaux qui existent dans le bassin Algérien sont décrites par (Benzohra et al., 1995). Ces masses d'eau se différencient par leurs caractéristiques de température et de salinité et se trouvent à des profondeurs distinctes.

1.4.3.1 MAW (Modified Atlantic Water)

L'eau Atlantique modifiée qui se reconnaît en une couche superficielle de 150 m d'épaisseur, ayant une température de [15-23 °C] en surface et de [13,5-14°C] en profondeur, avec des salinités allant de 36,5 à 38.

1.4.3.2 WIW (Winter Intermediate Water)

L'eau intermédiaire d'hiver résulte des processus de convection d'hiver, au large des côtes de Provence (Nord du bassin Algérien). Cette eau se trouve sous les MAW, à une profondeur de 150-200m et est marquée par un minimum relatif de température [12,65-13,20 °C] qui dépend de la sévérité des conditions hivernales, associé à une salinité de 38,3.

1.4.3.3 LIW (Levantine Intermediate Water)

L'eau levantine intermédiaire, formée dans la Méditerranée orientale, se trouve sous la WIW. Elle est caractérisée par un maximum relatif de la température potentielle $\Theta_{\max}$ allant de 13,2 à 14,0 °C (à 300-400 m) et d'un maximum de salinité allant de 38,5 à 38,7 (à 400-500 m). La différence de profondeur entre $\Theta_{\max}$ et $S_{\max}$ est en fonction de l'importance du mélange.

1.4.3.4 WMDW (Western Mediterranean Deep Water)

L'eau profonde de la méditerranée occidentale, formée dans le nord du bassin, se trouve sous la LIW. La WMDW commence à être identifiable à partir de 600 à 700 m. Elle se caractérise par une température allant de 12,75 à 12,9 °C et une salinité de 38,42 à 38,47. La séparation entre la LIW et WMDW n'est pas facile en raison de leurs densités très similaires.

1.4.3.5 BW (Bottom Water)

Cette eau de fond, située près du fond, est retrouvée épisodiquement. Elle est relativement plus chaude et plus salée que l'eau profonde et présente une épaisseur de quelques centaines de mètres.

1.4.4 Circulation des eaux du bassin Algérien

1.4.4.1 Eaux de surface

L'eau entrant via le détroit de Gibraltar est communément appelé l'eau Atlantique modifiée (MAW) pour se référer aux eaux de surface en mer Méditerranée. L'eau Atlantique pénètre par le détroit de Gibraltar sous forme d'un jet dirigé vers la mer d'Alboran. Cette masse d'eau concerne une couche de 10 à 200m d'épaisseur et circule principalement dans les zones côtières d'ouest en est tout d'abord pour ensuite remonter vers le nord en un circuit cyclonique dans le bassin occidental (Millot, 1999). Elle est sujette à évaporation et mélange avec des couches plus profondes le long de son parcours ce qui a pour effet de changer ses caractéristiques, d'où son nom, et en particulier d'entraîner une augmentation régulière de sa salinité donc de sa densité. Dans la zone de Gibraltar, celle-ci est d'environ 36,5 et atteint 38,0 à 38,3 dans le détroit de Sicile (Millot, 1999).

Après avoir franchi le détroit de Gibraltar, l'eau Atlantique modifiée forme deux tourbillons anticycloniques dans la mer d'Alboran (Millot, 1999). A la sortie de cette mer, l'eau Atlantique modifiée s'écoule de la côte espagnole (2°W) vers la côte algérienne (1°W), le plus fréquemment sous la forme d'un jet intense, nommé le front Almeria-Oran (Tintoré et *al.*, 1988; Arnone et *al.*, 1990). Cet écoulement dérive vers l'est le long de la côte algérienne sous forme d'une veine de courant étroit (30 à 50 km) et profond (200 à 400m) à une vitesse de quelques cm/s (Benzohra et *al.*, 1995). Ce flux atlantique est communément appelé « le courant algérien » dont le flux est estimé à 1,7Sv (Benzohra et

al., 1995). Ce courant côtier se déstabilise aux alentours de 1-2°E et engendre des tourbillons anticycloniques vraisemblablement par instabilité barocline (Millot, 1987).

Les anticyclones, qui ont une signature sur toute la hauteur de la colonne d'eau, grandissent et atteignent des diamètres de l'ordre de 100 km (Millot, 1994). Ils peuvent se détacher du courant et dériver vers le large dans le bassin algérien. Ils forment alors des tourbillons quasi-stationnaires, de diamètre d'environ 200km (Taupier-Letage et *al.*, 1988).

Millot (1987) souligne le fait que le bassin algérien forme un réservoir tampon pour l'eau Atlantique modifiée entre les détroits de Gibraltar et de Sicile avant de se diviser en deux branches, la plus grande partie s'écoule vers le bassin oriental et l'autre s'écoule vers le nord le long des côtes italiennes et pénètre dans la mer Tyrrhénienne, la mer de Ligure, les côtes françaises jusqu'à arriver à la mer des Baléares. Une partie revient dans le bassin Algérien et l'autre continue son trajet le long des côtes catalanes. Arrivée en mer d'Alboran, elle revient dans bassin Algérien.

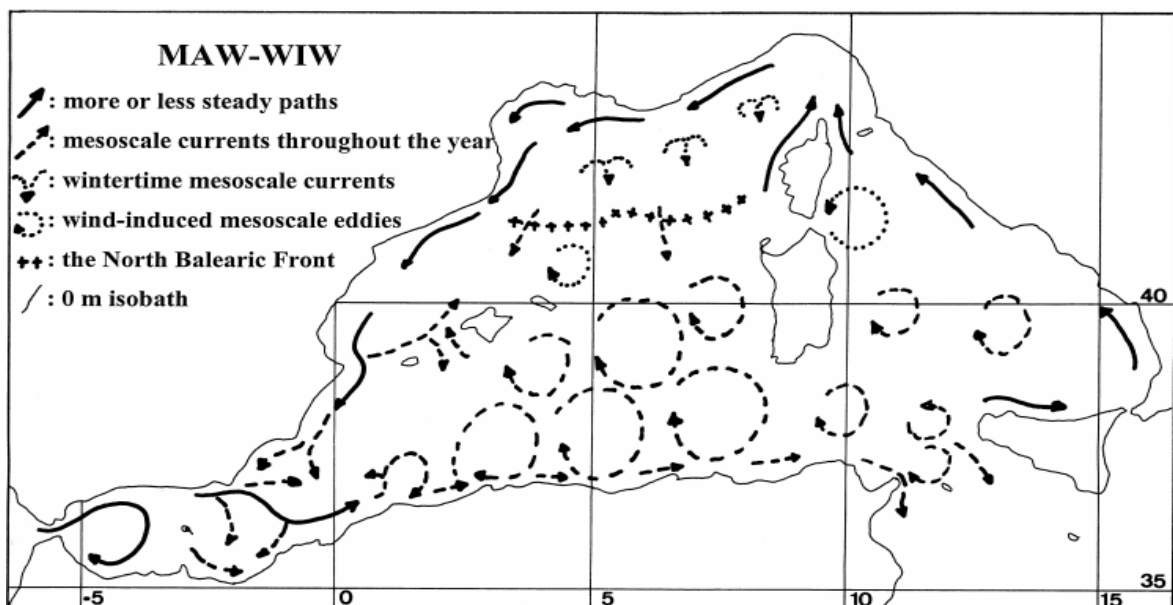


Figure 7 : Circulation des eaux de surface en Méditerranée occidentale (Millot, 1999).

1.4.4.2 Eaux intermédiaires

Les eaux intermédiaires en Méditerranée occidentale sont constituées principalement par la LIW (Levantine Intermediate Water) qui résulte de la convection hivernale en Méditerranée orientale. A sa source, cette masse d'eau se situe entre 150 et 400m de profondeur et est caractérisée par une température comprise entre 15 et 16°C et une salinité s'étalant de 38,95 à 39,05. Cette eau chaude et salée pénètre dans le bassin ouest par le

détroit de Sicile, elle tourne sur sa droite en mer Tyrrhénienne et longe la côte italienne (Millot, 1987).

Une partie seulement de l'eau intermédiaire franchit le canal de Corse étroit et peu profond tandis que la majeure partie poursuit son circuit cyclonique autour de la mer Tyrrhénienne vers le canal de Sardaigne. L'écoulement remonte alors vers le nord le long de la côte ouest de la Sardaigne et de la Corse et rejoint l'eau levantine issue du canal de Corse (Obaton, 1998). Là, le courant d'eau intermédiaire suit le talus continental le long des côtes françaises, du plateau du golfe du Lion et enfin des côtes espagnoles (Millot, 1987).

L'eau levantine franchit ensuite le canal d'Ibiza large et profond, sans remonter le long des îles Baléares (Obaton, 1998). Au niveau d'Almeria, une partie traverse la mer d'Alboran et sort par le détroit de Gibraltar, tandis que l'autre partie, entraînée par l'eau de surface d'origine atlantique venant de la mer d'Alboran, rejoint et suit les côtes algériennes (Millot, 1994).

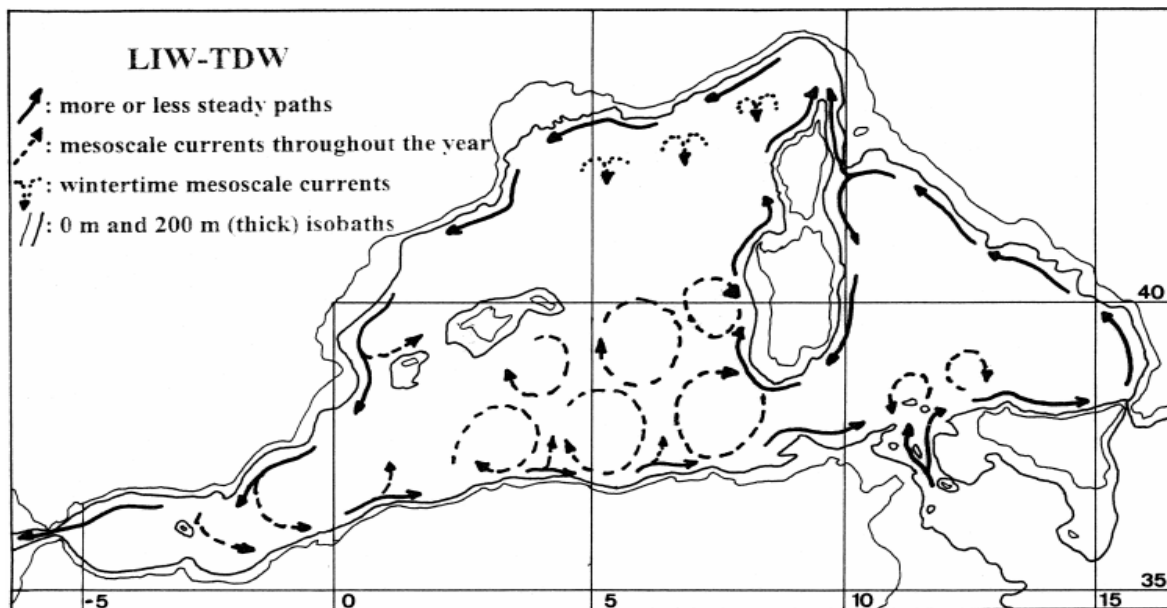


Figure 8 : Circulation des eaux intermédiaires en Méditerranée occidentale (Millot, 1999).

1.4.4.3 Eau profonde

L'eau profonde de la Méditerranée est formée dans le bassin nord et plus spécifiquement en mer Ligure et au large du golfe du Lion par la convection hivernale intense sous l'influence de vents froids et secs de secteur nord et nord-ouest (le mistral et la tramontane) (Millot, 1994; La Violette, 1994). Ceux-ci entraînent l'évaporation des couches de surface de l'eau Atlantique modifiée et de l'eau Levantine et donc une augmentation de la densité des couches superficielles qui peut atteindre celle des couches les plus profondes (Gascard,

1978). Ces couches d'eau, devenues plus denses que les couches inférieures, plongent alors et se mélangent à ces dernières (Lacombe et *al.*, 1981). La WMDW s'identifie à partir de 600-700 m, se caractérisant par des températures de 12,75 à 12,90°C et des salinités de 38,42 à 38,47 (Benzohra et *al.*, 1995).

Ces eaux suivent une circulation générale cyclonique dans le bassin ouest de la méditerranée d'Est en Ouest, commençant par longer les îles Baléares jusqu'à atteindre la mer d'Alboran. A ce niveau, une partie traverse le détroit de Gibraltar et se retrouve en Atlantique tandis que la plus grande partie retourne longer les côtes africaines d'Ouest en Est vers l'Italie, contournant la Sardaigne et la Corse et remonte vers les côtes françaises (Milot, 1999).

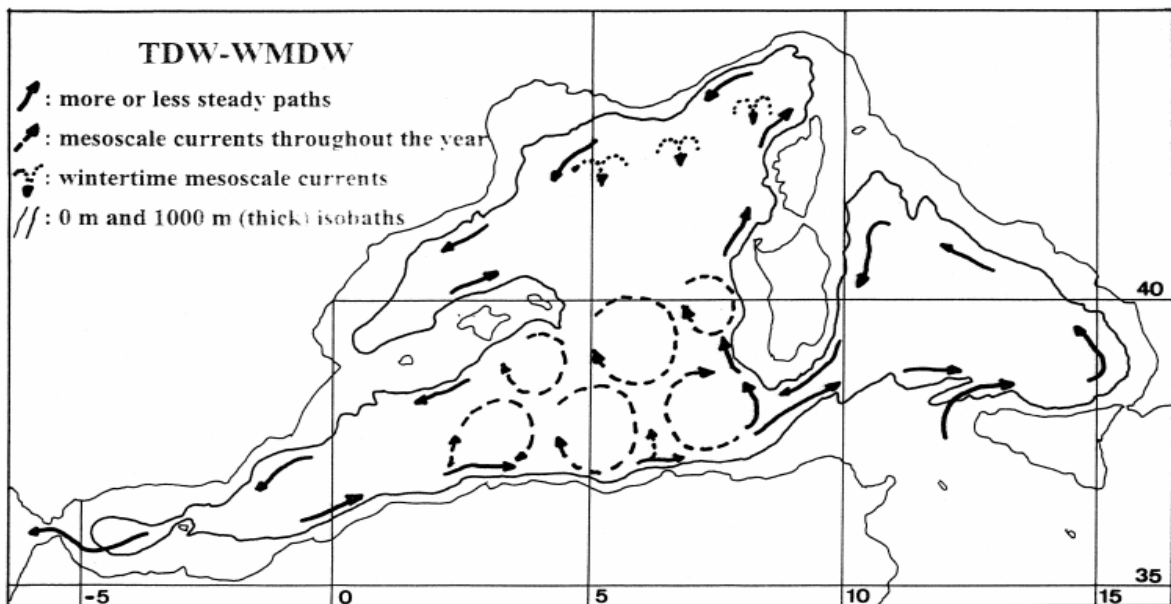


Figure 9 : Circulation des eaux profondes en Méditerranée occidentale (Milot, 1999).

Matériel et Méthodes

2 Matériel et Méthodes

2.1 La campagne SOMBA-GE 2014

2.1.1 Présentation générale de la campagne

La campagne océanographique SOMBA-GE (Système d'Observation à la Mer du Bassin Algérien- Grande Echelle) entre dans le cadre d'une collaboration scientifique entre l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL), les organismes du Réseau Algérien des Sciences de la MER (RASMER) et le Centre National français de la Recherche Scientifique (CNRS).

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

2.1.2 Site d'étude et période d'observation

Le bassin Algérien situé au centre de la Méditerranée occidentale, a fait l'objet d'une campagne océanographique pluridisciplinaire qui s'y est déroulé du 16 août au 9 septembre 2014 à bord du navire océanographique « Téthys II ». La campagne SOMBA a suivi des transects côte-large et des parallèles au talus continental, afin de cartographier les deux gyres cycloniques décrivant ce bassin. Au total soixante-dix stations ont été effectuées sur quatre-vingt-sept stations prévues dans le programme initial. Le navire « Téthys II » a sillonné le bassin Algérien en quatre legs :

- Leg 1 : de Toulon (14/08) à Bejaia (20/08) où 16 stations ont été réalisées.
- Leg 2 : de Bejaia (22/08/) à Alger (28/08) où 19 stations ont été réalisées.
- Leg 3 : d'Alger (31/08) à Mallorca (03/09) où 16 stations ont été réalisées.
- Leg 4 : de Mallorca (04/09) à Toulon (10/09) où 19 stations ont été réalisées.

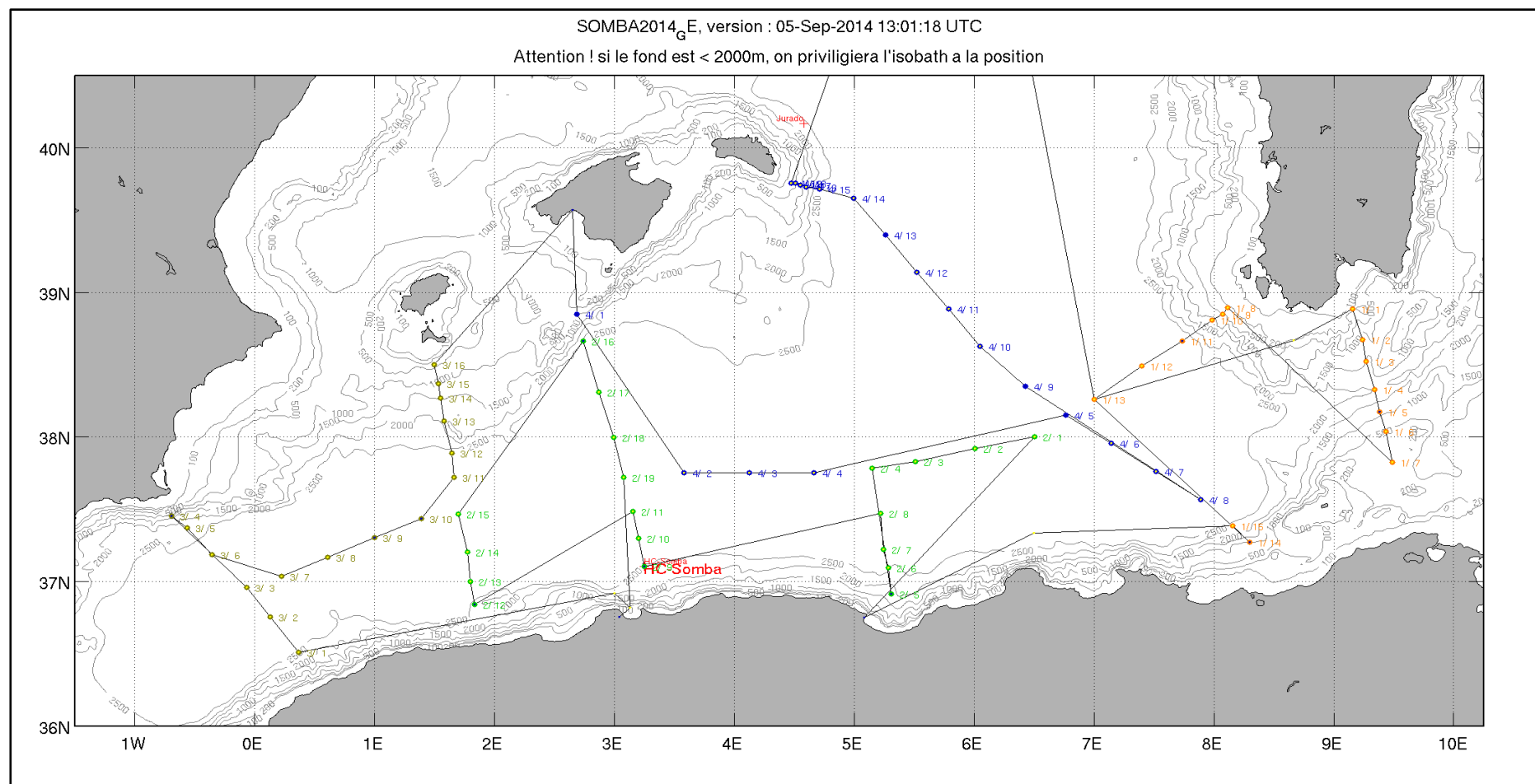


Figure 10: Localisation des stations de prélèvement dans le bassin Algérien pendant la campagne SOMBA-GE 2014.

2.1.3 Objectifs de la campagne

L'objectif principal de la campagne SOMBA est d'initier dans le bassin Algérien une série temporelle à l'instar du programme MOOSE (Mediterranean Ocean Observing System on Environment) dans le bassin Nord Méditerranéen, pour les variables océaniques essentielles par des profils (CTD, oxygène, fluorescence, turbidité, courants) et des échantillons discrets (sels nutritifs, carbone inorganique, pigments) sur un réseau de stations surface-fond. Cette information de long-terme sera essentielle pour tous les projets scientifiques et les modèles développés dans le cadre de MERMEX ou d'autres programmes nationaux et internationaux.

SOMBA est un système d'observation à la mer dans le bassin Algérien qui soutiendra les efforts « MERMEX Algérie ». SOMBA a été pensé pour répondre aux principales questions suivantes :

1/ Comprendre les cycles biogéochimiques et les budgets dans le bassin Algérien pour les principaux biocomposants (C, N, P) ; Evaluer la pénétration du carbone et le flux anthropiques air-mer d'O₂ et de CO₂ ; Etudier les changements dans la circulation et leur effet sur la distribution de l'oxygène dans les eaux souterraines, ainsi que sur la productivité.

2/ Comprendre les interactions entre les contaminants, les cycles biogéochimiques et la chaîne alimentaire, avec la variabilité d'entrée terrestre, afin de définir un panneau d'indicateurs (physique / biologique / chimique) qui aidera les décideurs à assurer un développement durable le long de la côte algérienne (et autres parties des côtes du bassin occidental de la mer méditerranée). SAMBA comprend également la compréhension et le suivi de la côte avec une application sur sa gestion.

2.1.4 Travaux réalisés

2.1.4.1 En mer

Matériel utilisé

Quatre composantes sont utiles à cette mission :

- les systèmes de géolocalisation et maritimes du bateau (GPS, sonde, météo),
- les instrumentations scientifiques du bateau (TSG, SADC),
- les systèmes de déploiement de la bathysonde (treuil, câble électro-porteur),

- la bathysonde composée d'une CTD-Rosette (SBE911+) munie de 2 paires TC 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 et leur alimentation indépendante, un UVP avec sortie analogique et alimentation indépendante.

Le programme initial se décrit suivant une couverture du bassin Occidental-Sud Méditerranéen suivant des transects côte-large et des parallèles au talus continental, afin de cartographier les deux gyres cycloniques décrivant ce bassin.

Ce programme s'est déroulé suivant une section par jour, à raison de 4 à 7 stations. Il a commencé le samedi 16 août 2014 après le transit depuis le port de La Seyne-sur-Mer, et il s'est terminé le mardi 9 septembre 2014.

Chaque station consiste à déployer une bathysonde qui acquiert un profil continu sur la colonne d'eau (surface-fond) de paramètres hydrologiques, courantologiques et bio-optiques. Le système permet aussi de prélever 11 échantillons d'eau de 12 L à des paliers discrets pris sur la colonne d'eau à l'aide de bouteilles Niskin.

Ces deux éléments se combinent grâce à l'utilisation d'un câble électro-porteur permettant à l'opérateur de visualiser les profils à la descente, de décider de la profondeur des paliers et de fermer séquentiellement les bouteilles à l'arrêt de la bathysonde à ces paliers.

A chaque palier sont prélevés des échantillons d'eau, qui sont soit filtrés à bord pour extraction des pigments à terre (par méthode HPLC), soit analysés à bord pour leur teneur en oxygène dissous (par méthode Winkler), soit conservés et fixés en vue de leur analyse à terre (DIC, sels nutritifs, salinité).

Tableau 2: Tableau récapitulatif du nombre de stations et d'échantillons des sels nutritifs lors de la campagne.

Campagne	Leg	Nombre de stations	Nombre d'Echantillons
SOMBA-GE 2014	1	16	173
	2	19	218
	3	16	203
	4	19	223
	Total	70	817

2.1.4.2 Au laboratoire : Analyse des sels nutritifs

Les échantillons d'eau de mer pour l'analyse des sels nutritifs ont été directement prélevés par la rosette dans des flacons en polyéthylène de 20 ml préalablement rincés 3 fois avec l'eau de prélèvement. Ils ont été immédiatement empoisonnés avec 50 µl d'une solution de chlorure mercurique (6g/l) et conservés au frais (à 4°C) jusqu'à l'analyse au laboratoire qui a été effectuée par la méthode colorimétrique sur l'Auto Analyseur II- Technicon (Tréguer et Le Corre, 1975).

La ligne de base est réglée en analysant de l'eau déionisée MilliQ-plus préparée au laboratoire. Une correction de l'effet de turbidité dû à la teneur en sel de l'eau de mer est donc appliquée aux hauteurs de pic pour le calcul des concentrations.

La calibration de chaque voie d'analyse est réalisée à chaque station à l'aide des solutions standards couvrant la gamme des concentrations rencontrées pour chaque élément.

L'analyse des sels nutritifs a été faite au sein du laboratoire de la plateforme « Analyse paramètres de base du Mediterranean Institute of Oceanography (MIO) » à l'université de Luminy à Marseille.

2.1.4.2.1 Principe d'analyse des différents sels nutritifs

Le principe de détermination des concentrations en sels nutritifs (nitrates, nitrites, orthophosphates et silicates) est basé sur la formation de complexes spécifiques colorés dont l'absorption est directement proportionnelle à la concentration du sel nutritif à doser.

La quantité de lumière absorbée par la solution, appelée absorbance (A) ou densité optique (D.O), obéit à la loi de BEER-LAMBERT qui est exprimée par la relation suivante :

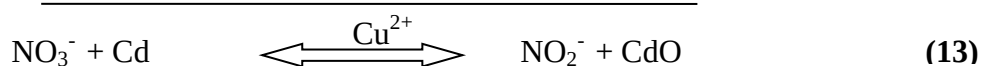
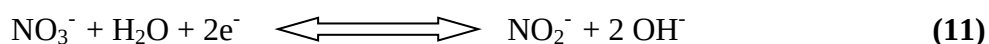
$$A = D.O = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon . L . C \quad (10)$$

- I_0 et I sont respectivement les intensités lumineuses incidentes et émergentes du milieu absorbant.
- A : Absorbance ou densité optique (D.O).
- L : Trajet optique (épaisseur du milieu absorbant).
- ε : Coefficient d'extinction molaire, variant fonction de la température et de la longueur d'onde.
- C : Concentration du milieu absorbant.

2.1.4.2.1.1 Nitrates

La méthode retenue quasi universellement est celle fondée sur le dosage des ions nitrites obtenus par réduction des ions nitrates. On mesure donc en réalité la somme des concentrations nitrites + nitrates. L'analyse des nitrites est effectuée directement sans réduction. Par déduction de la concentration en nitrites, on obtient donc la concentration en nitrates.

Les ions nitrates dissous dans l'eau de mer sont réduits en nitrites presque quantitativement (>95%) par le passage de l'échantillon traité sur une colonne de cadmium traité au cuivre (Wood et *al.*, 1967).

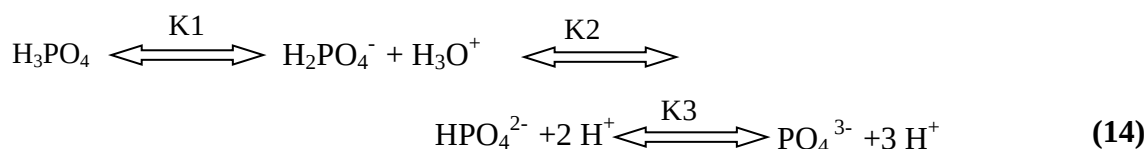


Le dosage des ions nitrites est fondé sur la réaction de Griess : la méthode a été ensuite appliquée aux analyses en milieu marin par Benschneider, et *al* (1952). Les ions nitrites forment un diazoïque avec la sulfanilamide (para-aminobenzènesulfamide) en milieu acide.

Le diazoïque ainsi formé réagit ensuite avec l'EDTA « N-(Naphtyl-1)-éthylène diamine » pour former un colorant azoïque rose qui absorbe à une longueur d'onde de 543nm.

2.1.4.2.1.2 Phosphates

Le phosphore minéral dissous dans l'eau de mer est essentiellement présent sous formes d'ions orthophosphates correspondant à la dissociation de l'acide orthophosphorique :



Compte tenu des valeurs du pH (8,2) et des différentes constantes d'acidité dans l'eau de mer (pK1=1,58; pK2=5,98; pK3=8,71), les formes prépondérantes sont HPO_4^{2-} et PO_4^{3-} (Millero et *al.*, 1992).

La concentration en orthophosphates dépend de phénomènes physiques (mélange, advection, diffusion) et biologiques (consommation par le phytoplancton, excrétion par le zooplancton) ou chimique (régénération par oxydation de la matière organique). Ainsi, en milieu océanique les teneurs sont généralement très faibles en surface et augmentent avec la profondeur au-dessous de la zone euphotique (Chifflet et *al.*, 2004). Les valeurs maximales observées dans l'océan naturel sont autour de 3,0 $\mu\text{mol/l}$.

➤ Principe de la méthode

Le dosage des orthophosphates dans l'eau de mer se fait par la réaction de Deniges (1920) *in* (Boulaïdid, 1987) selon la méthode de Murphy et Riley (1962). En milieu acide ($\text{pH} < 1$), les ions phosphates réagissent avec le molybdate d'ammonium pour former un complexe jaune : le phosphomolybdate d'ammonium. Ce complexe chimique est ensuite réduit par l'acide ascorbique. Le maximum d'absorption est mesuré à 885nm.

2.1.4.2.1.3 Silicates

Dans l'eau de mer, le silicium dissous se trouve à 95% sous forme d'acide orthosilicique (Si(OH)_4) (Aminot et *al.*, 1983). Cette forme réagit avec le molybdate d'ammonium en milieu acide pour former un complexe silicomolybdique qui sera réduit par l'acide ascorbique en un composé coloré bleu absorbant à 810 nm (Mullin et *al.*, 1955)

2.1.4.2.2 Etalonnage et calcul des concentrations des sels nutritifs

L'étalonnage est réalisé à l'aide d'une série de quatre standards d'eau de mer exempte (ou pauvre) de sels nutritifs de concentrations de 2, 5, 10 $\mu\text{mol/l}$, en plus d'un blanc (eau de mer) pour tracer une droite d'étalonnage, pour les échantillons de surface. Pour les échantillons les plus profonds, les standards ont pour concentrations 5, 8, 10 $\mu\text{mol/l}$ (Annexe 1).

➤ Courbe d'étalonnage des eaux profondes

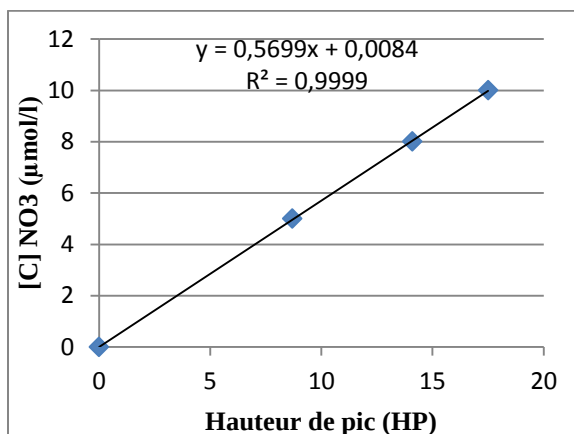


Figure 11: Courbe d'étalonnage des nitrates.

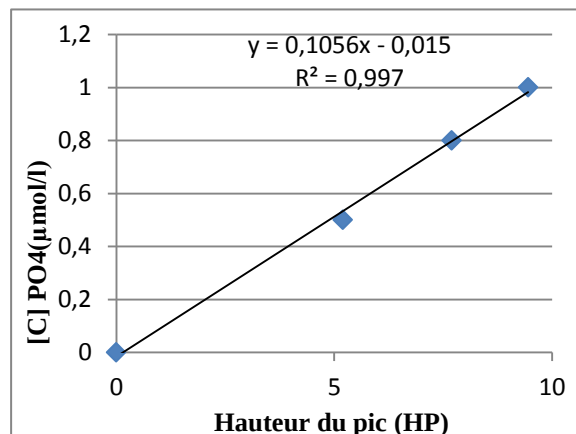


Figure 12 : Courbe d'étalonnage des phosphates.

➤ Courbe d'étalonnage des eaux de surfaces

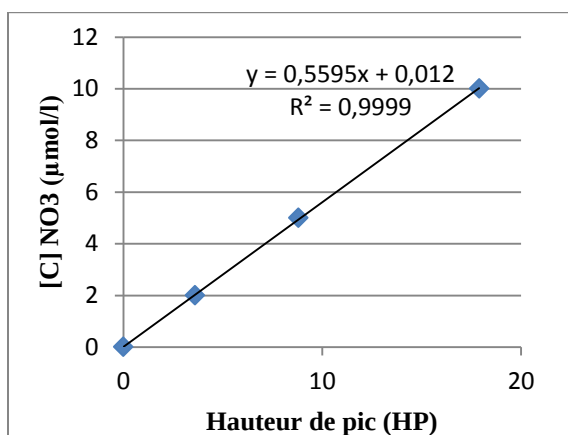


Figure 14 : Courbe d'étalonnage des nitrates.

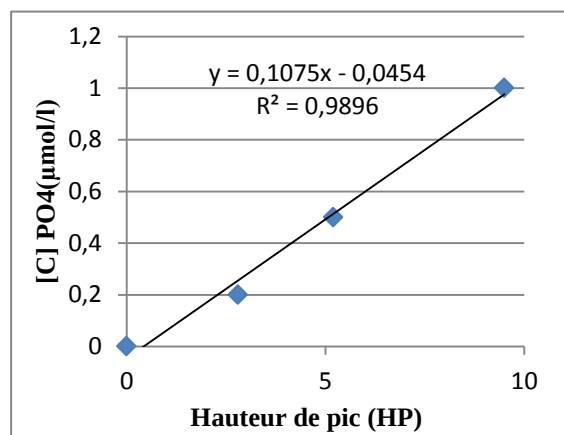


Figure : 13 Courbe d'étalonnage des phosphates.

➤ Calcul des concentrations

Le calcul des concentrations des différents sels nutritifs est fait comme suite :

$$[C] = (DO - \text{effet de sel}) * f \quad (15)$$

Où,

[C] : La concentration du sel nutritif (nitrate, phosphate, silicate) ;

DO : Densité optique (hauteur du pic de l'échantillon) ;

F : La pente de la droite d'étalonnage.

2.1.4.2.3 Tests de reproductibilité

Le prélèvement des échantillons pour l'analyse de la reproductibilité a été fait en surface, au fond et au niveau intermédiaire, à raison de deux prélèvements à la profondeur choisie.

L'analyse de la reproductibilité des échantillons a révélé une très bonne reproductibilité pour les sels nutritifs dosés avec des écarts types très faibles (Annexe 2).

2.1.4.3 L'Oxygène dissous dans l'eau de mer

2.1.4.3.1 Concentration de saturation

L'équilibre entre l'atmosphère et l'eau de mer en oxygène (comme les autres gaz) est fonction de la température et de la salinité. Pour déterminer la concentration de saturation des eaux marines, plusieurs équations ont été développées. La plus récente est celle de Benson et Krause (1984):

$$\ln C = A + \left(\frac{B}{T}\right) + \left(\frac{C}{T^2}\right) + \left(\frac{D^3}{T^3}\right) + \left(\frac{E}{T^4}\right) - S * \left(F + \left(\frac{G}{T}\right) + \left(\frac{H}{T^2}\right)\right) \quad (16)$$

Où Ln est logarithme népérien, C la concentration en $\mu\text{mole/Kg}$, T la température absolue (thermodynamique) à base de la température potentielle ($^{\circ}\text{C}$), S la salinité (PSU) et A à H sont des constantes.

$$A = -135,29996$$

$$E = -8,621061 \times 10^{11}$$

$$B = 1,572288 \times 10^5$$

$$F = 0,020573$$

$$C = -6,637149 \times 10^7$$

$$G = -12,142$$

$$D = 1,243678 \times 10^{10}$$

$$H = 2,363 \times 10^3$$

La valeur de contrôle est $C=347,884225$ avec une salinité de 35 psu et une température absolue de 273,15 K.

2.1.4.3.2 Le déficit d'oxygène dissous dans les eaux profondes (UAO)

Pour une eau de mer profonde quelconque, on peut facilement déterminer la quantité de l'oxygène dissous utilisée par l'oxydation de la matière organique depuis la formation de cette masse d'eau. Ceci par la soustraction de la concentration d'oxygène dissous observée (mesurée) ($O_{2 \text{ obs}}$) de la concentration d'oxygène de saturation ($O_{2 \text{ sat}}$). La quantité calculée ainsi est appelée par les océanographes chimistes '**Utilisation Apparente de l'Oxygène (UAO)**'; ou en anglais '*Apparent Oxygen Utilisation (AOU)*'.

$$UAO = O_{2 \text{ sat}} - O_{2 \text{ obs}} \quad (17)$$

Ici, le terme apparent est utilisé pour avertir que cette utilisation n'est pas très exacte, Car les eaux en quittant la surface ramènent vraisemblablement une concentration de sursaturation supérieure à celle de la saturation. En outre il y a l'effet de mélange entre les masses d'eau de températures différentes.

2.2 La campagne MEDIPROD V

La campagne MEDIPROD V s'est déroulée entre le 27 Mai et 26 juin 1986 au niveau du bassin Algérien à bord du navire « Le Suroît ». La zone prospectée s'étend entre 36°N et 40°N de latitude et entre 0°E et 5°E de longitude. Les objectifs de cette campagne sont les suivants :

- L'étude de la circulation générale en Méditerranée occidentale.
- L'étude de la stabilité des courants côtiers et de la dynamique des tourbillons associés.
- L'étude des relations entre la production pélagique et les structures hydrodynamiques occidentales de moyenne échelle.

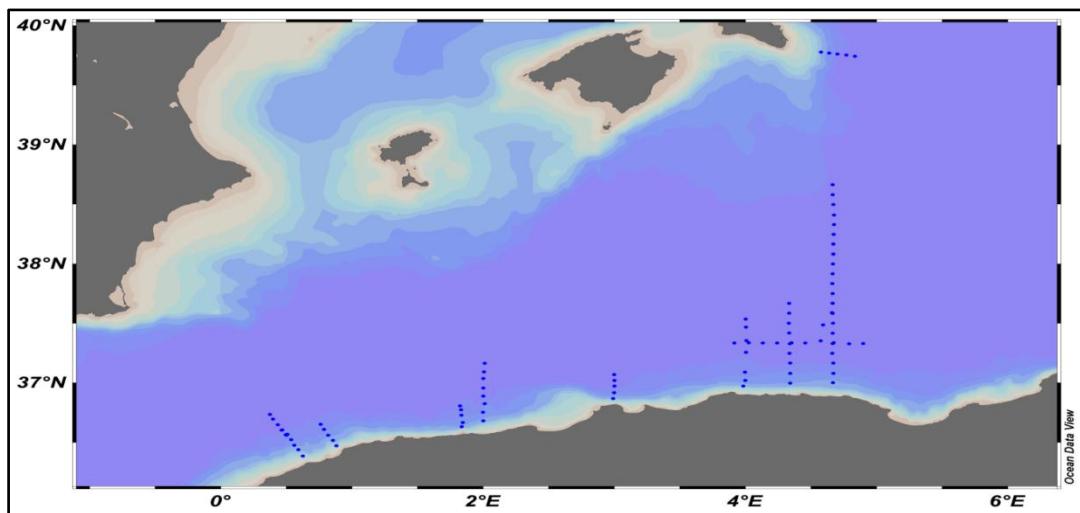


Figure 15: Localisation des stations de la campagne MEDIPROD V.

2.3 La campagne MEDIPROD VI

MEDIPROD VI peut être considérée comme étant un prolongement directe de la campagne MDIPROD V. Son thème inclut :

- L'étude de la relation entre les structures de moyenne échelle engendrées par la dynamique du courant Algérien et les caractéristiques chimiques et biologiques qui en découlent.
- L'estimation des taux de productivité et de régénération et leurs conséquences pour l'ensemble du bassin Algérien.

Pour cela, des mesures chimiques et biologiques intensives ont été associées à une analyse hydrologique très fine.

Les travaux en mer se sont déroulés entre le 5 juin et le 2 juillet 1990 en raison de la présence d'un gradient thermique important pendant l'été qui permet de repérer facilement les tourbillons sur les cartes thermiques. Ces travaux ont été réalisés à bord du navire océanographique « J. Charcot ». La zone prospectée s'étend entre 36°36'N et 40°N de latitude et entre 1° E et 5° E de longitude. Les prélèvements ont été effectués avec une rosette *General Oceanics*, munie de 12 bouteilles d'une capacité de 12 litres chacune. Cette rosette était couplée à une bathysonde *CTDO Sea Bird* et à une sonde fluorimétrique *Sea Teach* qui fournissaient des profils continus de température, de salinité, d'oxygène dissous et de fluorescence en fonction de la profondeur.

Les limites de ces prélèvements varient suivant les stations, de 200 à 1000 m de profondeur. Dans les premiers 200 m, l'échantillonnage vertical a été maintenu très serré. Les sels nutritifs ont été analysés par la méthode colorimétrique automatisée sur chaîne *Technicon* (autoanalyseur-II) à bord du navire.

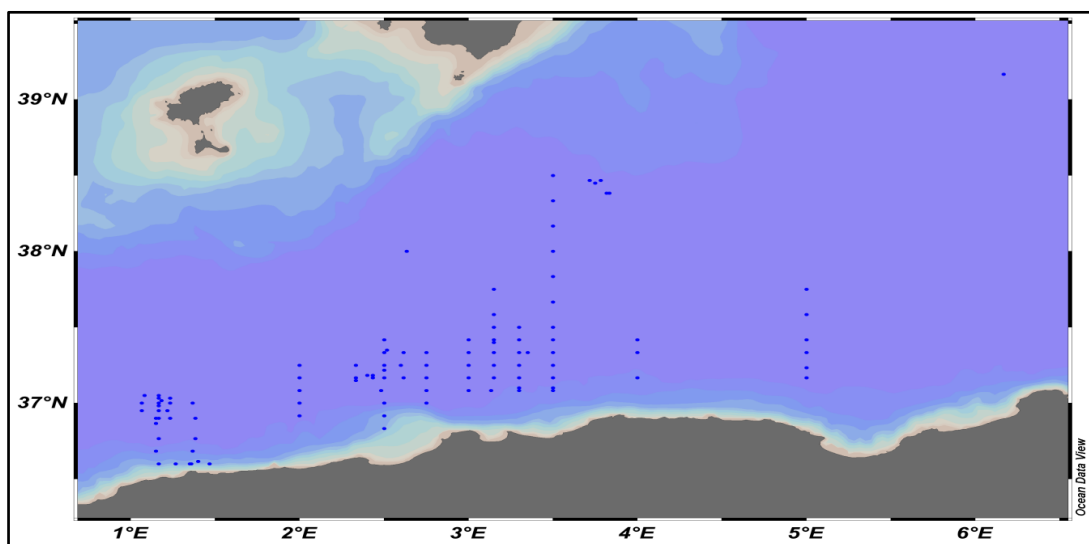


Figure 16: Localisation des stations de la campagne MEDIPROD VI.

Résultats et discussion

3 Résultats et discussions

La sonde CTD fournit des données de différents paramètres (température, salinité, fluorescence, oxygène dissous) chaque 1 m (chaque seconde) lors de la descente de la rosette le long de la colonne d'eau. Ces données sont enregistrées dans un fichier CTD.

3.1 Etude des paramètres physicochimiques

3.1.1 Variation de la température potentielle

De façon générale, les températures mesurées présentent un gradient décroissant de la surface vers le fond, avec des valeurs qui reflètent la période estivale en relation avec les conditions météorologiques. Les valeurs les plus élevées (entre 22 et 27 °C) sont enregistrées en surface (fig. 17). Ces valeurs décroissent rapidement pour atteindre les 15 à 16 °C sous la couche de mélange (située entre 30 et 40 m de profondeur). Au-delà de cette profondeur, les valeurs de température continuent à diminuer jusqu'à atteindre 12,9 °C au fond, au centre du bassin algérien.

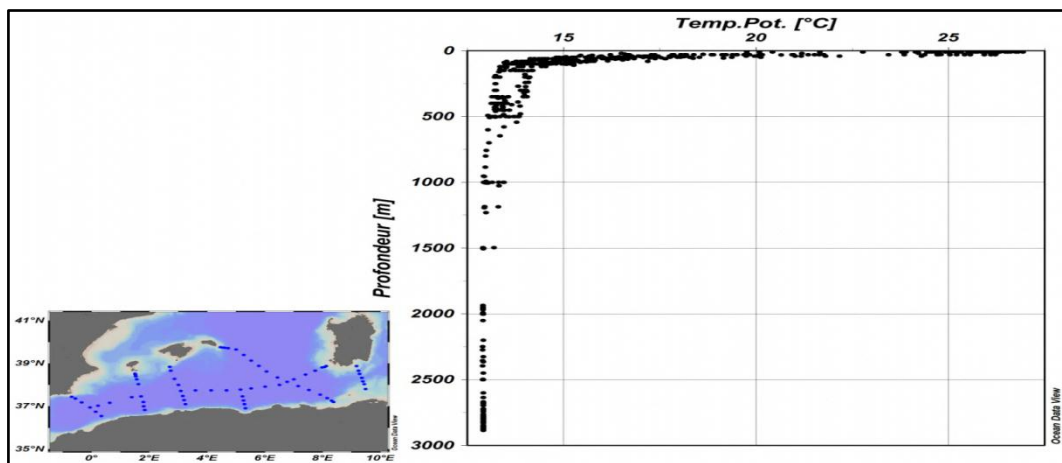


Figure 17: Profil vertical de la température potentielle au niveau du bassin Algérien.

Les deux sections verticales (fig. 18 et 19), réalisées pour les transects Sardaigne - mer d'Alboron et Minorque - El Kala, illustrent une homogénéité des valeurs de la température en surface, et la stabilité de la thermocline autour de 70 à 90 m de profondeur, exception faite au niveau de la longitude 6 °E où on relève un approfondissement de la thermocline vers 200 m de profondeur, ce qui pourrait être dû à une plongée des eaux de surfaces.

La figure 20, représentant la distribution horizontale de la température en surface, montre des valeurs inférieures à 24 °C le long de la côte algérienne, ceci est caractéristique du courant Algérien dont les eaux longent l'ensemble du littoral Algérien. Cette distribution

est vraisemblablement en relation avec les eaux atlantiques plus fraîches qui forment le front Almeria-Oran. Tandis que les valeurs les plus élevées sont enregistrées principalement au large du bassin (latitude supérieure à 37 °N) dépassant les 26 °C.

Les figures 21 et 22 représentent la distribution horizontale de la température à 50 et 100 m de profondeur où on peut déceler plus clairement deux zones bien distinctes. La première est située entre 38 °N de latitude et 6 °E de longitude caractérisée par des températures chaudes qui peuvent atteindre 21 °C à 50 m et 15 °C à 100 m de profondeur. Tandis que la deuxième zone, située entre 2 °E et 38 °N, est caractérisée par des températures plus ou moins froides, entre 15 et 16 °C à 50 m de profondeur et entre 13,5 et 14 °C à 100 m de profondeur. A 200 m de profondeur (fig. 23), les valeurs de température se stabilisent autour de 14 et 13,5 °C. De même qu'à 400 m de profondeur (fig. 24) la température reste au voisinage de 13,5 °C, caractérisant l'eau levantine intermédiaire (LIW). Au-delà de cette profondeur les valeurs de température décroissent pour atteindre un minimum autour de 12,95 °C (fig. 25).

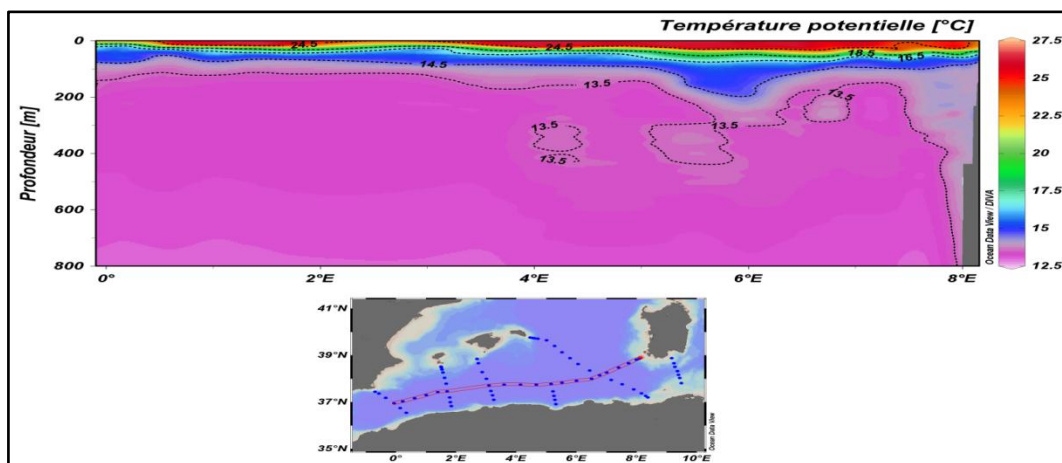


Figure 18: Section verticale de variation de la température potentielle (transect Sardaigne – mer d’Alboran).

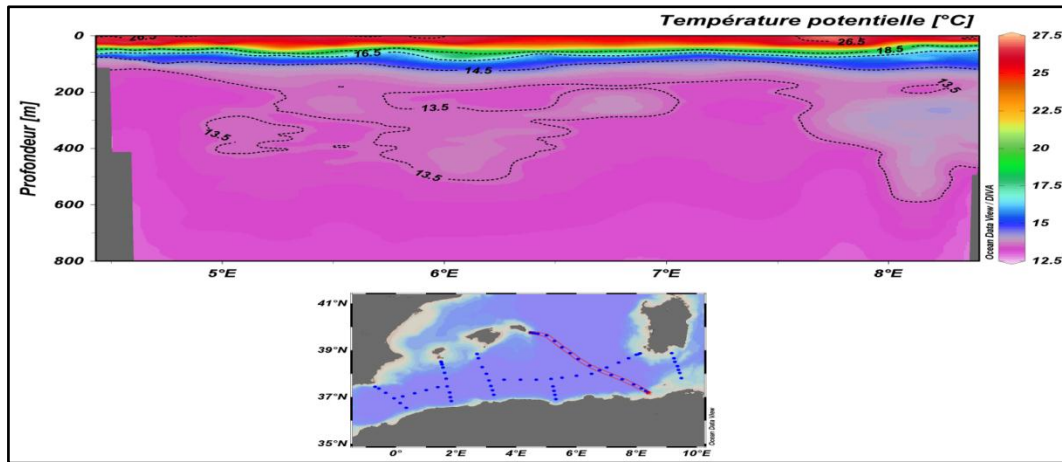


Figure 19: Section verticale de variation de la température potentielle (transect Minorque – El Kala).

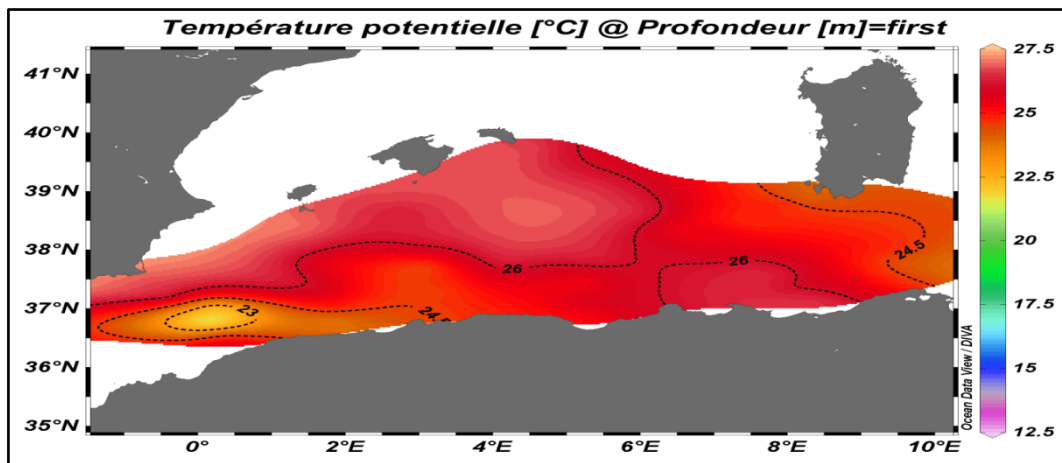


Figure 20: Distribution spatiale de la température potentielle en surface.

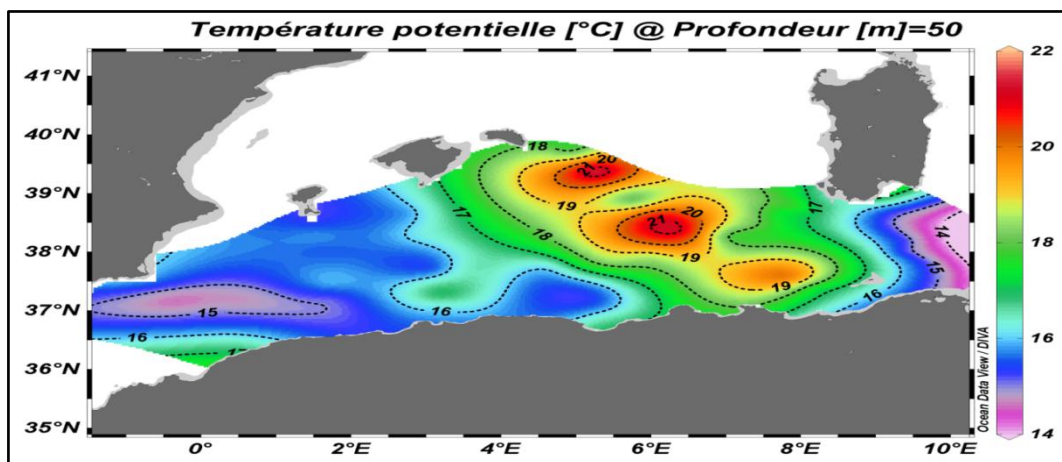


Figure 21: Distribution horizontale de la température potentielle à 50m de profondeur.

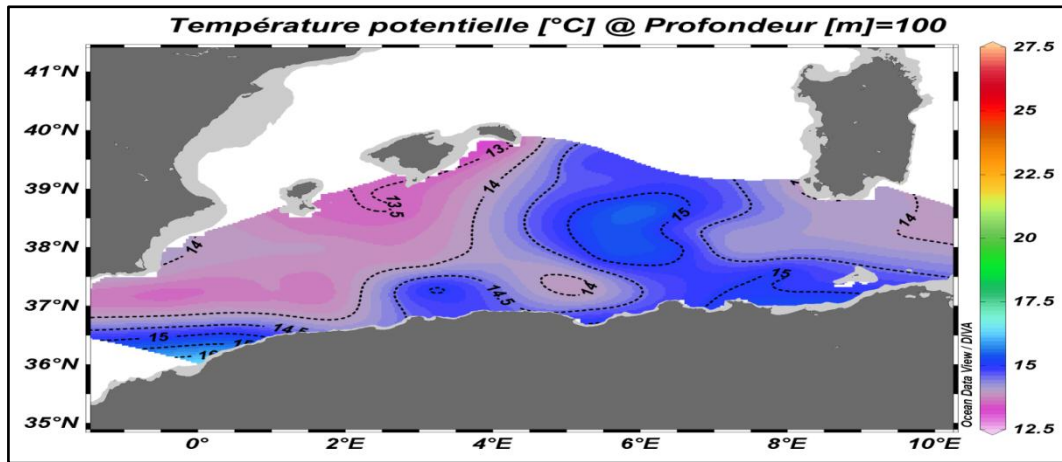


Figure 22: Distribution horizontale de la température potentielle à 100m de profondeur.

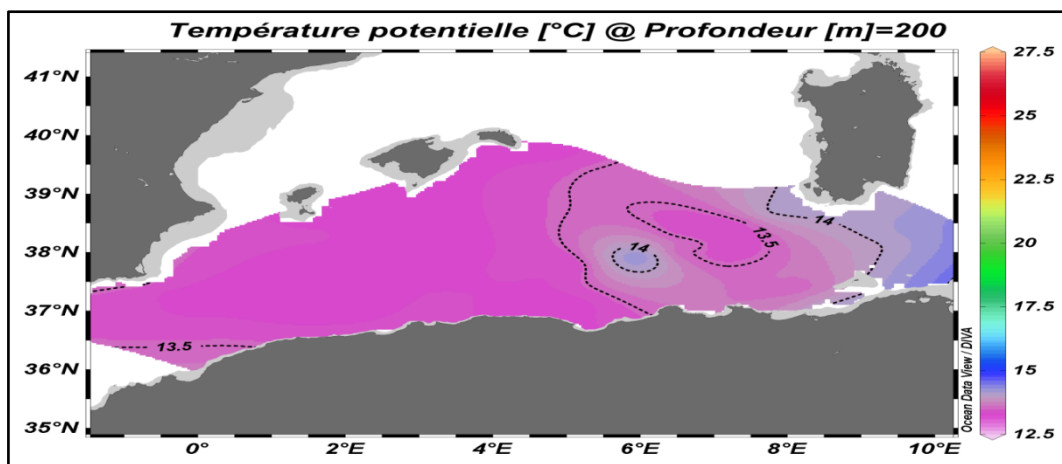


Figure 23: Distribution horizontale de la température potentielle à 200m de profondeur.

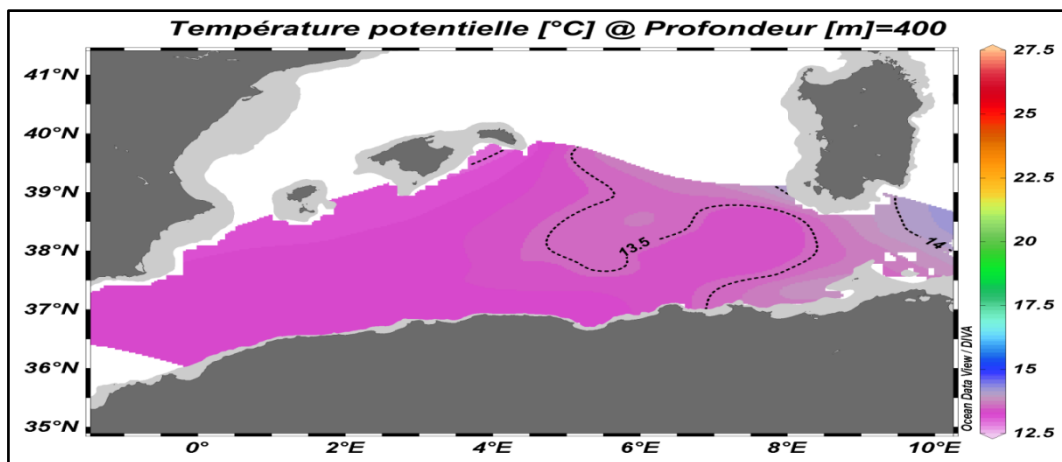


Figure 24: Distribution horizontale de la température potentielle à 400 m de profondeur.

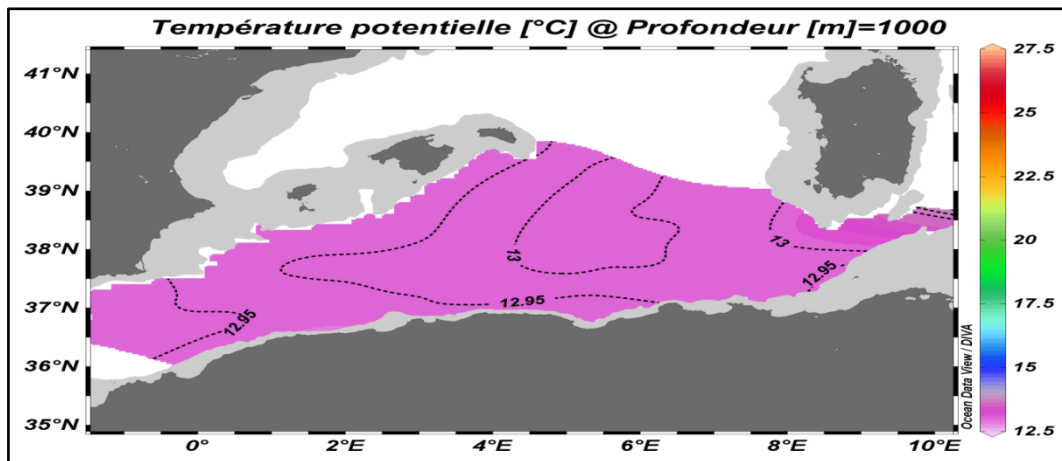


Figure 25: Distribution horizontale de la température potentielle à 1000 m de profondeur.

3.1.2 Variation de la salinité

Les valeurs de salinité au niveau du bassin Algérien durant la campagne SOMBA GE-2014 sont représentées dans les figures de 26 à 34. Comme observé pour la température, la salinité mesurée présente une stratification et un gradient croissant de la surface vers le fond (fig. 26). En effet, les salinités les plus faibles sont retrouvées en surface avec des valeurs allant de 36,5 à 37,5 psu caractéristiques de la MAW (eau atlantique modifiée). Ces valeurs augmentent pour atteindre un maximum (valeurs supérieures à 38,5 psu) entre 300 et 500 m de profondeur caractérisant la LIW (l'eau levantine intermédiaire), la salinité décroît ensuite légèrement en dessous de la LIW pour atteindre des valeurs de 38 psu indiquant la présence de la WMDW (l'eau profonde de la méditerranée occidentale).

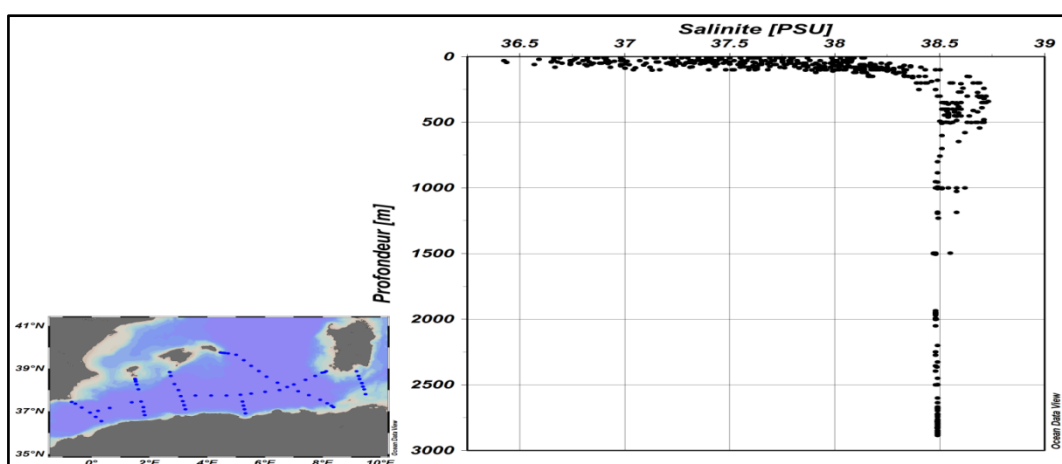


Figure 26: Profil vertical de salinité au niveau du bassin Algérien.

Les deux transects choisis pour représenter la distribution verticale de la salinité sont données dans les figures 27 et 28. Le premier transect (Sardaigne - mer d'Alboron), montre un approfondissement des isohalines 37,5 et 38 jusqu'à une profondeur 200 m à la longitude 6 °E, ces résultats corroborent ceux trouvés pour la température. Au niveau de la longitude 1°E, ces deux isohalines remontent vers une profondeur inférieure à 100 m, de même, une faible valeur (36,5) a été enregistrée à la longitude 0 °E près des côtes Algériennes. Les valeurs de salinité varient peu à des profondeurs supérieures à 300 m.

Pour le deuxième transect (Minorque - El Kala), les faibles valeurs de salinité sont enregistrées toujours au niveau de la surface et plus précisément près des côtes, là où l'effet des apports terrigènes est le plus ressenti. Pour les grandes profondeurs, les valeurs de la salinité suivent la même variation comme pour le premier transect.

La distribution spatiale de la salinité en surface est donnée en figure 29, où on note des valeurs de 36,5 à 37 le long de la côte algérienne caractérisant l'eau Atlantique qui coule le long de celle-ci, ce résultat est en concordance avec celui de la température. Alors que les valeurs de 37,5 sont enregistrées au centre du bassin, tandis que les valeurs les plus élevées sont relevées à extrême est à la longitude 10 °E et au nord-ouest avec des valeurs de 38. Les figures 30 et 31 représentent la distribution spatiale de la salinité à 50 et 100 m de profondeur respectivement, mettant en évidence deux zones bien distinctes. La première entre 6 °E et 38 °N caractérisée par des salinités de 37 et 37,6 à 50 et 100 m respectivement. Alors que la deuxième zone, située entre 39 et 37 °N de latitude et 2 et 4°E de longitude est caractérisée par des salinités supérieures à 38, notant que cette zone à 100 m est plus vaste qu'à 50 m de profondeur. Dans la figure 32, les valeurs de la salinité sont presque homogènes à l'exception la zone de 6 °E, où on a des valeurs inférieures à 38, tandis que des valeurs de 38,75 sont enregistrées à l'extrême est à l'entrée du détroit de Sicile. Au-delà de cette profondeur les valeurs de salinité restent plus ou moins constantes entre 38,55 et 38,7 à 400 m de profondeur (fig. 33) et entre 38,48 et 38,5 à 1000 m de profondeur (fig. 34).

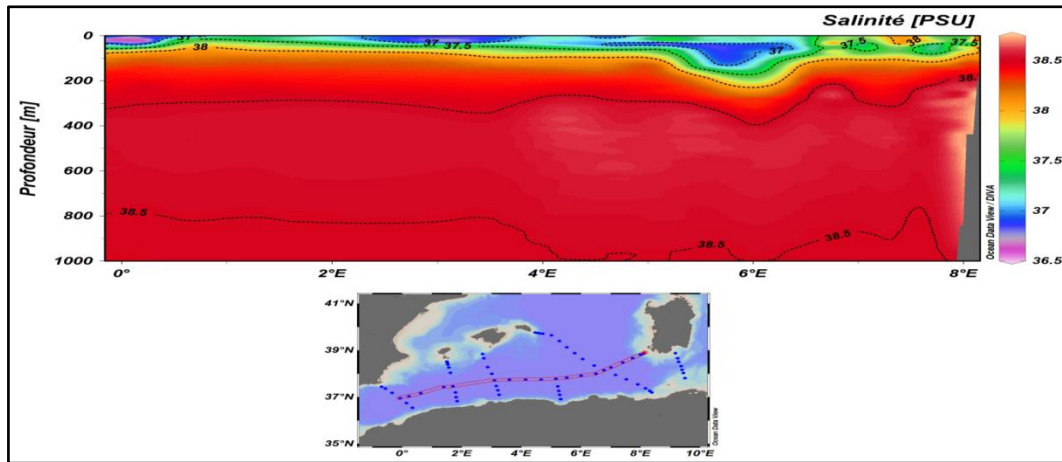


Figure 27: Section verticale de variation de la salinité (transect Sardaigne – mer d'Alboran).

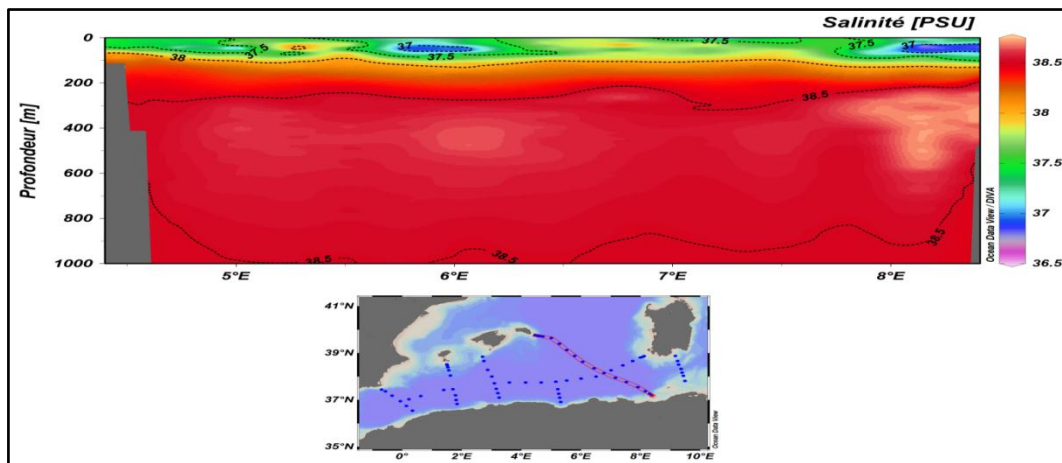


Figure 28: Section verticale de variation de la température (transect Minorque – El Kala).

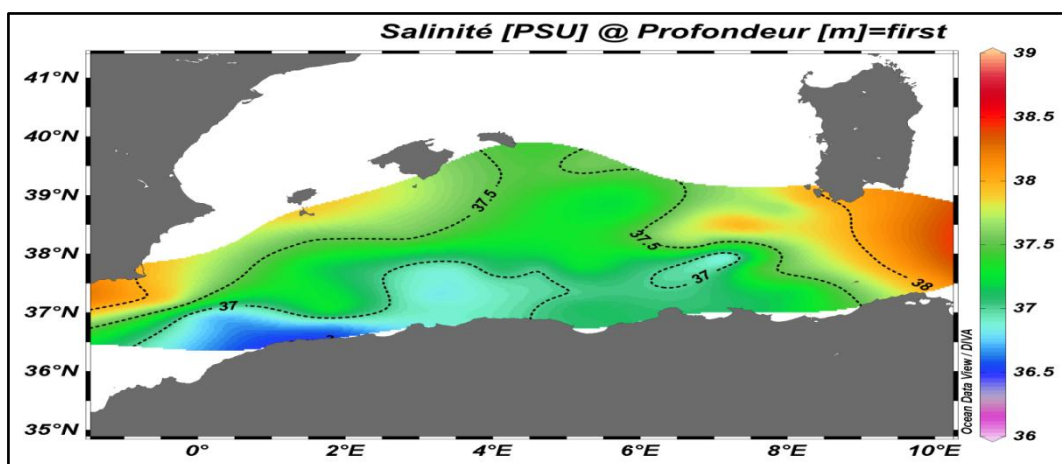


Figure 29: Distribution spatiale de la salinité en surface au niveau du bassin Algérien.

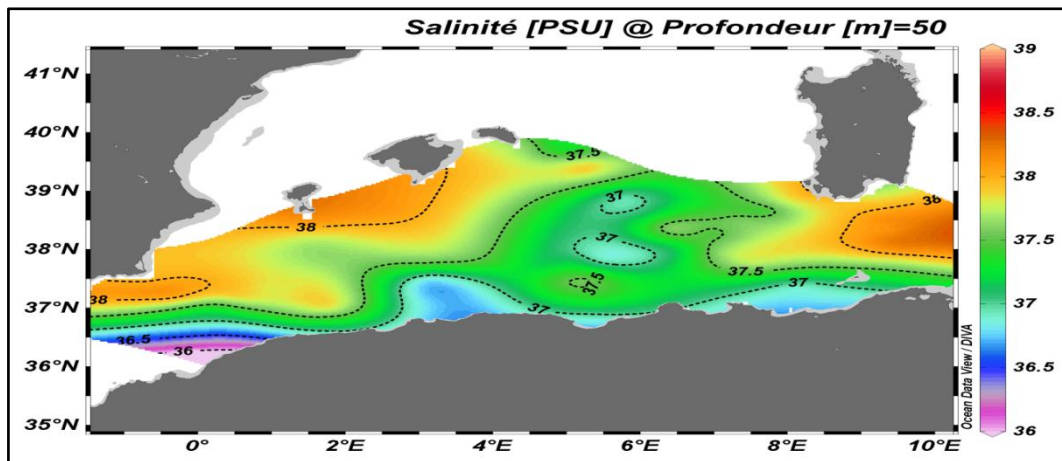


Figure 30: Distribution spatiale de la salinité à 50m de profondeur.

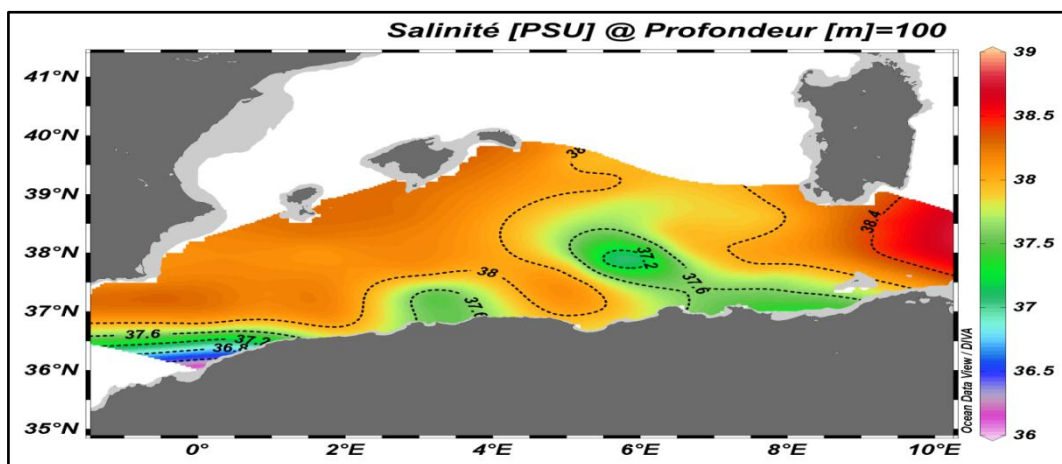


Figure 31: Distribution spatiale de la salinité à 100m de profondeur.

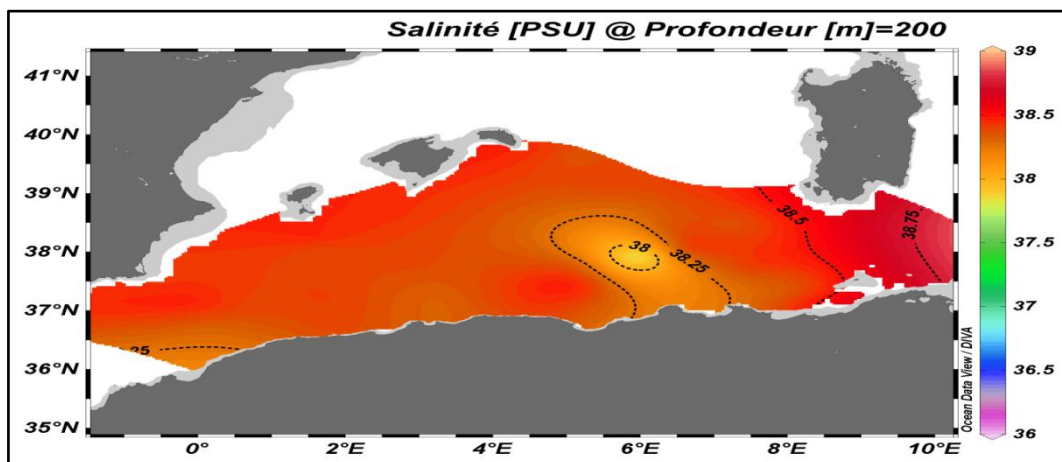


Figure 32: Distribution spatiale de la salinité à 200m de profondeur.

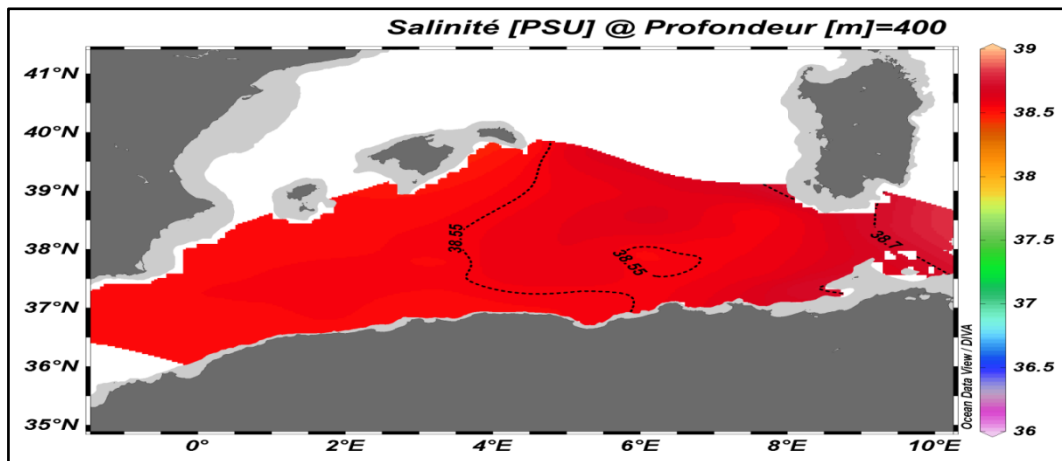


Figure 33: Distribution spatiale de la salinité à 400m de profondeur.

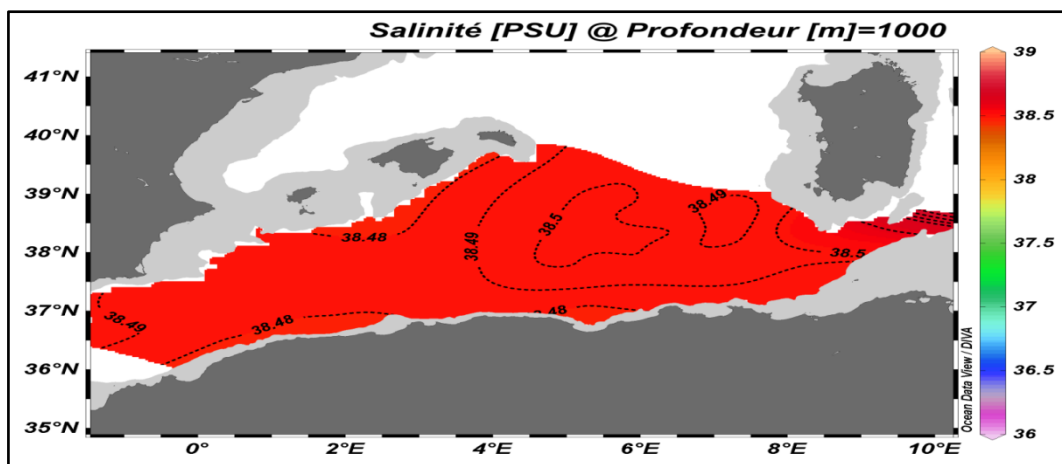


Figure 34: Distribution spatiale de la salinité à 1000m de profondeur.

3.1.3 Digramme Température Potentielle – Salinité

La relation température potentielle (θ) - salinité (S) permet d'identifier les différentes masses d'eau en présence. L'étude du diagramme θ -S au sein du bassin Algérien (fig. 35) met clairement en évidence trois masses d'eaux :

- La première masse d'eau est l'Eau Atlantique Modifiée (MAW) dont la salinité est inférieure ou égale à 38 psu, cette masse d'eau se trouve en surface (son épaisseur ne dépasse guère 200 m) et est clairement affectée par le cycle thermique, ce qui se traduit par une gamme importante de variation des températures avec une amplitude d'environ 11 °C entre la surface et 200 m de profondeur.

- La deuxième masse d'eau que l'on distingue relativement bien est l'Eau Levantine Intermédiaire ou LIW, que l'on trouve en-dessous de la MAW, entre 300 et 600 m de profondeur, caractérisée par des maxima de température et de salinité allant de 14 °C et 38,75 près du détroit de Sicile à 13,3 °C et 38,55 près du détroit de Gibraltar.
- La troisième eau type présente dans notre diagramme θ -S est l'Eau Profonde (WMDW) qui se forme principalement en hiver au large du Golfe du Lion sous l'effet du Mistral et la tramontane (vents violents, froids et secs, du secteur nord-ouest), cette masse d'eau se caractérise par une température de 12,9 °C et une salinité de 38,45.

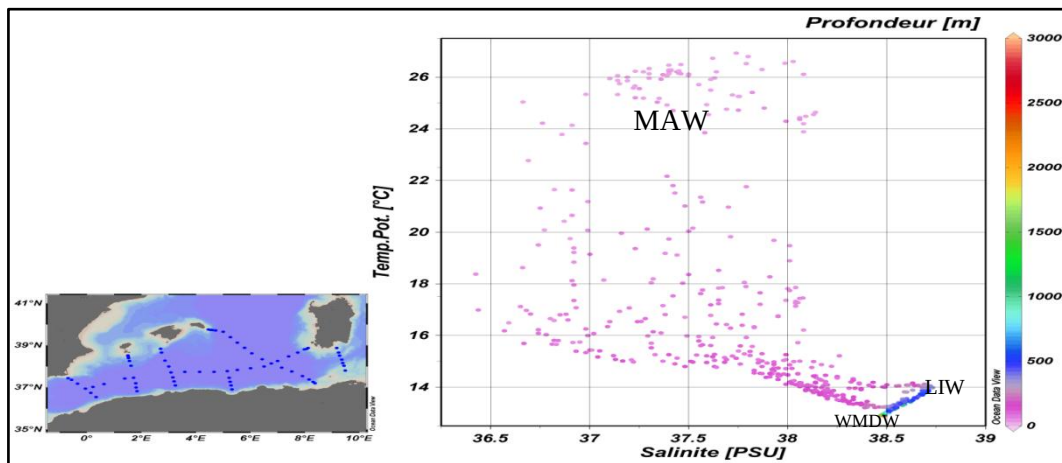


Figure 35: Diagramme Température-Salinité (θ -S).

3.1.4 Variation de la concentration de chlorophylle dans le bassin Algérien

3.1.4.1 Profil vertical de la fluorescence

La mesure de la chlorophylle par fluorimétrie introduite en océanographie par Lorenzen (1966) présente deux avantages incontestables par rapport à la technique d'extraction : simplicité et rapidité. Depuis elle a été largement employée pour cartographier la chlorophylle (Armstrong *et al.*, 1967 ; Flemer, 1969) ou étudier sa distribution verticale dans divers milieux naturels (Voituriez *et al.*, 1974).

Au niveau du bassin Algérien, les eaux de surface présentent de faibles valeurs voir nulles de la fluorescence. Cela peut être dû à deux raisons : la première est l'appauvrissement des eaux de surface en sels nutritifs, et la deuxième, l'échappement des espèces phytoplanctoniques aux rayonnements solaires concentrées dans les eaux de surface. Le

DCM (depth chlorophyll maximum) est entre 50 et 80 m de profondeur correspond au maximum d'activité phytoplanctonique. Le Maximum de fluorescence est de 2,57 UF à 52 m de profondeur à la station 19 du leg 2 (fig. 36).

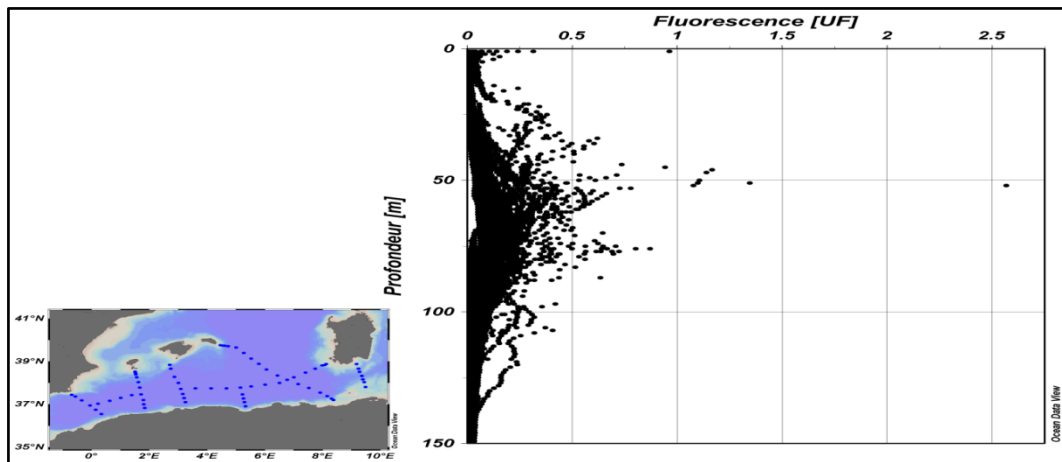


Figure 36: Profil vertical de fluorescence au niveau du bassin Algérien.

3.1.4.2 Distribution verticale de la fluorescence

Six sections verticales de représentation de la fluorescence ont été faites :

- La première section est entre la Sardaigne et la Tunisie (fig. 37) où le maximum de la fluorescence est entre 50 et 80 m de profondeur avec un pic particulier autour de la latitude 38,3° N avec une valeur maximale de fluorescence de 0,66 UF à 76 m de profondeur
- La deuxième section est entre Minorque et El Kala (fig. 38) où on constate toujours que le maximum de fluorescence est entre 50 et 80 m de profondeur.
- La troisième section est entre Mallorca et Alger avec une zone de forte concentration au sud du transect au-dessous de 38 °N (fig. 39).
- Le quatrième transect est entre Ibiza et Tipaza (fig. 40) où la distribution de la fluorescence est presque semblable aux autres sections.
- La cinquième section est entre l'Espagne et Ténès, dans ce transect on constate que le DCM est situé un peu plus en surface par rapport aux autres transect (fig. 41).
- La dernière section est entre la Sardaigne et mer d'Alboran donne une vue globale de la distribution de la fluorescence au niveau du bassin algérien, avec un DCM situé entre 50 et 80 m de profondeur (fig. 42).

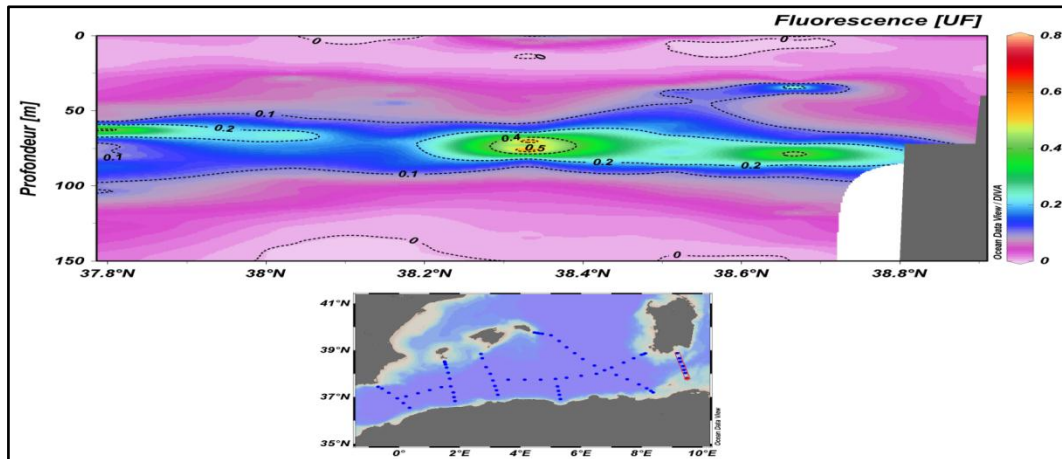


Figure 37: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Sardaigne-Tunisie).

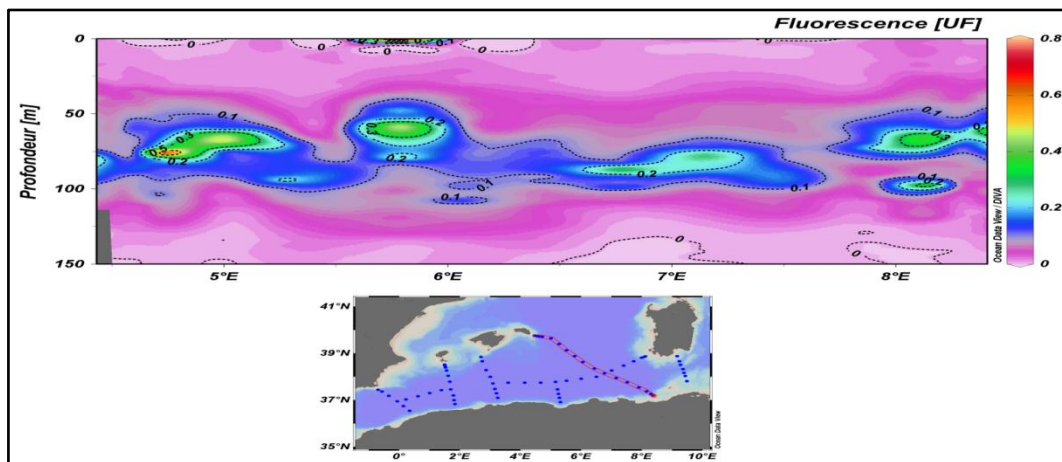


Figure 38: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Minorque – El Kala).

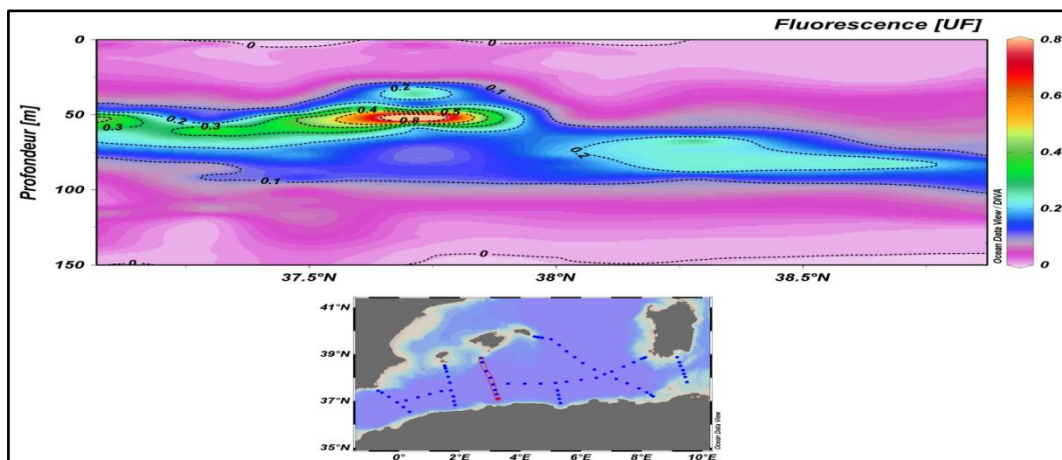


Figure 39: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Mallorca-Alger).

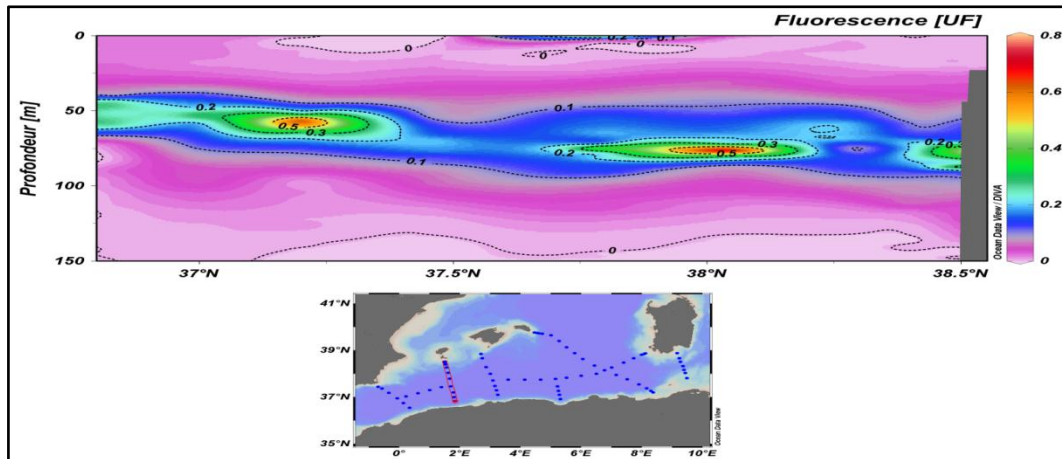


Figure 40: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Ibiza-Tipaza).

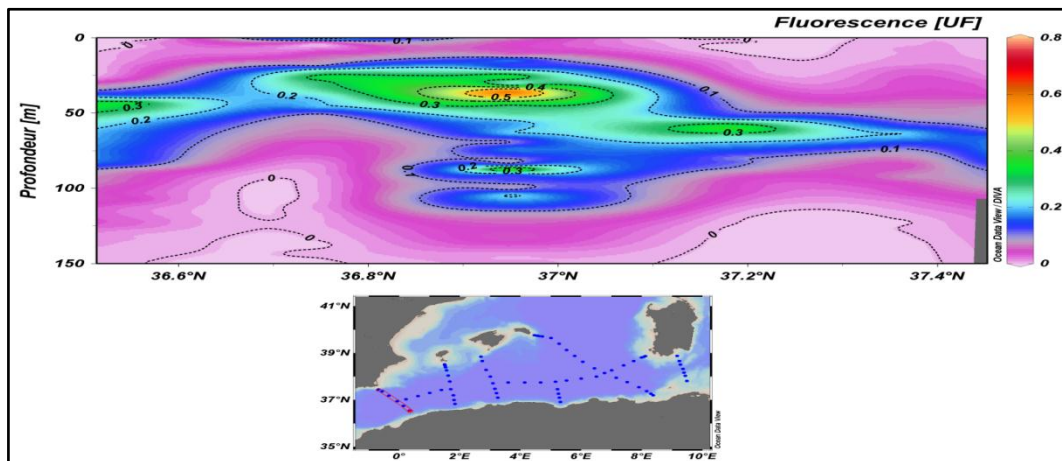


Figure 41: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Espagne-Ténès).

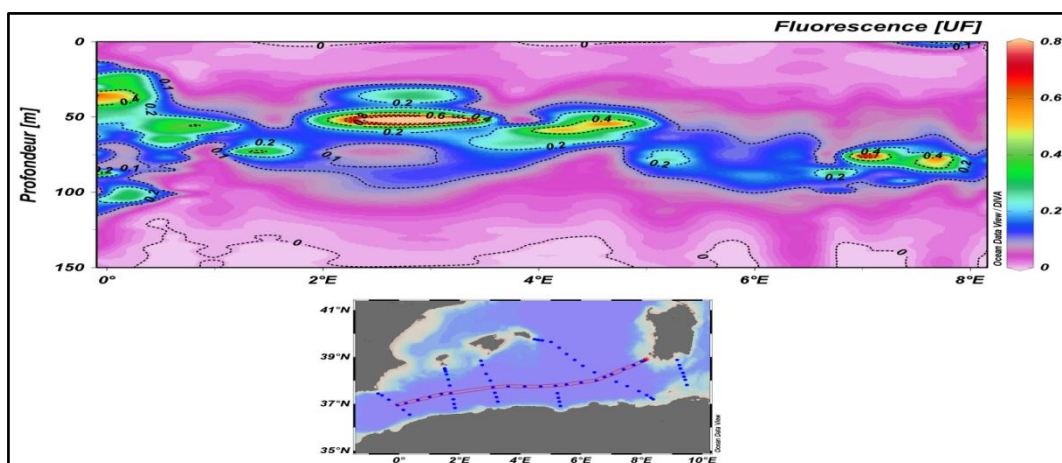


Figure 42: Section verticale de variation de la fluorescence (transect Sardaigne – mer d’Alboran).

3.1.4.3 Distribution horizontale de la fluorescence

La distribution spatiale de la fluorescence permet de cartographier les zones à forte concentration en chlorophylle. Pour cela trois cartes de distribution horizontale ont été faites pour illustrer la répartition de la fluorescence au niveau du bassin algérien.

- La première carte est à 40 m de profondeur (fig. 43), sur laquelle on constate qu'il y a de très faibles concentrations en chlorophylle voire nulle sur tout le bassin algérien à l'exception en extrême Ouest du bassin où des valeurs considérables en fluorescence (0,4 UF) qui peut être dû aux Eaux Atlantiques nouvellement entrées par le détroit de Gibraltar plus ou moins riches que les Eaux Méditerranéennes.
- La deuxième carte est à 60 m de profondeur (fig. 44) correspond au DCM sur la plupart des stations échantillonnées pendant la campagne, avec une zone très marquée au large des côtes algéroises colorée en vert.
- Sur la troisième carte (fig. 45), la distribution de la fluorescence est concentrée autour de la Sardaigne marquée sur la carte par une zone de couleur verte.

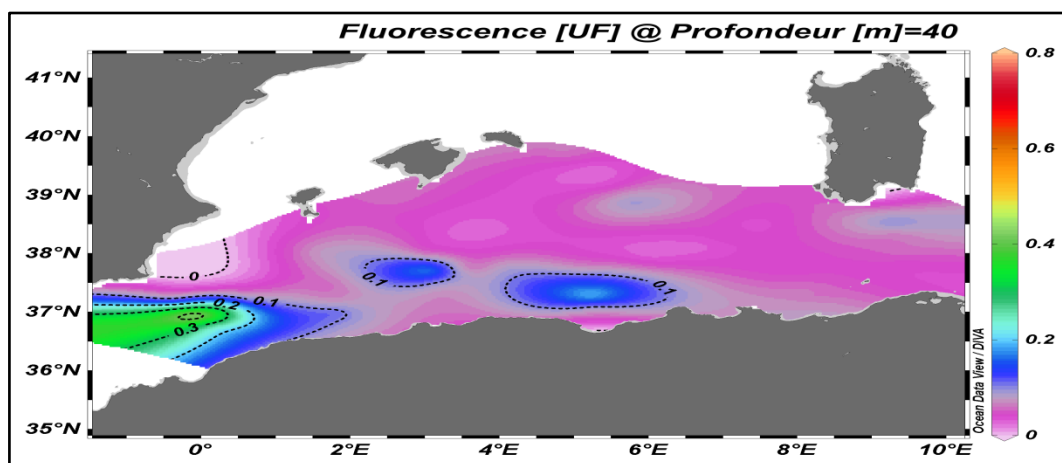


Figure 43: Distribution spatiale de la fluorescence à 40m de profondeur.

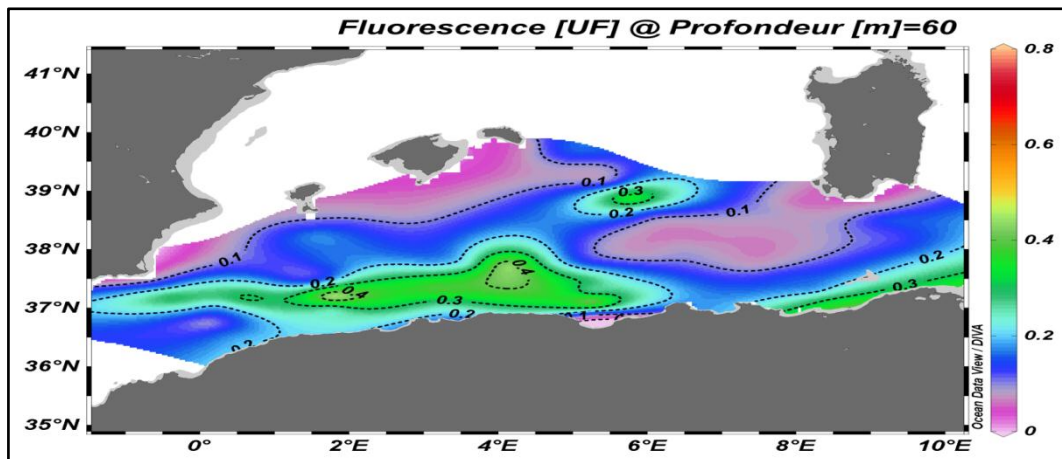


Figure 44: Distribution spatiale de la fluorescence à 60m de profondeur.

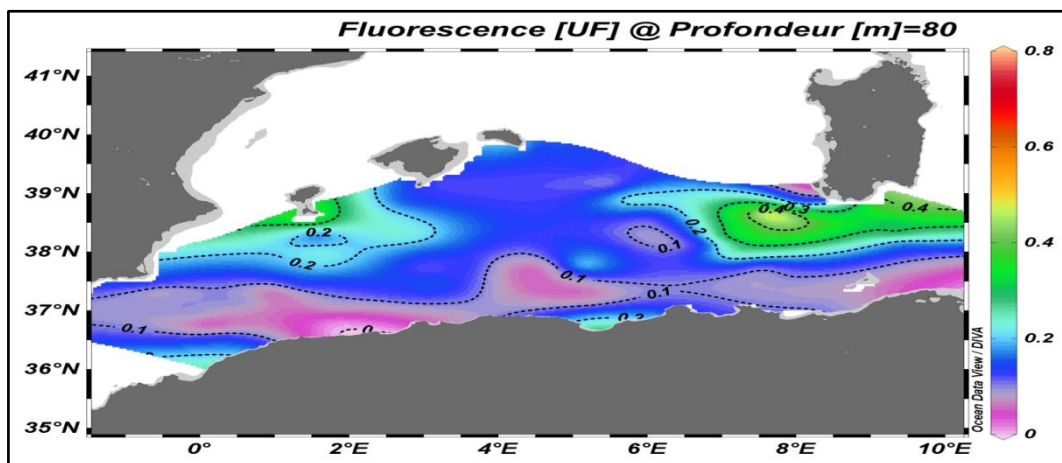


Figure 45: Distribution spatiale de la fluorescence à 80 m de profondeur.

3.1.5 Variation de l'oxygène dissous au niveau du bassin Algérien

Le profil vertical de l'oxygène dissous montre une distribution assez classique et normale (fig. 46). Les eaux superficielles sont nettement sursaturées en oxygène dissous en raison de l'activité photosynthétique et de l'agitation des eaux de surface. La concentration maximale relevée est de $298,57 \mu\text{mol/l}$. Cette concentration détient la sursaturation maximale observée dans la station 2 à 10 m de profondeur. Cette sursaturation est de $76,02 \mu\text{mol}$ ce qui correspond à 25,46 % (fig. 47 et fig. 48). La sursaturation moyenne pour toutes les données est de $21,26 \mu\text{mol/l}$, ce qui correspond à 8,22 %. En dessous de la zone photosynthétique (en dessous de la profondeur de compensation), l'oxygène dissous enregistre des déficits dus à son utilisation dans les processus oxydatifs, notamment l'oxydation de la matière organique. Ces déficits représentent l'UAO (Utilisation Apparente de l'Oxygène dissous) et sont observés le long de toute la colonne d'eau, mais

surtout au niveau du minimum d'oxygène où on enregistre pour ce paramètre la valeur maximal de 95,20 $\mu\text{mol/l}$ à 400 m de profondeur.

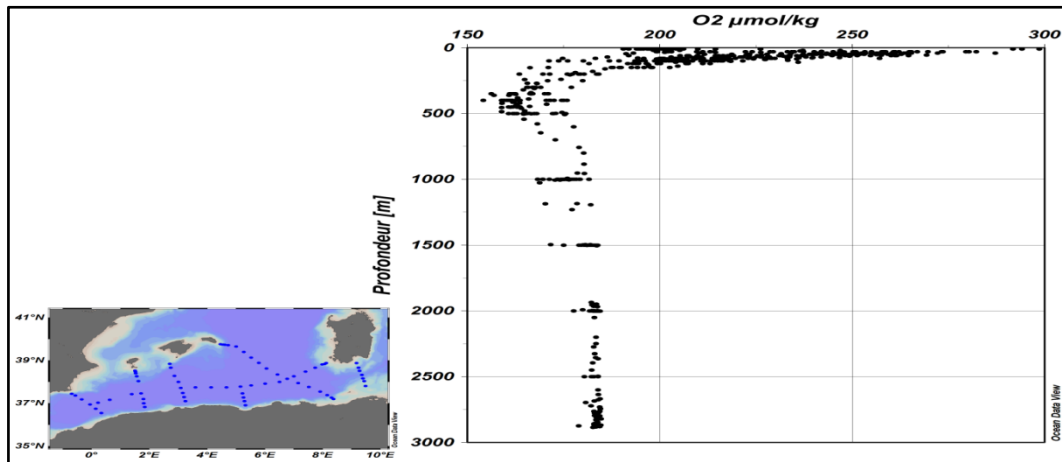


Figure 46: Profil vertical de l'oxygène dissous au niveau du bassin Algérien.

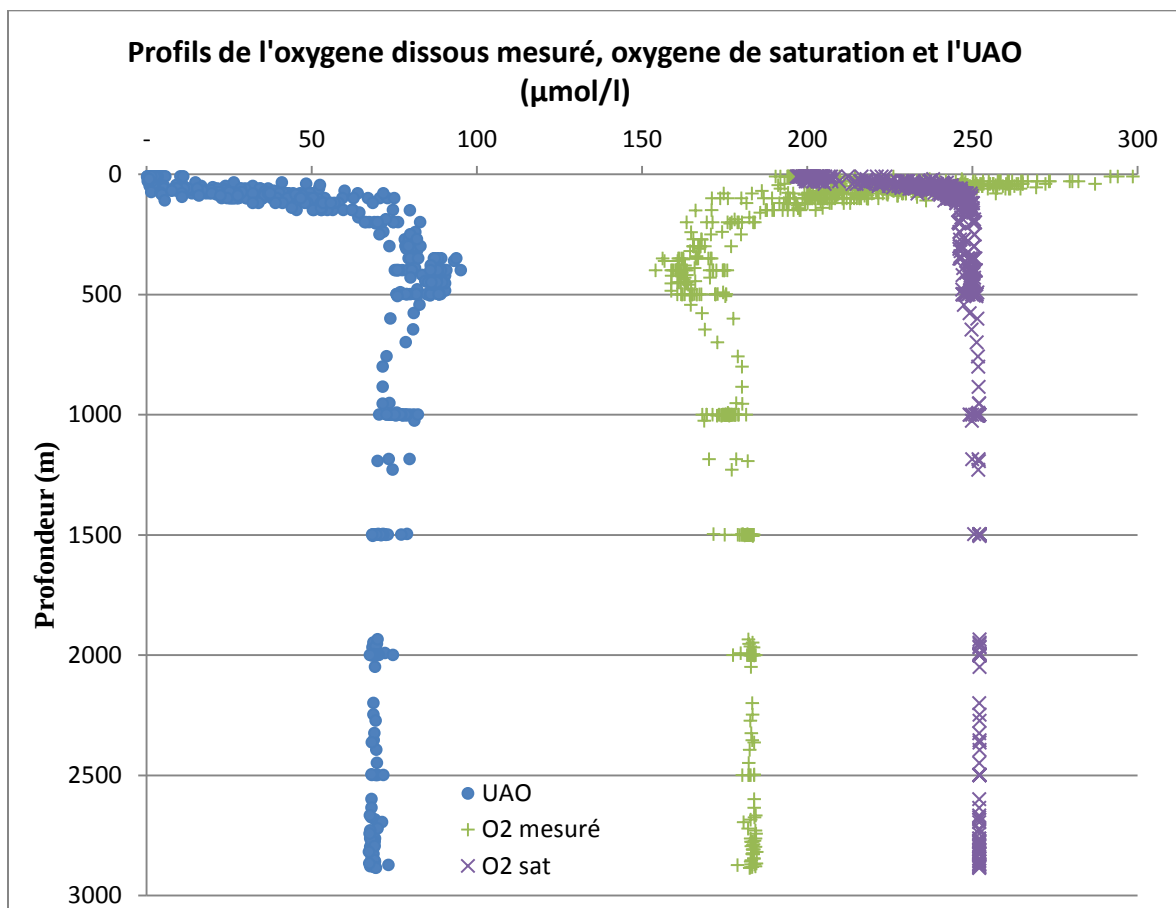


Figure 47: Profil vertical de l'oxygène dissous mesuré, oxygène de saturation et l'UAO au niveau du bassin Algérien.

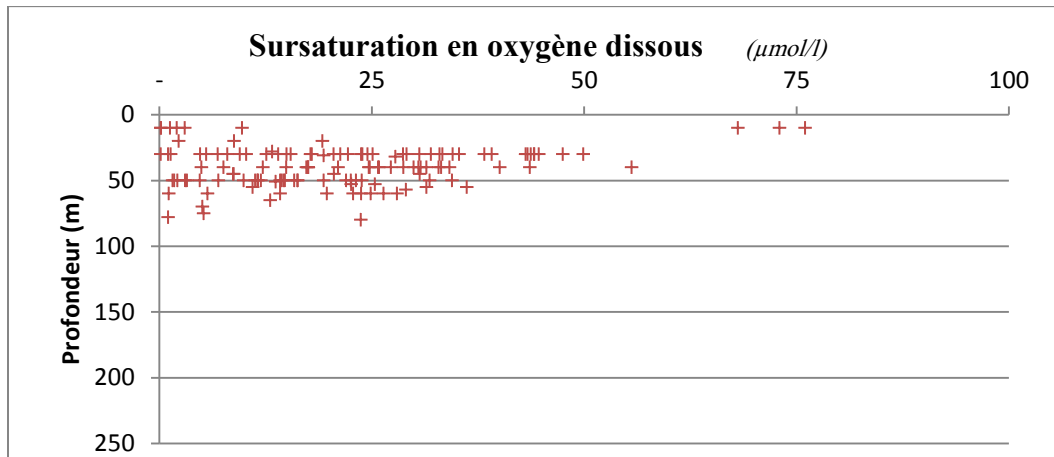


Figure 48: Sursaturation en oxygène dissous.

3.1.5.1 Distribution verticale de l'oxygène dissous

La distribution verticale de l'oxygène dissous montre une couche assez pauvre en oxygène dissous (inférieur à 180/175 $\mu\text{mol/kg}$). Les figures (49 à 53) montrent que cette couche occupe presque tout le bassin algérien entre une profondeur d'environ 250/300 m et environ 1000 m. Cette couche représente le niveau du minimum d'oxygène dissous où se fait le maximum de l'oxydation de la matière organique.

Au-dessus de cette couche, on observe les eaux de surface saturées en oxygène dissous et des cellules où il y a des sursaturations. Ces concentrations décroissent brusquement pour atteindre les concentrations assez basses de la couche déficitaire en oxygène dissous. En dessous de cette dernière, les concentrations de l'oxygène dissous dans les eaux profondes sont assez stationnaires au voisinage de la valeur de 180/175 $\mu\text{mol/kg}$.

La Figure 49 montre qu'au niveau de la couche déficitaire en oxygène dissous et les eaux profondes, une cellule, à environ 7°E, qui peut manifester une plongée d'eau déficitaire en oxygène dissous.

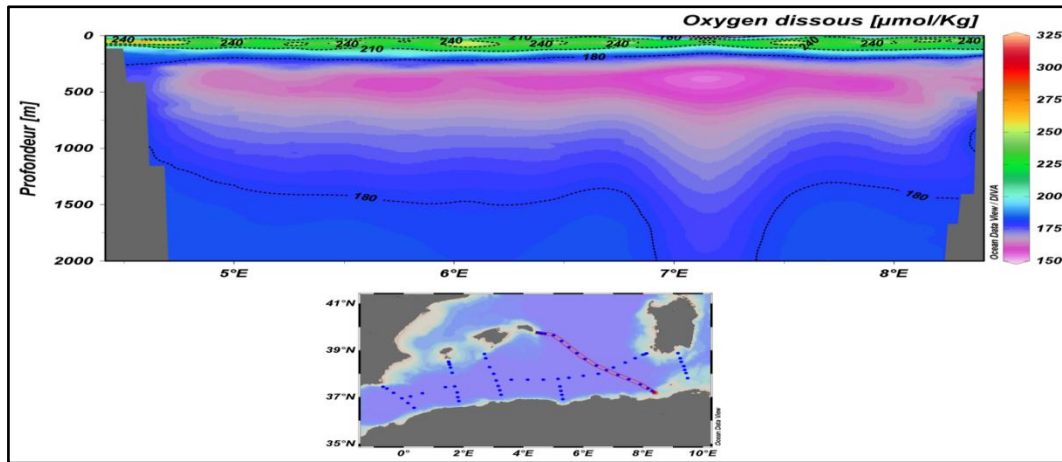


Figure 49: Section verticale de variation de l'oxygène dissous (transect Minorque – El Kala).

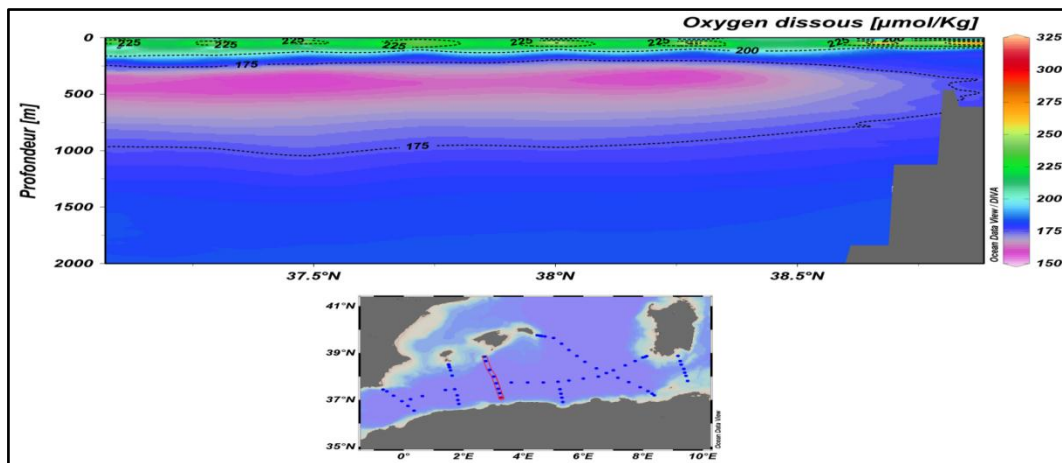


Figure 50: Section verticale de variation de l'oxygène dissous (transect Mallorca-Alger).

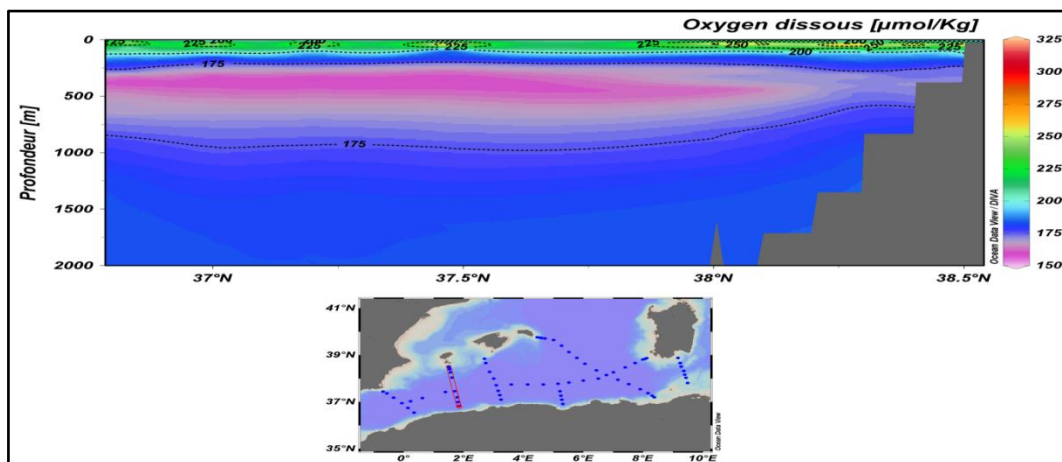


Figure 51: Section verticale de variation de l'oxygène dissous (transect Ibiza-Tipaza).

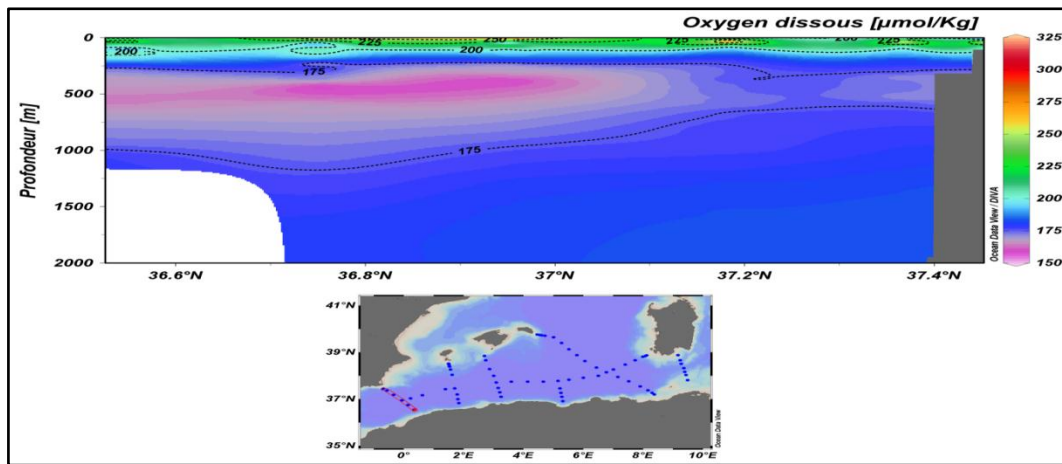


Figure 52: Section verticale de variation de l'oxygène dissous (transect Espagne-Ténès).

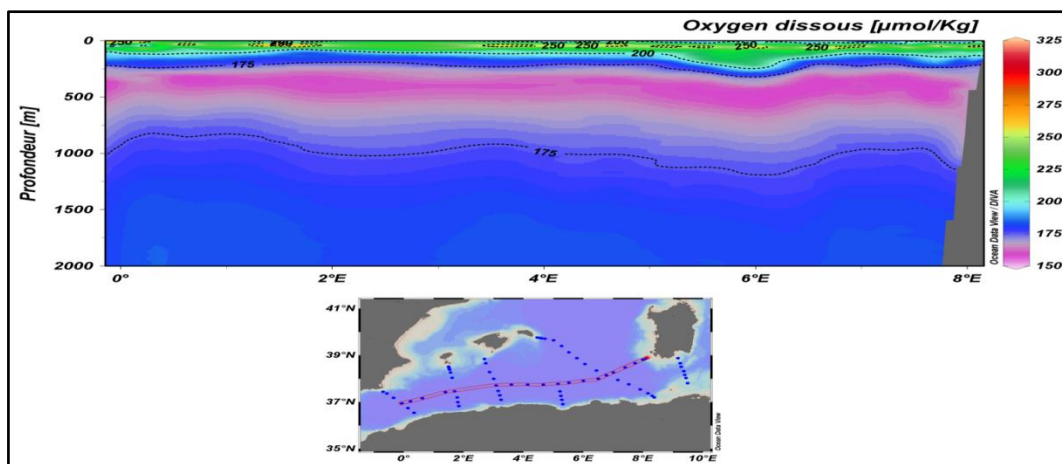


Figure 53: Section verticale de variation de l'oxygène dissous (transect Sardaigne – mer d'Alboron).

3.2 Résultats des sels nutritifs au niveau du bassin Algérien

Les données issues de l'analyse des échantillons de la rosette sont prélevées à différents niveaux de profondeur pour les paramètres comme les sels nutritifs, l'oxygène dissous, le DIC et la chlorophylle. Dans ce qui suit, nous allons présenter les données des sels nutritifs. Les concentrations en éléments nutritifs minéraux dissous (NO_3^- , PO_4^{+} , Si(OH)_4) sont présentées sur les figures 54 à 65.

3.2.1 Les nitrates

Les valeurs des nitrates relevées dans les eaux du bassin Algérien oscillent entre 0 et 10,105 $\mu\text{mol/l}$ avec une moyenne de 4,545 $\mu\text{mol/l}$ et un écart type important de l'ordre de 4,00.

Les profils de la distribution verticale montrent que la couche de surface, d'une épaisseur de 50 à 70 m, présente des concentrations en nitrates presque nulles qui peuvent être expliquées par un épuisement dû à l'activité photosynthétique. Au-delà de cette couche la concentration des nitrates augmente progressivement et rapidement avec la profondeur (fig. 54) pour atteindre un maximum entre environ 300 et 600 m de profondeur. Ce niveau coïncide avec celui du niveau du minimum de l'oxygène où le maximum des nitrates dépasse le seuil de $10 \mu\text{mol/l}$: C'est la zone de la régénération maximale des nitrates et des phosphates. Dans les eaux profondes, cette concentration se stabilise légèrement entre 8 et $9 \mu\text{mol/l}$.

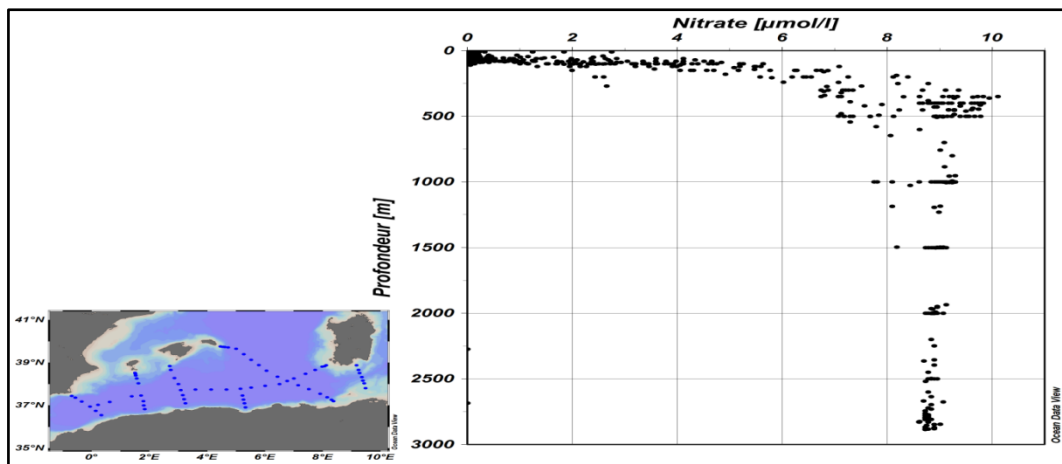


Figure 54: Profil vertical de la concentration des nitrates au niveau du bassin Algérien.

Cette distribution verticale peut être mieux étudiée par l'analyse des sections verticales établies (fig. 55 à 60). Toutes les sections s'accordent sur une distribution assez serrée en surface montrant une stratification plus ou moins importante et une nitracine assez superficielle.

Dans les eaux en dessous (en dessous d'environ 600 m de profondeur) les concentrations sont assez homogènes, manifestant ainsi une distribution plus ou moins monotone surtout au niveau des sections : Sardaigne-Tunisie, Mallorca-Alger et Espagne-Ténès. Les eaux les plus riches en nitrates forment les eaux du fond ($> 1500 \text{ m}$) dans la section (Sardaigne-Tunisie) avec une concentration supérieure à $8 \mu\text{mol/l}$. Elles s'étendent vers l'ouest sous forme d'une couche d'eau immense qui occupe presque tout le bassin. Elle est comprise entre les profondeurs de 300 m et un peu plus de 1000 m de profondeur et ayant une concentration supérieure à $9 \mu\text{mol/l}$. Des poches d'eau paraissent se détacher parfois de cette masse d'eau : cas d'une poche d'eau près de Minorque (fig. 56).

Des concentrations de l'ordre de 10 $\mu\text{mol/l}$ et plus paraissent dans cette grande couche sous forme de noyaux à des profondeurs de l'ordre de 500 m. ces noyaux issus certainement d'une régénération locale apparaissent clairement dans la fig. 57 au niveau des latitudes 37 et 37,5°N et dans la fig. 60 au niveau de la longitude 7°E.

La perturbation dans la stratification des nitrates en surface dans la figure 60 au niveau de la longitude 7°E avec l'approfondissement de la nitracline jusqu'à environ 200m de profondeur pourrait être en relation avec ce qui a été observé pour la température et la salinité presque au même endroit.

La carte de distribution horizontale dans les eaux de surface montre des concentrations faibles voir nulles au niveau de tout le bassin Algérien (fig. 61). Les deux figures 62 et 63 représentent la distribution spatiale des nitrates à 80 et 100 m de profondeur où on relève des concentrations plus ou moins importantes à extrême Ouest entre 0 °E et 2 °E de longitude qui peuvent être expliquées par le front Almeria-Oran et le courant algérien. Ce dernier peut être aussi à l'origine des faibles concentrations observées le long des côtes nord africaines et à l'extrême Est.

La distribution horizontale des concentrations en nitrates à 200 m de profondeur (fig. 64) montre une zone de forte concentration (8 $\mu\text{mol/l}$) située près des îles Baléares et une zone au large du bassin Algérien entre 6 °E et 8 °E caractérisée par des concentrations plus faibles de l'ordre de 3 $\mu\text{mol/l}$. A 400 m de profondeur (fig. 65), la concentration des nitrates est plus ou moins homogène avec des valeurs entre 8 et 10 $\mu\text{mol/l}$. Ces dernières valeurs montrent qu'à cette profondeur on a atteint la couche riche en nitrates décrite plus haut. Du côté Est et Ouest, les concentrations décroissent progressivement vers des valeurs plus faibles : environ 7 $\mu\text{mol/l}$ à l'Est et 6 $\mu\text{mol/l}$ vers l'ouest.

Tableau 3: Concentrations des nitrates à différentes couches le long de la colonne d'eau.

Profondeur	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type	
(m)	(μmol/l)				%
surface - fond	10,11	0,00	4,55	4,00	88,01
surface à 100	5,63	0,00	0,85	1,34	157,09
surface à 200	8,39	0,00	1,30	1,91	146,47
200 à 400	10,11	2,43	8,25	1,51	18,29
400 à 1000	9,83	7,07	8,93	0,63	7,06
400 au fond	9,83	7,07	8,89	0,45	5,06

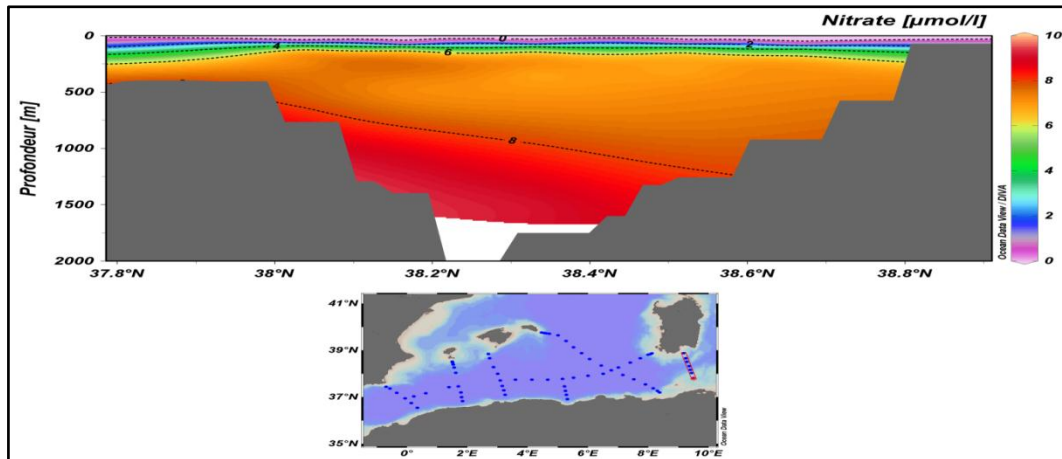


Figure 55: Section verticale de variation des nitrates (transect Sardaigne-Tunisie).

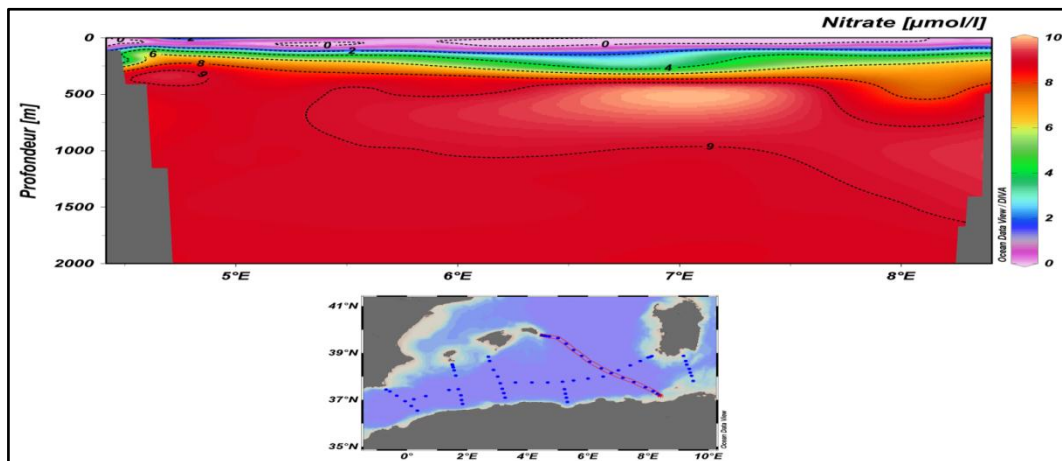


Figure 56: Section verticale de variation des nitrates (transect Minorque-El Kala).

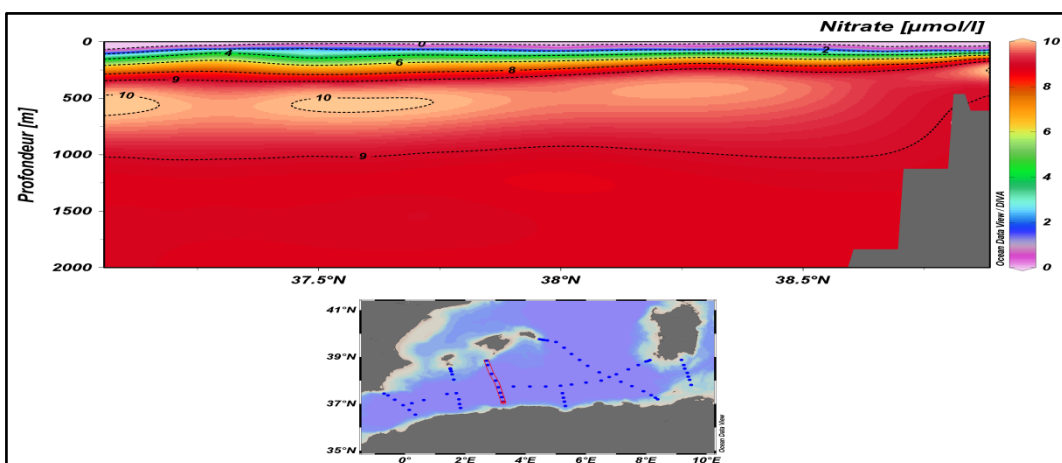


Figure 57: Section verticale de variation des nitrates (transect Mallorca-Alger).

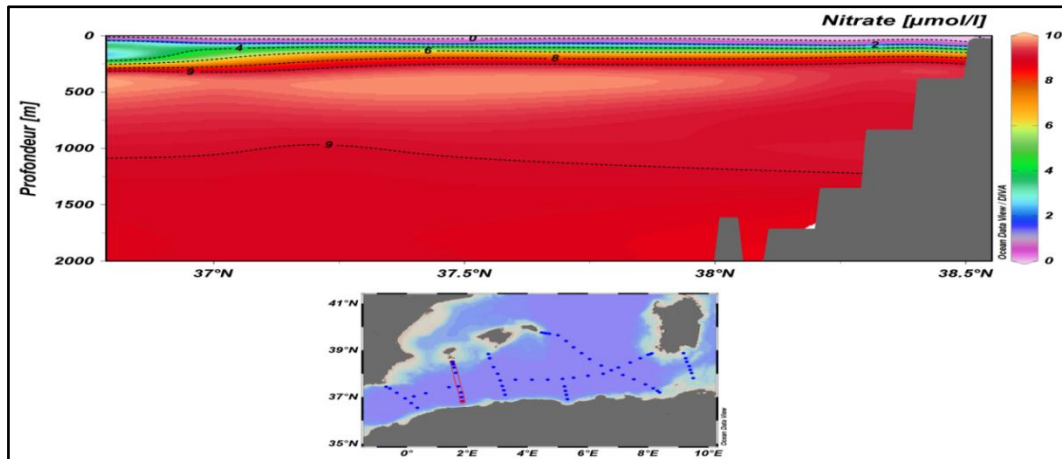


Figure 58: Section verticale de variation des nitrates (transect Ibiza-Tipaza).

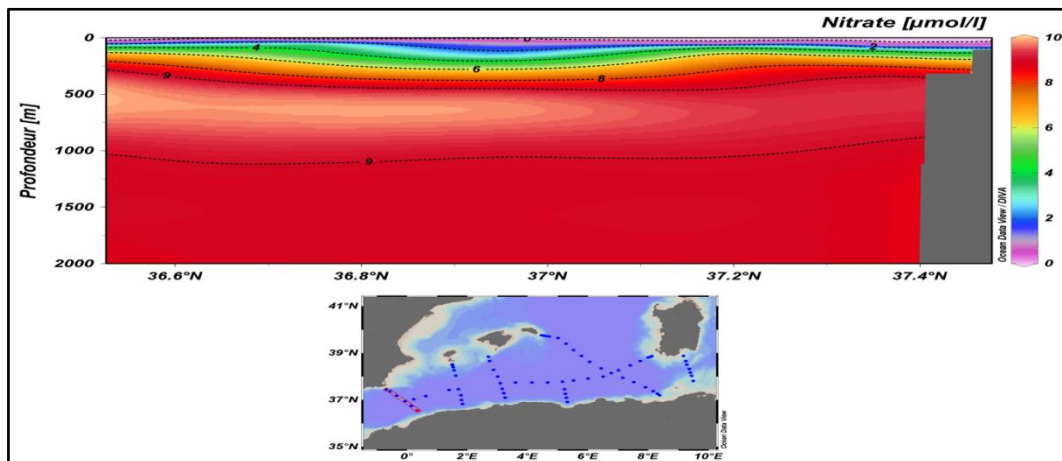


Figure 59: Section verticale de variation des nitrates (transect Espagne-Ténès).

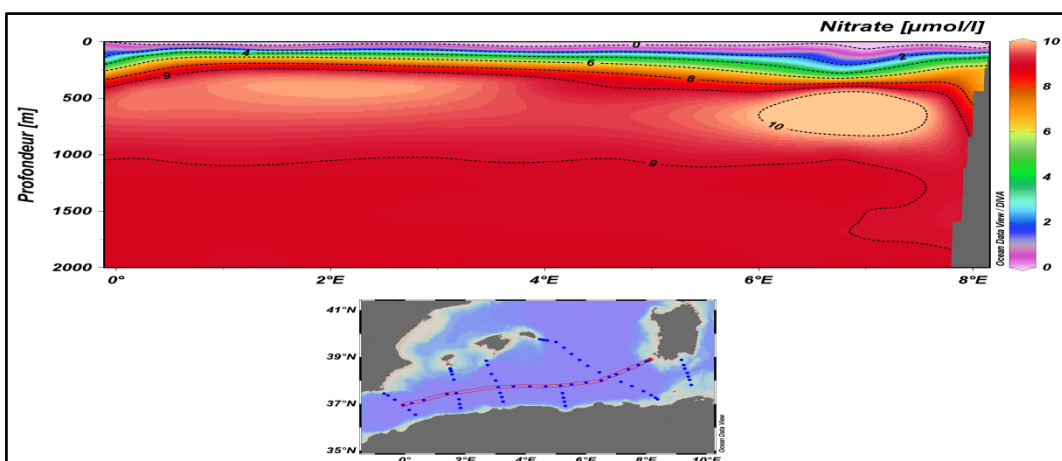


Figure 60: Section verticale de variation des nitrates (transect Sardaigne-mer d'Alboran).

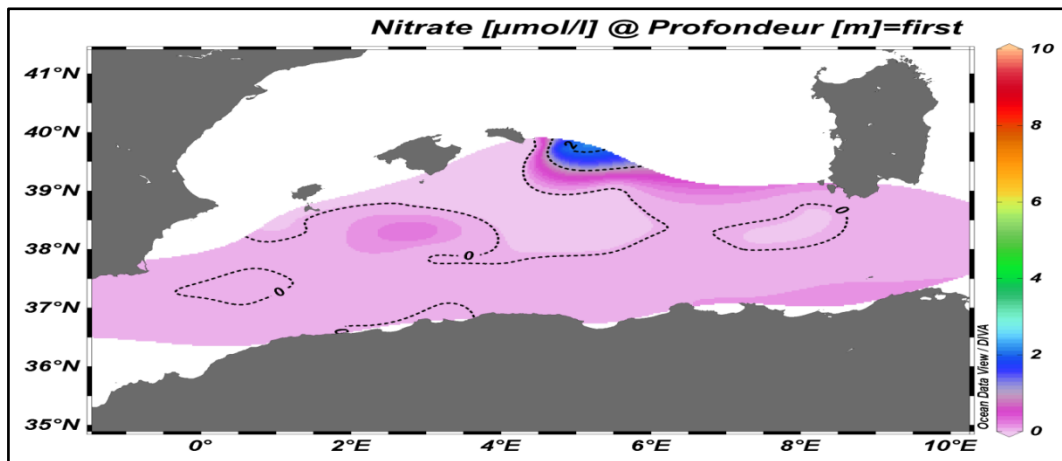


Figure 61: Distribution spatiale des concentrations des nitrates en surface.

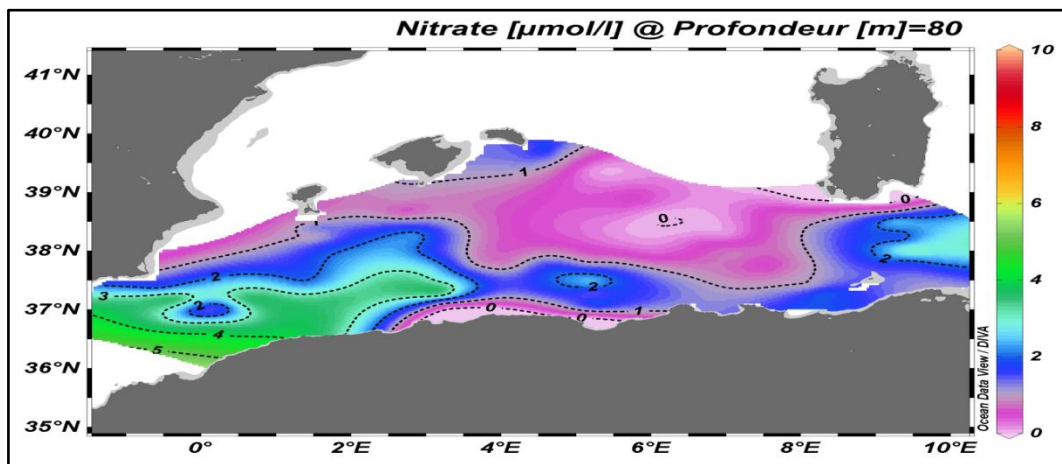


Figure 62: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 80m de profondeur.

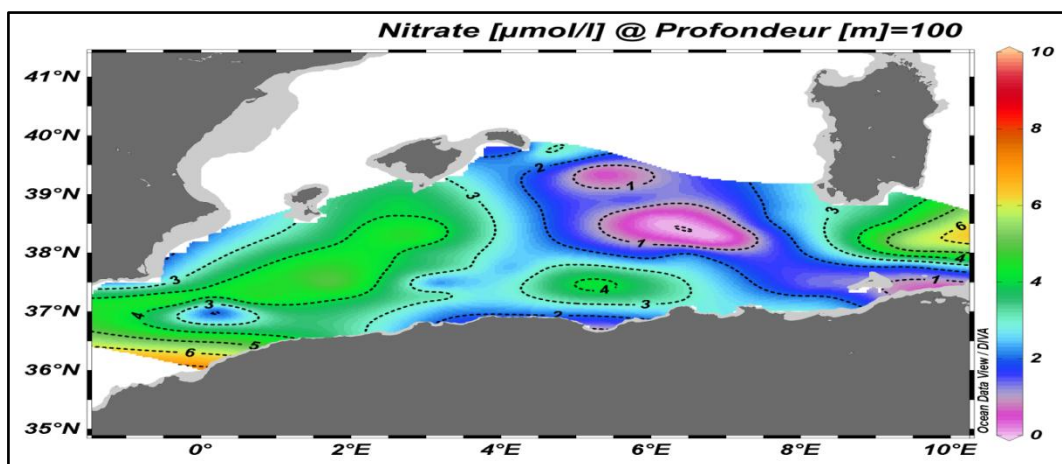


Figure 63: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 100m de profondeur.

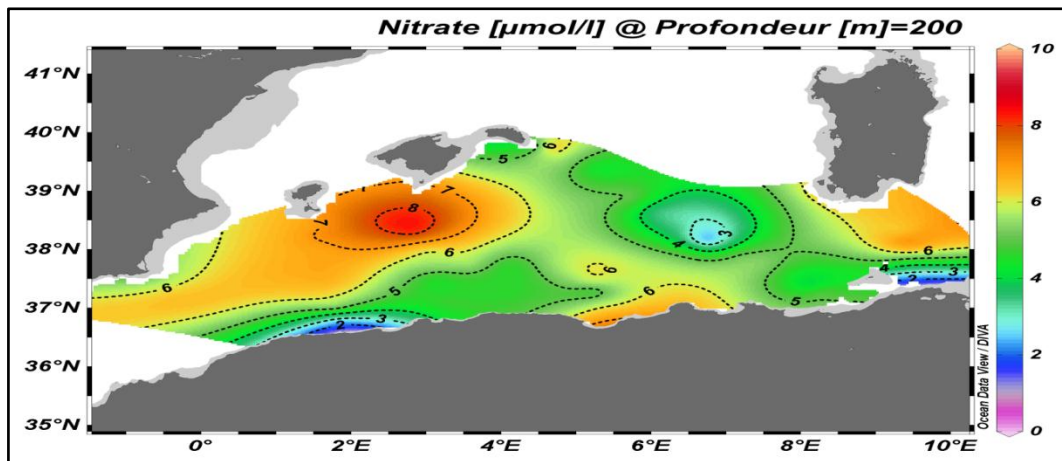


Figure 64: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 200m de profondeur.

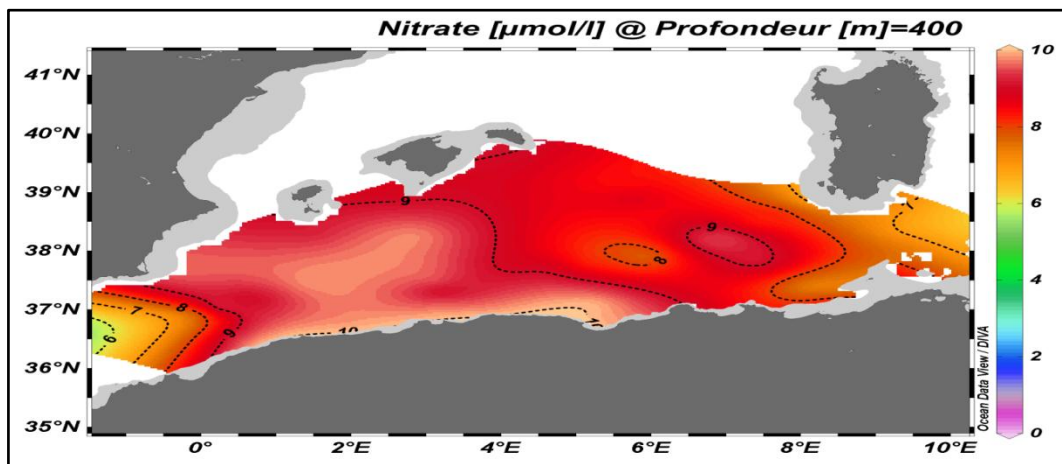


Figure 65: Distribution spatiale des concentrations des nitrates à 400m de profondeur.

3.2.2 Les phosphates

La distribution et l'évolution des phosphates pendant la campagne SOMBA est présentée dans les figures 66 à 77. Le comportement des phosphates est assez similaire à celui des nitrates. En effet, les cycles biogéochimiques d'azote et du phosphore dans le milieu marin sont presque identiques. Il en résulte une dépendance très significative que nous aborderont plus loin.

Les teneurs relevées pour les phosphates dans le bassin algérien varient entre un minimum de 0 $\mu\text{mol/l}$ en surface et un maximum de 0,506 $\mu\text{mol/l}$ avec une moyenne de 0,208 $\mu\text{mol/l}$ et un écart-type de 0,18. Comme pour les nitrates, le maximum des phosphates est enregistré au niveau du minimum d'oxygène qui correspond au maximum de dégradation de la matière organique (fig. 66).

Nulles en surface, les concentrations augmentent progressivement avec la profondeur pour atteindre un maximum entre 400 et 500 m. En dessous de 500 m, les concentrations se stabilisent au voisinage de $0,4 \mu\text{mol/l}$.

L'analyse des sections établies pour les phosphates montre que la concentration supérieure à $0,4 \mu\text{mol/l}$ occupe la majorité des eaux profondes jusqu'à plus de 2000 m de profondeur. Dans la section (Sardaigne-Tunisie), elle paraît limitée vers le nord à une profondeur supérieure à 1000 m. Les autres sections manifestent la formation d'une couche légèrement plus riche en phosphates ($> 0,45 \mu\text{mol/l}$) située entre environ 400 et 1000 m. la section Est-Ouest (Sardaigne-mer d'Alboran) montre que cette couche est subdivisée en deux parties : une partie orientale mineure et une partie occidentale majeure. D'autre part, certaines sections montrent bien la formation de poches d'eaux plus concentrées en phosphates ($> 0,5 \mu\text{mol/l}$) et résultent certainement de la régénération locales. C'est le cas des sections (Mallorque-Alger), (Espagne-Ténès) et (Sardaigne-mer).

De même que pour les nitrates, on observe une perturbation dans la stratification des phosphates en surface dans la figure 72 au niveau de la longitude 7°E avec l'approfondissement de la phosphacline jusqu'à plus de 300 m de profondeur. Elle pourrait être en relation avec ce qui a été observé pour la température et la salinité presque au même endroit. Ce resserrement et approfondissement de la stratification des phosphates est visible aussi dans d'autres endroits comme dans la fig. 68 au niveau surtout de la longitude 7°E . On peut constater aisément qu'il se situe presque au même endroit que celui de la fig. 72 et forme certainement son prolongement dans l'espace. Les nitrates (fig. 60) le montrent aussi, mais il n'est pas bien visible.

L'examen de la distribution horizontale des phosphates sur les figures 73 à 77 montre une variation importante des concentrations entre les eaux de surface et les eaux profondes. En effet, des concentrations totalement nulles sont enregistrées au niveau des eaux de surface (fig. 73) suite à la consommation biologique.

Les figures 74 et 75 illustrent la distribution horizontale des phosphates à 80 et 100 m de profondeur respectivement. La variation des valeurs des phosphates suit celle des nitrates avec des concentrations significatives qui apparaissent du côté Ouest du bassin au niveau du front Almeria-Oran. Ces apports sont en relation directe avec les eaux atlantiques entrant par le détroit de Gibraltar plus ou moins riches en sels nutritifs que les eaux méditerranéennes.

A 200 m de profondeur (fig. 76) les valeurs des phosphates commencent à augmenter dans tout le bassin, car on se trouve en plein phosphacine. Deux zones bien distinctes sont mises en évidence, la première est autour des îles Balnéaires avec des concentrations qui peuvent atteindre un maximum de 0.35 $\mu\text{mol/l}$ indiquant peut être une remontée d'eau profonde dans la zone côtière des îles. La deuxième zone, située entre la longitude 6 °E et 8 °E, présente une valeur minimale de 0.1 $\mu\text{mol/l}$ (en couleur bleu sur la carte) qui peut être attribuée à une masse d'eau superficielle qui plonge en profondeur.

A 400 m de profondeur (fig. 77), la concentration des phosphates atteint des valeurs élevées ($> 0,45 \mu\text{mol/l}$), car on se trouve, du côté Ouest, dans la couche d'eau riche en phosphate. Vers l'extrême Est et l'extrême Ouest, les concentrations décroissent progressivement, ceci représente la périphérie de la couche riche en phosphates. Juste en dessous de cette profondeur, c'est le centre de la couche d'eau riche en phosphates ($>0,45 \mu\text{mol/l}$) et où on rencontre par endroits, des poches d'eau plus riche en phosphates ($> 0,5 \mu\text{mol/l}$). Au-delà de cette couche riche en phosphates, les valeurs restent stables et voisines à 0,4 $\mu\text{mol/l}$.

Tableau 4: concentrations des phosphates ($\mu\text{mol/l}$) à différentes couches le long de la colonne d'eau.

Profondeur (m)	Max	Min	Moyenne	Ecart-type	%
(m)	(μmol/l)				%
surface - fond	0,506	0,000	0,208	0,180	86,54
surface à 100 m	0,260	0,000	0,037	0,052	140,54
surface à 200 m	0,360	0,000	0,053	0,075	141,51
200 à 400 m	0,506	0,000	0,372	0,094	25,27
400 à 1000 m	0,506	0,309	0,422	0,042	9,95
400 au fond	0,506	0,309	0,417	0,030	7,19

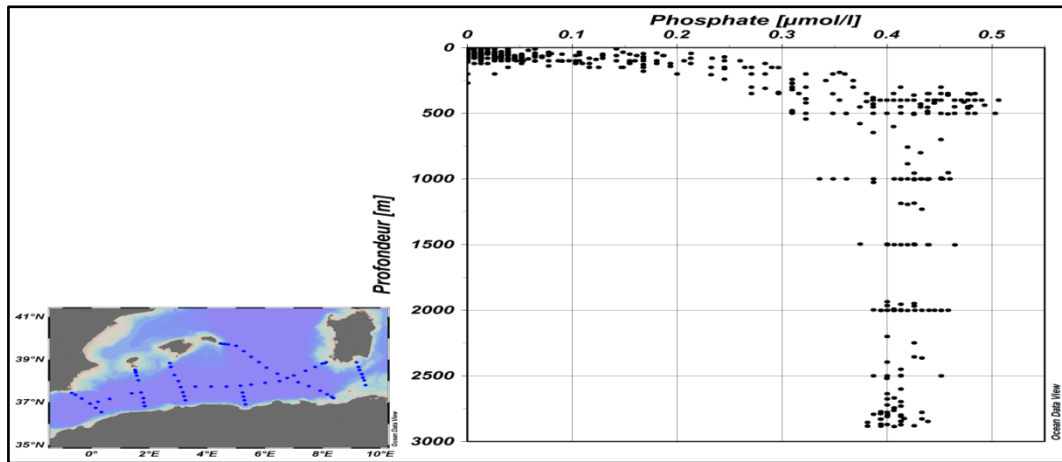


Figure 66: Profil de la concentration des phosphates au niveau du bassin Algérien.

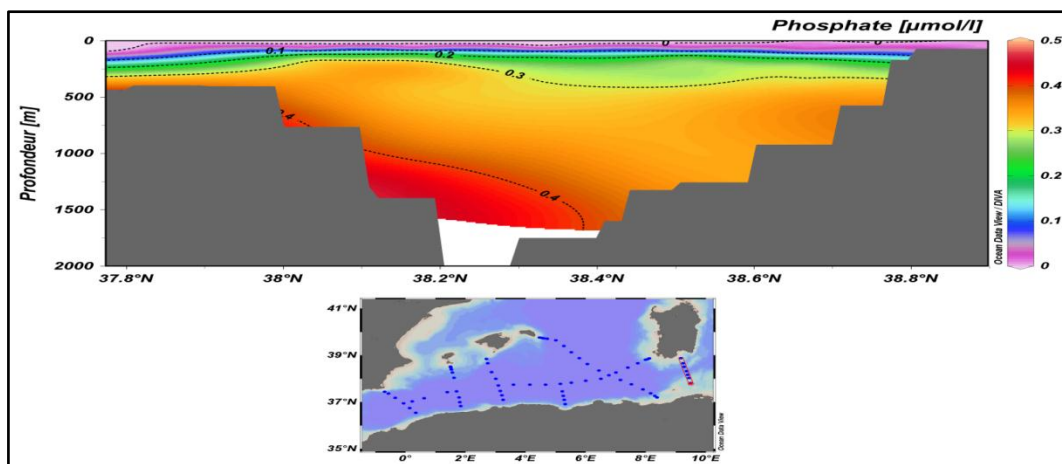


Figure 67: Section verticale de variation des phosphates (transect Sardaigne-Tunisie).

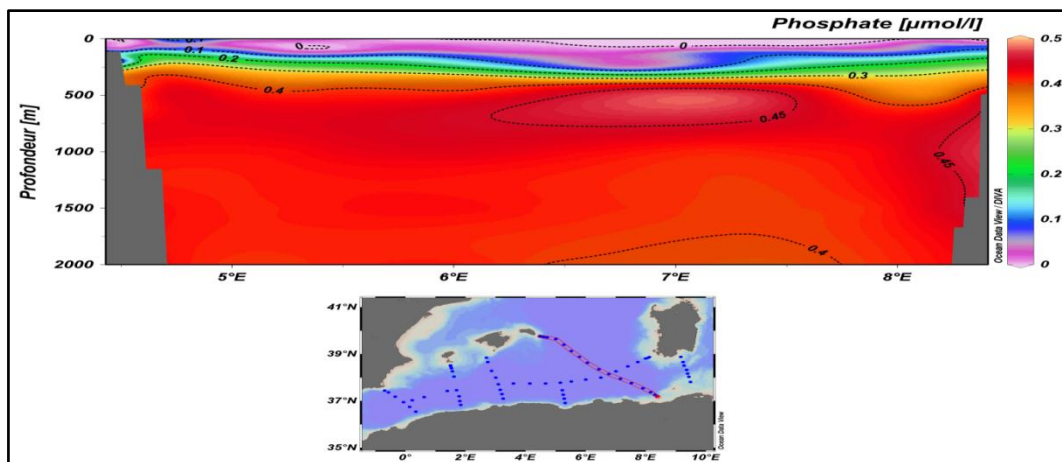


Figure 68: Section verticale de variation des phosphates (transect Minorque-El Kala).

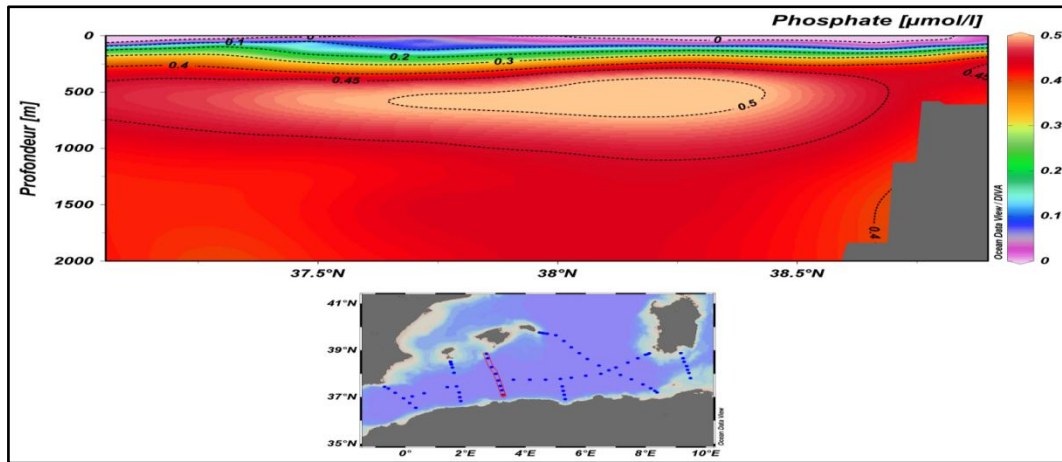


Figure 69: Section verticale de variation des phosphates (transect Mallorca-Alger).

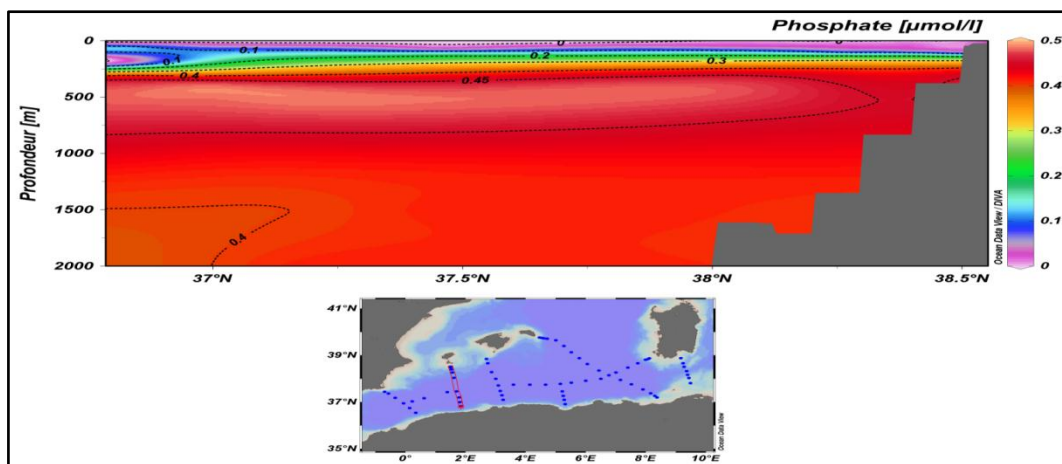


Figure 70: Section verticale de variation des phosphates (transect Ibiza-Tipaza).

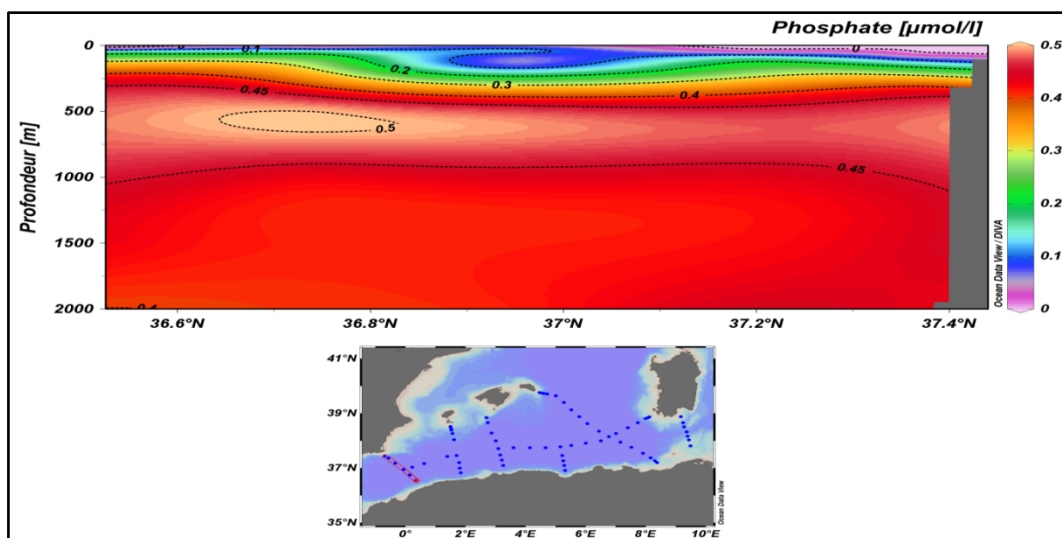


Figure 71: Section verticale de variation des phosphates (transect Espagne-Ténès).

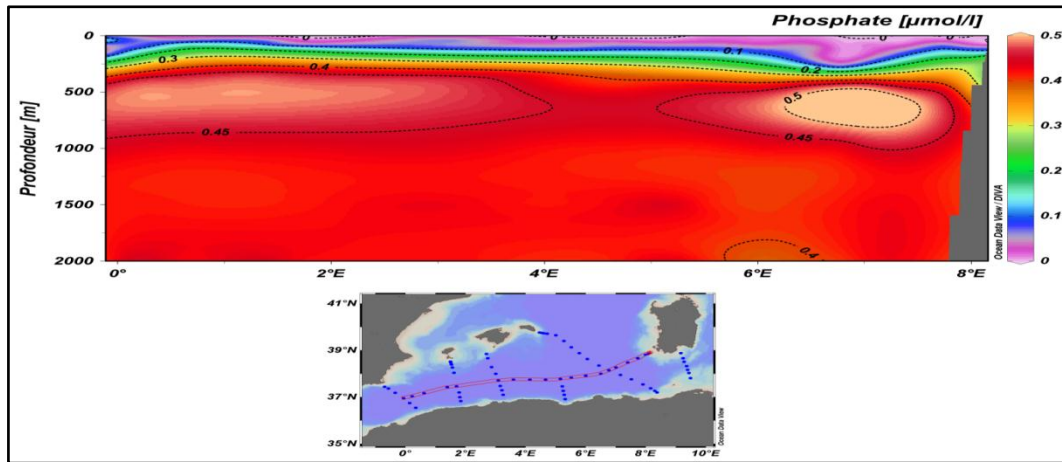


Figure 72: Section verticale de variation des phosphates (transect Sardaigne-mer d'Alboran).

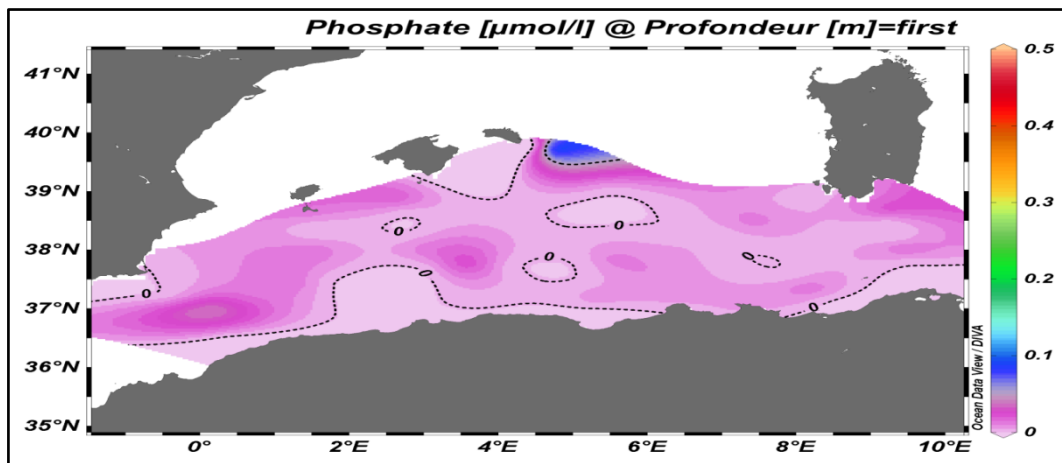


Figure 73: Distribution spatiale des concentrations des phosphates en surface.

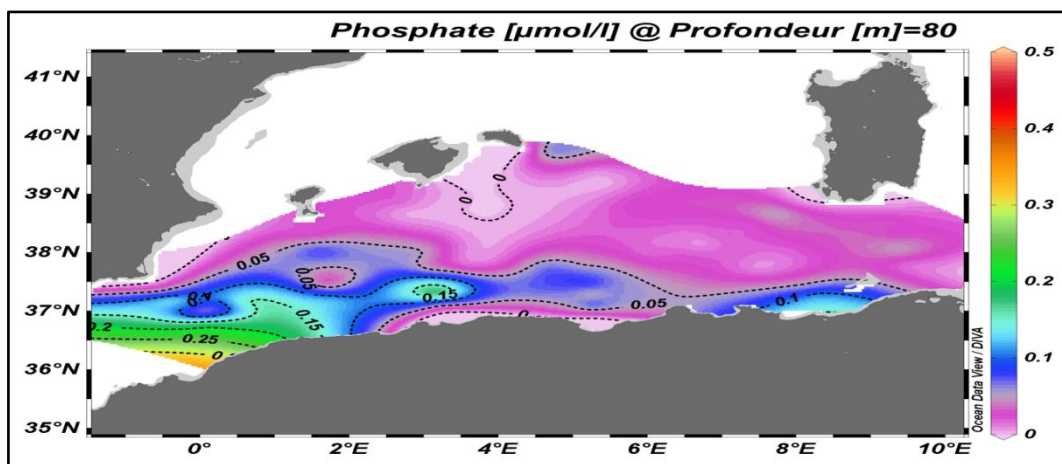


Figure 74: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 80m de profondeur.

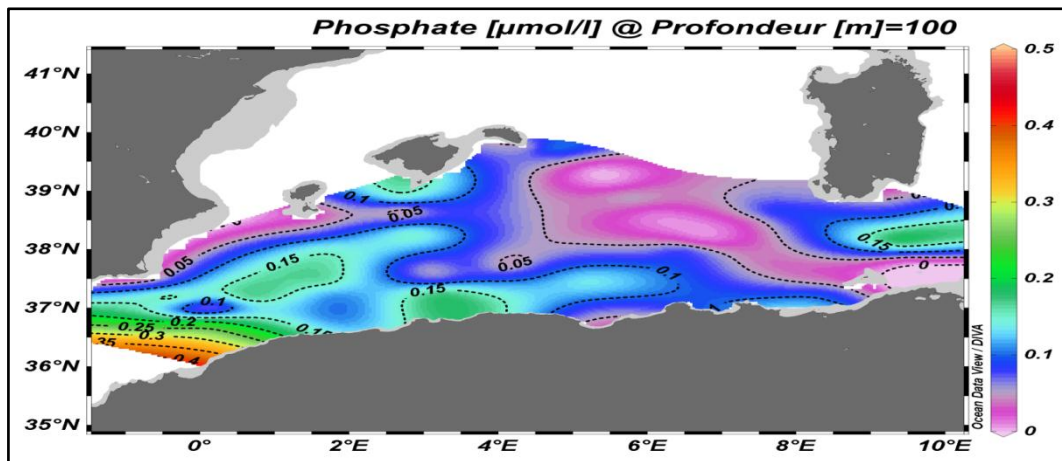


Figure 75: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 100m de profondeur.

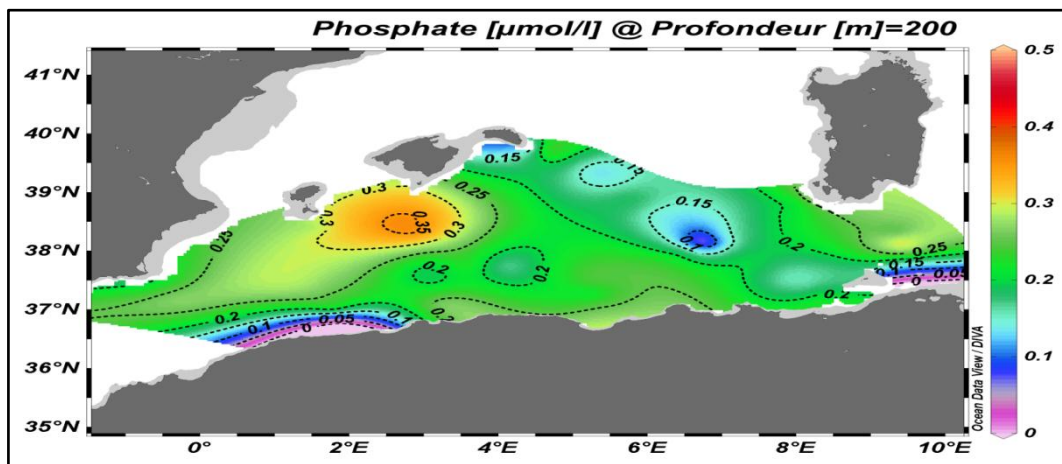


Figure 76: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 200m de profondeur.

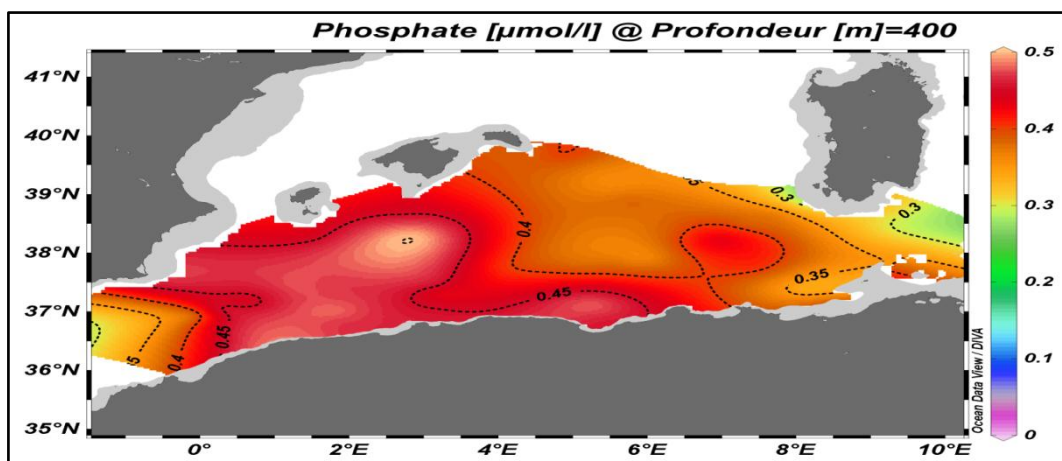


Figure 77: Distribution spatiale des concentrations des phosphates à 400m de profondeur.

3.2.3 Les silicates

La distribution du silicium est sensiblement différente de celle de l'azote et du phosphore. Ceci est dû au fait que la régénération de silicium (acide orthosilicique) est complètement différente de celle des nitrates et des phosphates, comme leurs cycles respectifs. La régénération de silicium se fait par simple dissolution physicochimique en fonction de l'importance de la sous saturation/saturation du milieu aquatique.

Ceci laisse observer une augmentation progressive des concentrations à partir des plus basses valeurs en surface vers les valeurs les plus élevées, généralement, au fond marin. En effet les concentrations des silicates au niveau du bassin Algérien varient entre un minimum de 0,471 $\mu\text{mol/l}$ relevée en surface et un maximum de 11,199 $\mu\text{mol/l}$ au fond du bassin avec une moyenne de 5,042 $\mu\text{mol/l}$ et un écart-type de 3,83.

Le profil général fig. 78 ainsi que la distribution horizontale fig. 85 montrent que, contrairement aux nitrates et phosphates, les concentrations de la silice en surface ne sont pas épuisées par la photosynthèse ($\geq 0,471 \mu\text{mol/l}$). Cette concentration augmente progressivement pour atteindre les valeurs les plus élevées dans les eaux profondes. A partir de 500 m et surtout à partir de 1000 m de profondeur, la concentration est assez stable entre environ 8 et 11 $\mu\text{mol/l}$.

L'analyse de la distribution verticale selon les sections montre que, d'une manière générale, les concentrations de la silice progressent en fonction de la profondeur selon une stratification quasi horizontale normale jusqu'à 1000 m de profondeur. A cette dernière profondeur, on rencontre la couche d'eau la plus riche en silice avec des concentrations homogènes supérieures à 10 $\mu\text{mol/l}$ et inférieures à 11 $\mu\text{mol/l}$. Cette couche n'existe pas dans tout le bassin : elle est absente entre Minorque et el Kala (fig. 80) et dans les côtes algériennes du côté de Tipaza (fig. 82) et elle est subdivisée en deux parties entre l'Espagne et Ténès (fig. 84).

La distribution horizontale selon les cartes établies en surface et à 80 m de profondeur (fig. 85) montre des concentrations très faibles de l'ordre de 1 à 2 $\mu\text{mol/l}$. À 80 m (fig. 86) on commence à voir un semblant de gradient à l'extrême Ouest du bassin. A 100 m et 200 m de profondeur (fig. 87 et 88) les concentrations augmentent à 3 et à 5 $\mu\text{mol/l}$ respectivement. A 200 m de profondeur (fig. 89), on peut nuancer près de l'île Ibiza (2°E) et entre les îles Baléares et la Sardaigne (6,5°E) deux structures qui peuvent renseigner probablement : la première sur remontée d'eau profonde riche en silice et la

deuxième sur la plongée d'eau pauvre en Silice. A 400 et 600 m de profondeur (fig. 90 et 91) nous pouvons toujours nuancer les deux structures discutées précédemment.

Tableau 5: Concentrations des silicates à différentes couches le long de la colonne d'eau.

Profondeur (m)	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type	%
(m)	(μmol/l)				%
Surface-fond	11,20	0,47	5,04	3,83	75,96
surface à 100 m	4,29	0,47	1,55	0,68	43,90
surface à 200 m	6,60	0,47	1,79	1,05	58,44
200 à 400 m	8,92	1,74	6,84	1,54	22,55
400 à 1000 m	10,93	2,77	8,90	1,20	13,49
400 au fond	11,20	2,77	9,43	1,07	11,35

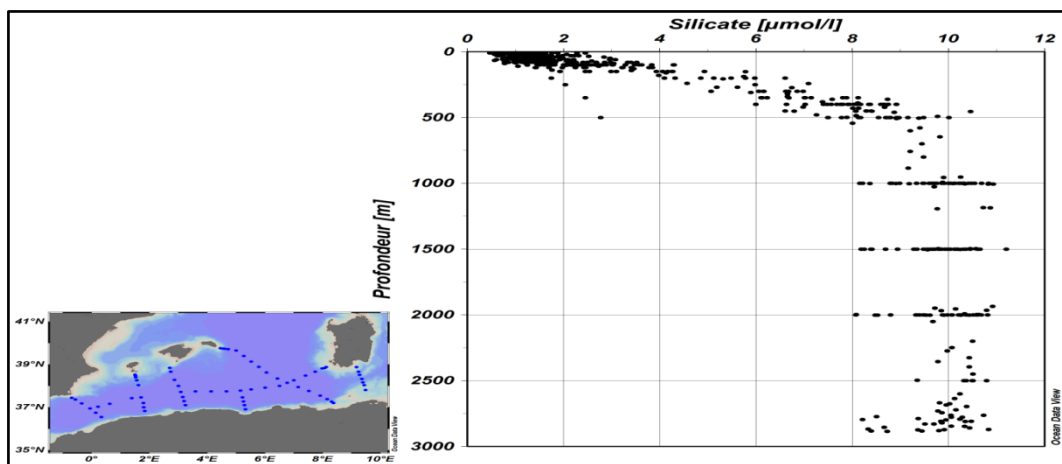


Figure 78: Profil vertical des concentrations des silicates au niveau du bassin Algérien.

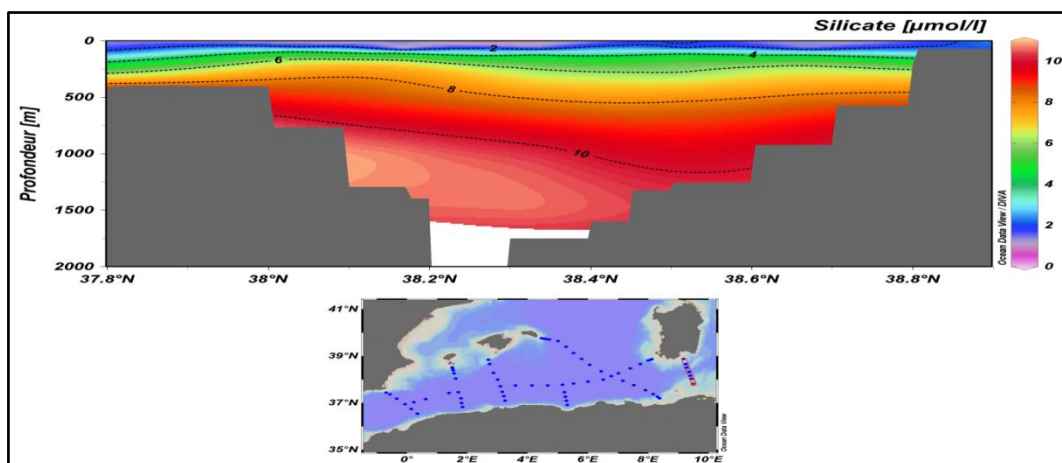


Figure 79: Section verticale de variation des silicates (transect Sardaigne-Tunisie).

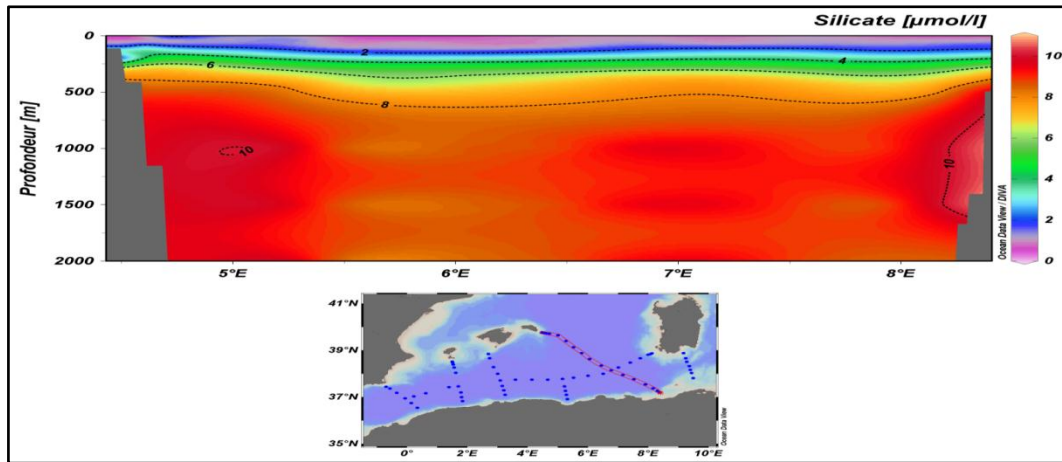


Figure 80: Section verticale de variation des silicates (transect Minorque-El Kala).

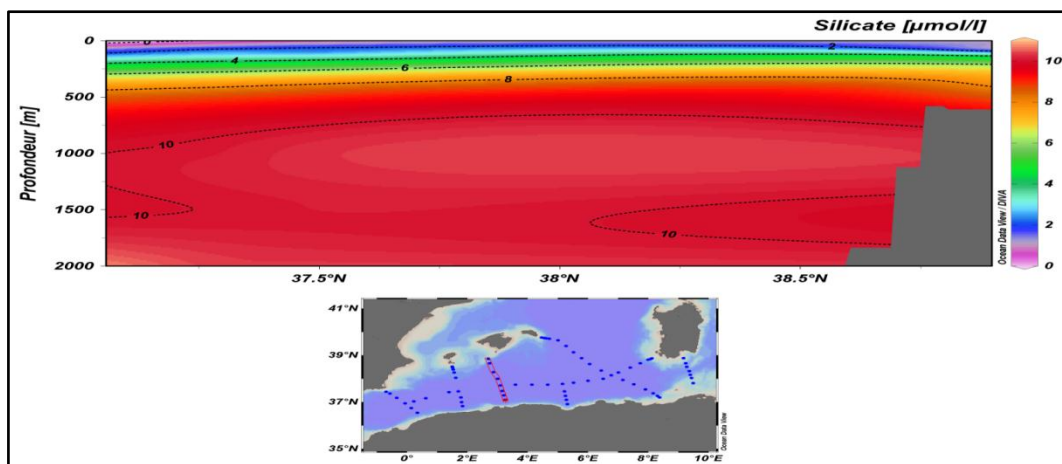


Figure 81: Section verticale de variation des silicates (transect Mallorque-Alger).

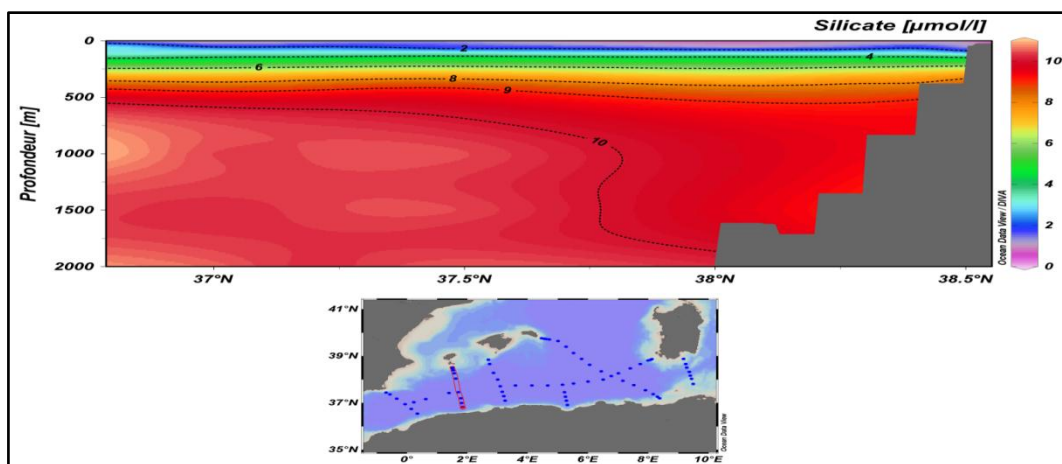


Figure 82: Section verticale de variation des silicates (transect Ibiza-Tipaza).

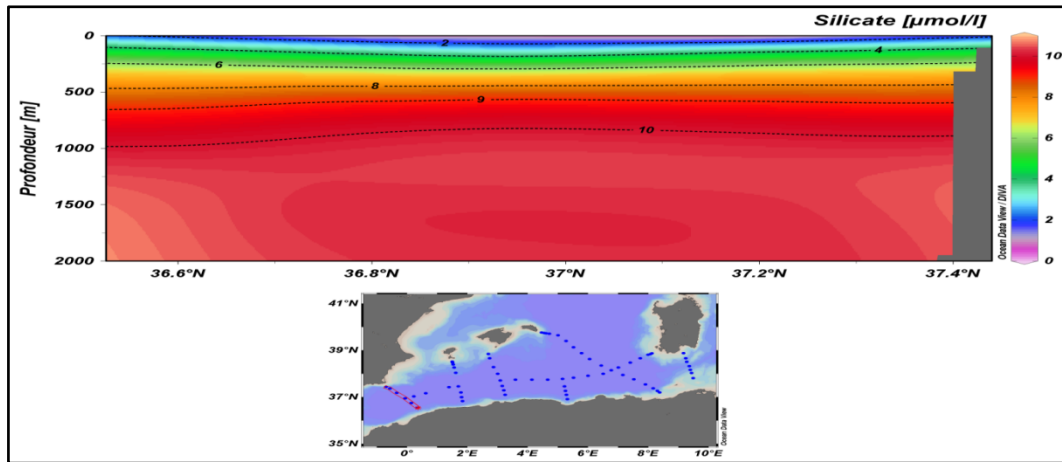


Figure 83: Section verticale de variation des silicates (transect Espagne-Ténès).

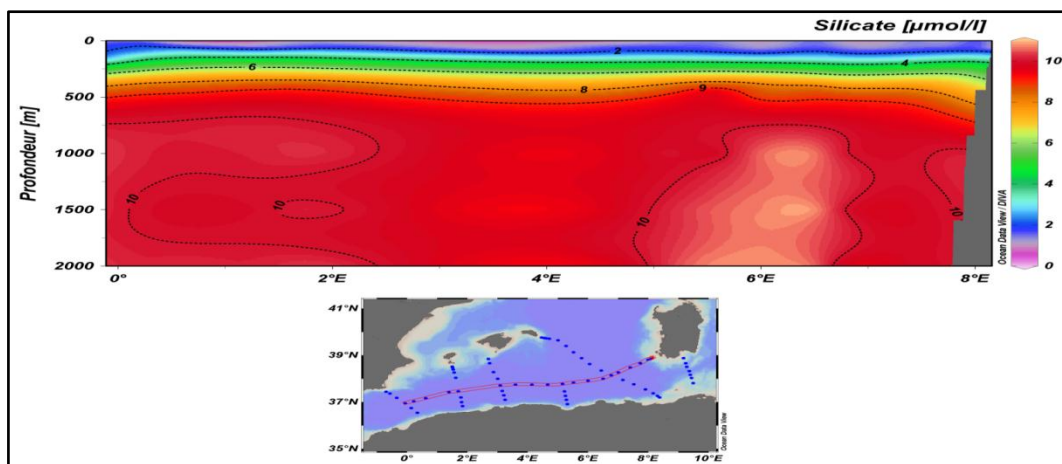


Figure 84: Section verticale de variation des silicates (transect Sardaigne-mer d'Alboran).

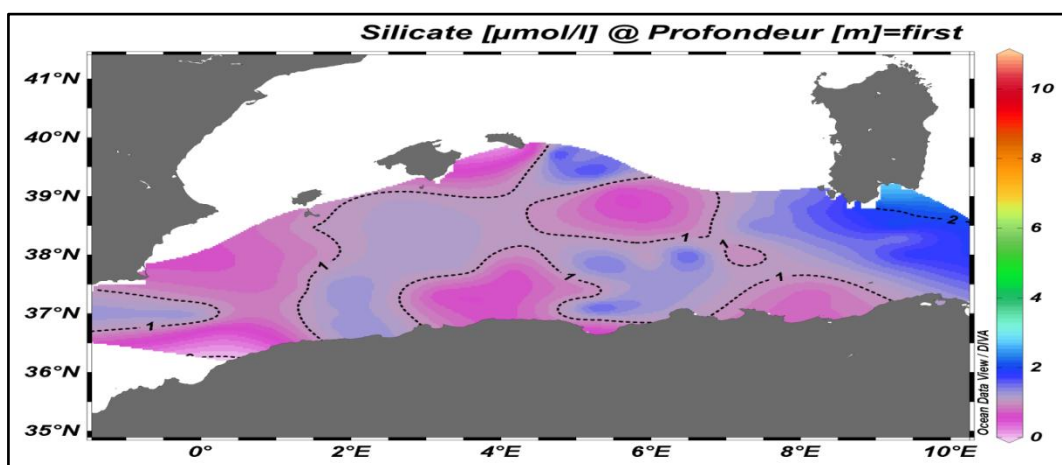


Figure 85: Distribution spatiale des concentrations des silicates en surface.

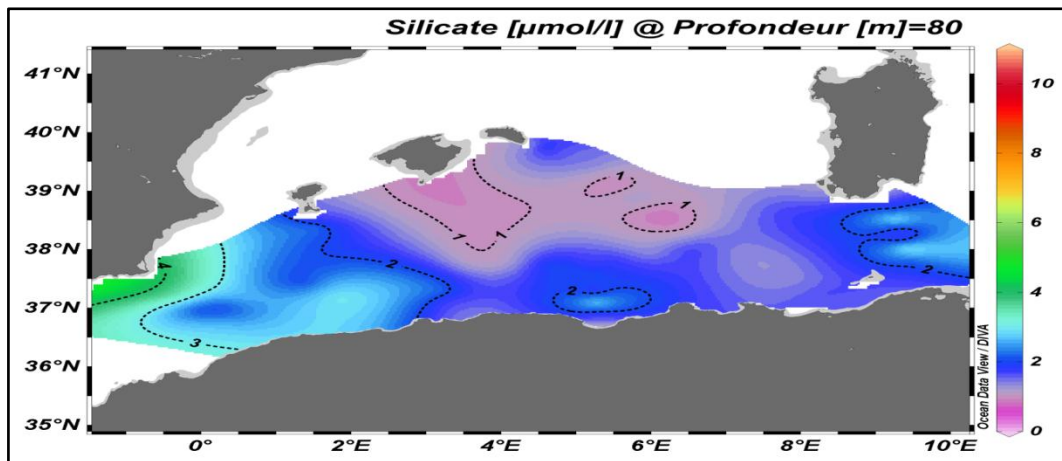


Figure 86: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 80m de profondeur.

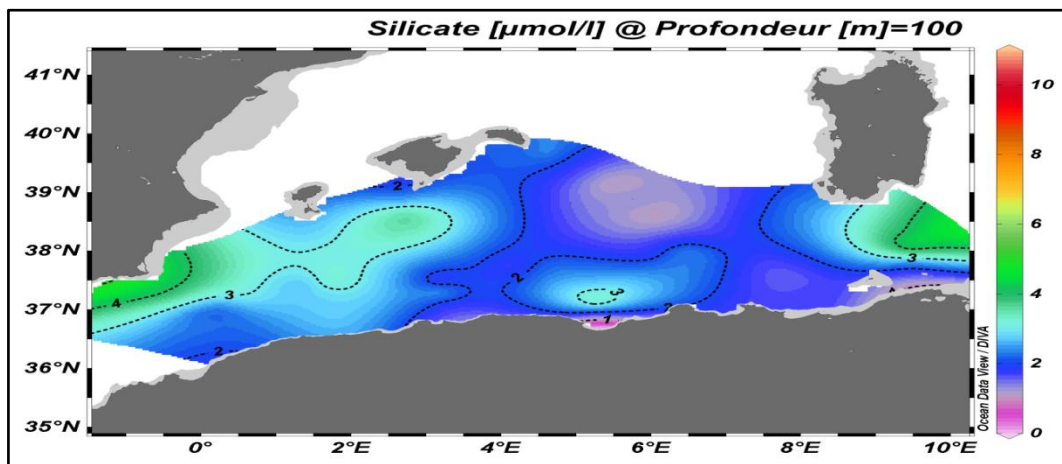


Figure 87: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 100m de profondeur.

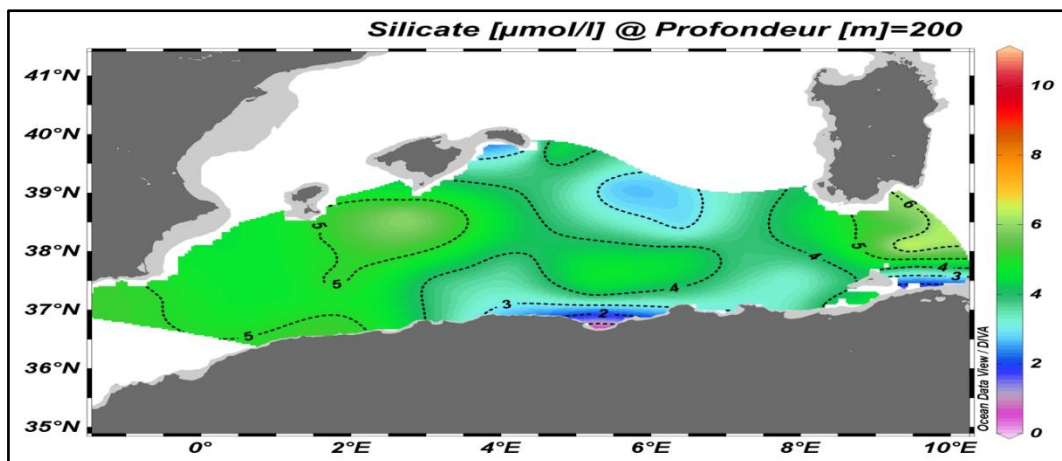


Figure 88: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 200m de profondeur.

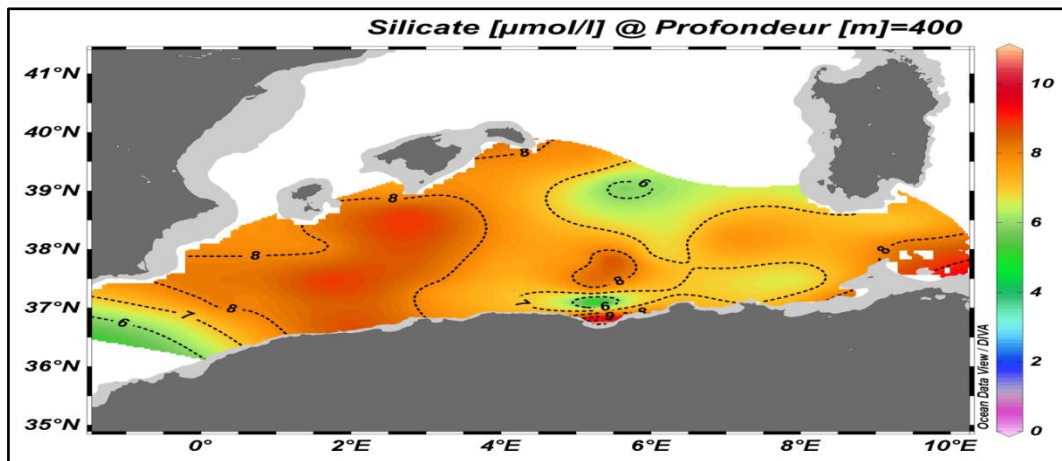


Figure 89: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 400m de profondeur.

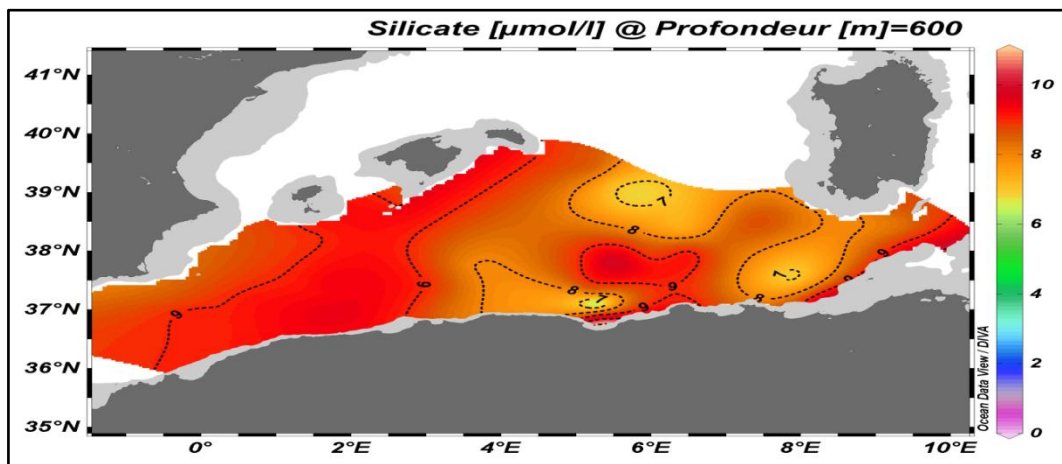


Figure 90: Distribution spatiale des concentrations des silicates à 600m de profondeur.

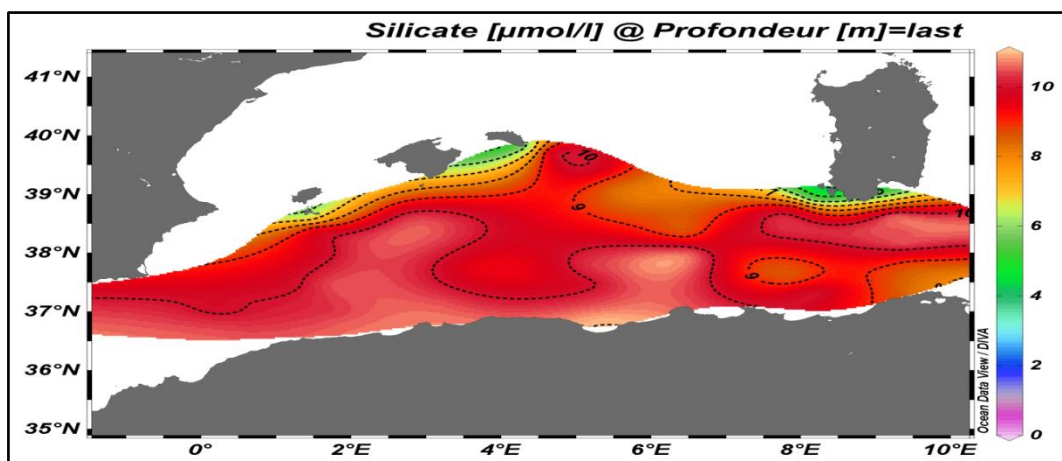


Figure 91: Distribution spatiale des concentrations des silicates au fond.

3.3 Analyse des rapports élémentaires

Les rapports biochimiques élémentaires dits de Redfield sont estimés pour l'océan global. Estimés par Redfield et *al.*, (1963), ces rapports sont : $P/N/C/UAO = 1/16/106/138$. Ces rapports sont estimés par des modèles de calcul. Ces derniers permettent de calculer les fractions utilisées pour l'oxygène dissous et les fractions oxydées pour les nutriments. Certains auteurs ont proposé un changement des valeurs de certains rapports (Takahachi et *al.*, 1985 et Broecker et *al.*, 1985). D'autres auteurs ont montré la variation de certains de ces rapports avec la profondeur (Minster et Boulahdid, 1987 et Boulahdid et Minster, 1989).

Dans cette partie, pour avoir une idée de ces rapports, nous allons tenter de calculer les rapports d'abondances de : N/P , UAO/N et UAO/P .

3.3.1 Digramme Nitrates/Phosphates et le rapport N/P

L'écosystème méditerranéen, en plus de sa pauvreté relative en éléments nutritifs, ses eaux sont caractérisées par des valeurs du rapport biochimique de Redfield N/P différentes de celles rapportées pour l'océan mondial. En effet, il se trouve avec une valeur assez élevée de l'ordre de $N/P = 21$ (Raimbault et *al.*, 1990).

La figure 92 montre la corrélation entre les nitrates et les phosphates des données de la campagne SOMBA GE dans le bassin algérien. Cette corrélation assez significative ($R^2=0,967$) permet d'estimer un rapport $N/P = 20,93$. Ce dernier est comparable à celui trouvé par (Raimbault et *al.*, 1990) durant la campagne Mediprod V et Médiprod VI avec un rapport de 21,65 et de 21,8 respectivement. Il est aussi équivalent à celui trouvé pendant la campagne Semaphore en 1994 effectuée dans le bassin Algéro-provençal (21,5) (Bethoux et *al.*, 1998) et durant la campagne ELISA entre 1997-1998 avec une valeur de (21,12) (Taupier-Letage et *al.*, 2003). Des résultats très voisins de ceux-ci sont trouvés dans le bassin occidental de la mer méditerranée avec un rapport de 21,2 (Boudjakdji, 2007).

Tableau 6: différentes valeurs calculées pour le rapport N/P en mer méditerranée.

Campagne océanographique	Valeur du rapport N/P	Lieu	Auteurs
MEDIPROD V (1986)	21,65	Bassin algérien	(Raimbault et al., 1990)
MEDIPROD VI (1990)	21,8	Bassin algérien	(Raimbault et al., 1990)
SEMAPHORE (1994)	21,5	Bassin Algéro-provençal	(Bethoux et al., 1998)
ELISA (1997-1998)	21,12	Bassin algérien	Taupier-Letage et al., 2003
Données historiques MEDAR/MEDATLAS (2000)	21,21	Bassin occidental de la mer méditerranée	Boudjakdji, 2007
SOMBA GE (2014)	20,93	Bassin algérien	Ce travail

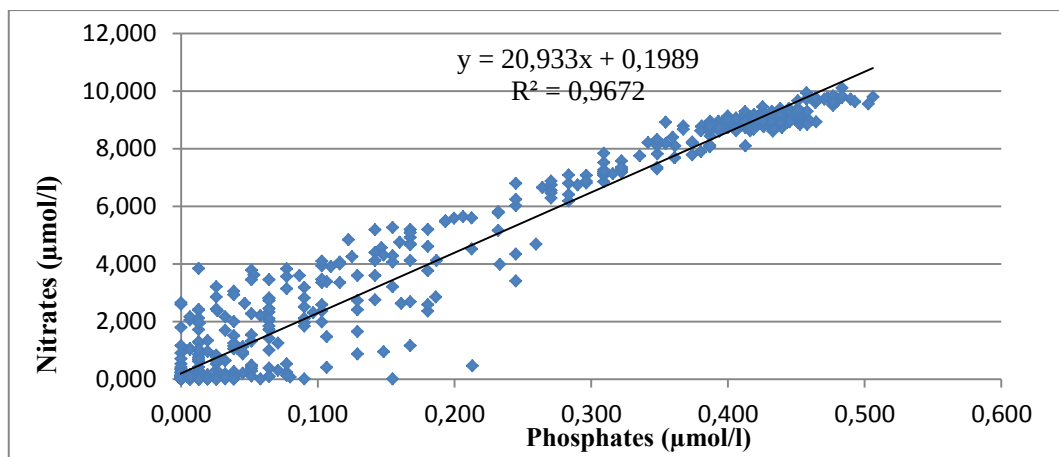


Figure 92: Diagramme de corrélation de nitrate/phosphates (SOMBA-GE 2014).

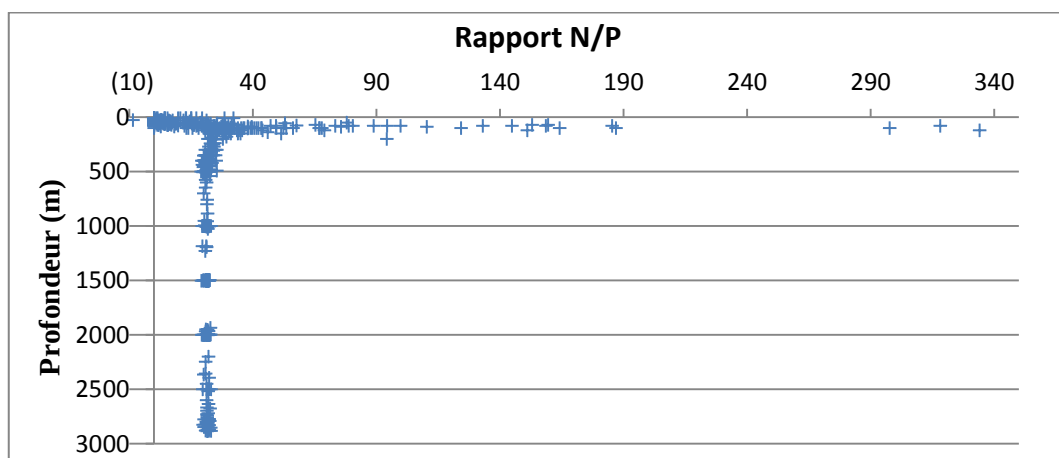


Figure 93: Distribution du rapport N/P en fonction de la profondeur (SOMBA-GE 2014).

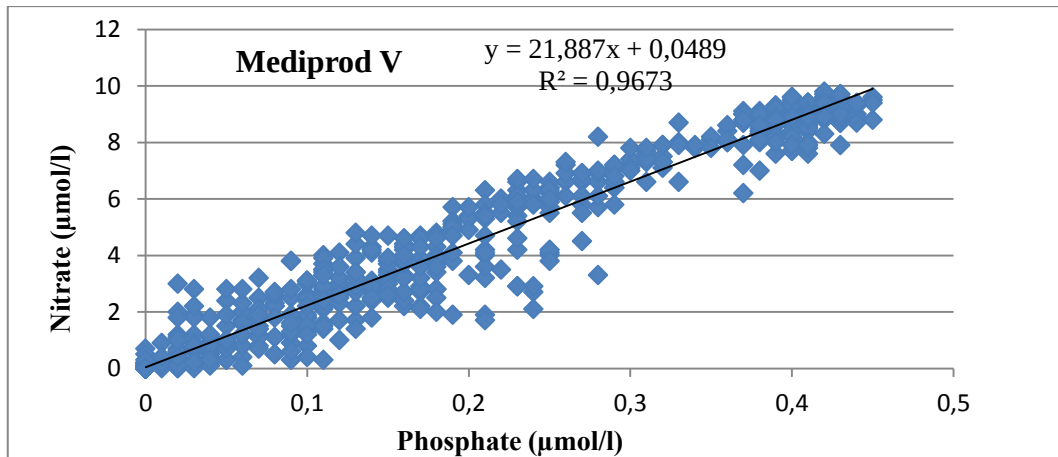


Figure 94: Diagramme de corrélation de nitrate/phosphates (Mediprod V).

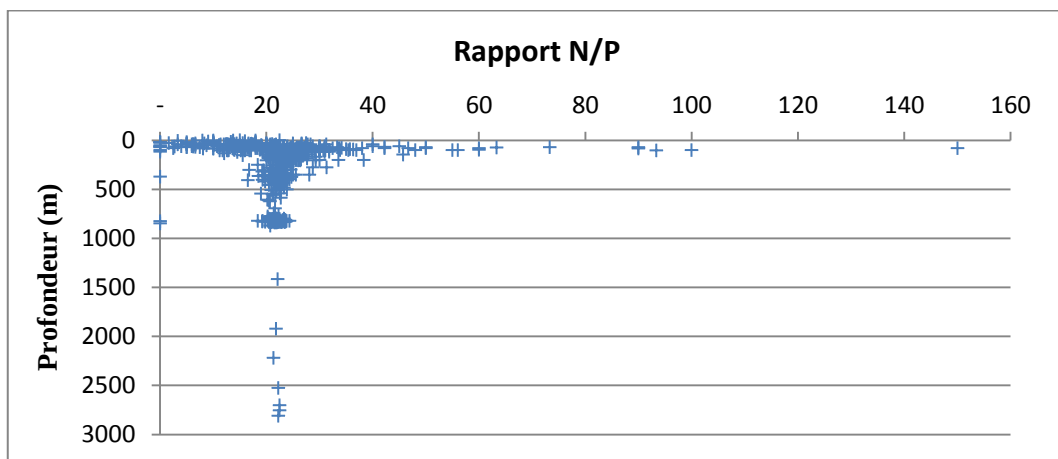


Figure 95: Distribution du rapport N/P en fonction de la profondeur (Mediprod V).

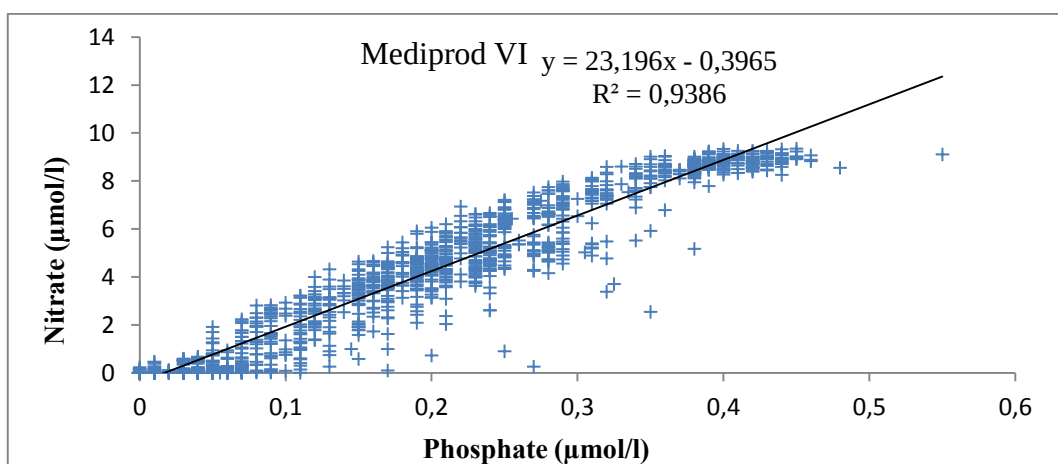


Figure 96: Diagramme de corrélation de nitrate/phosphates (Mediprod VI).

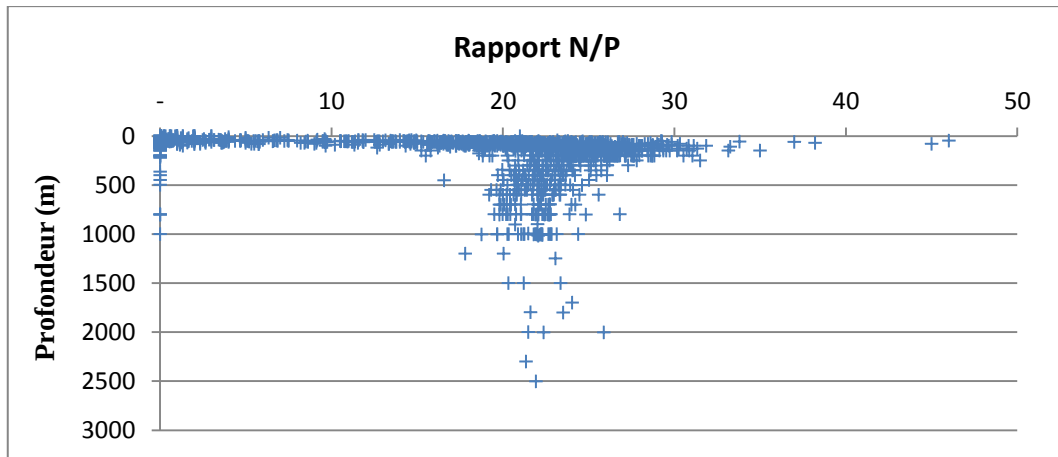


Figure 97: Distribution du rapport N/P en fonction de la profondeur (Mediprod VI).

Le rapport N/P élevé en Méditerranée peut être attribué soit à un déficit général, mais modéré en phosphate dû à l'adsorption de ces derniers sur des particules de poussières (Krom et *al.*, 1992) in (Béthoux et *al.*, 2002)), soit à une augmentation de la concentration des nitrates, comme résultant de la fixation de l'azote moléculaire qui est converti en ammonium (NH_4^+) et qui peut être utilisé pendant la photosynthèse (Hood et *al.*, 2000).

3.3.2 Digramme UAO-Nitrate

Le rapport UAO/ NO_3 exprime la dépendance entre les deux paramètres lors de la régénération des nitrates en consommant de l'oxygène dissous. La figure 98 montre une corrélation assez linéaire entre l'UAO et les nitrates des données SOMBA. La régression linéaire donne un rapport : $\text{UAO}/\text{NO}_3 = 6,84$. Ce rapport d'abondance est légèrement inférieur à celui de Redfield et *al.*, (1963) calculé pour l'océan global ($\text{UAO}/\text{N} = 8,63$).

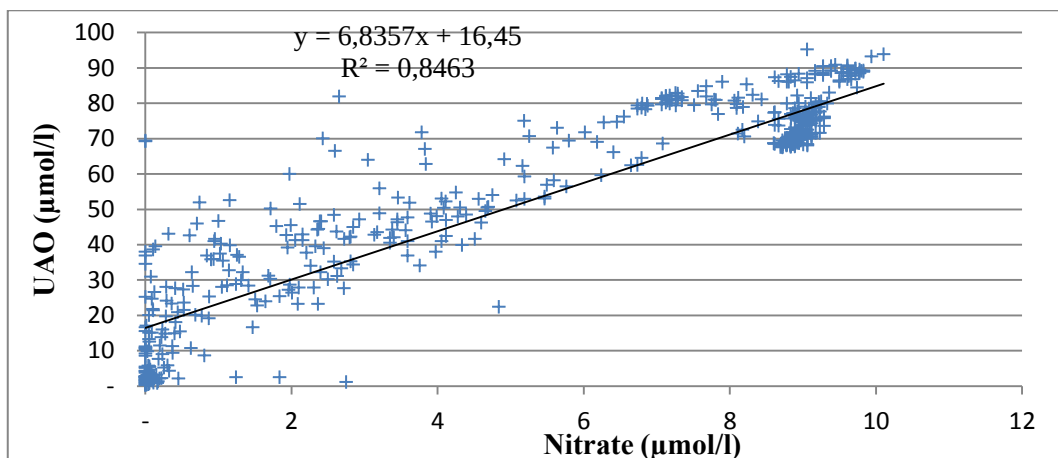


Figure 98: Diagramme UAO-Nitrate.

3.3.3 Digramme UAO-Phosphate

Le rapport UAO/P exprime la dépendance entre les deux paramètres lors de la régénération des orthophosphates en consommant de l'oxygène dissous. La figure 99 montre une corrélation assez linéaire entre l'UAO et les phosphates des données SOMBA. La régression linéaire donne un rapport : $UAO/P = 135,79$. Ce rapport est presque identique à celui de Redfield et *al.*, (1963) calculé pour l'océan global ($UAO/P = 138$).

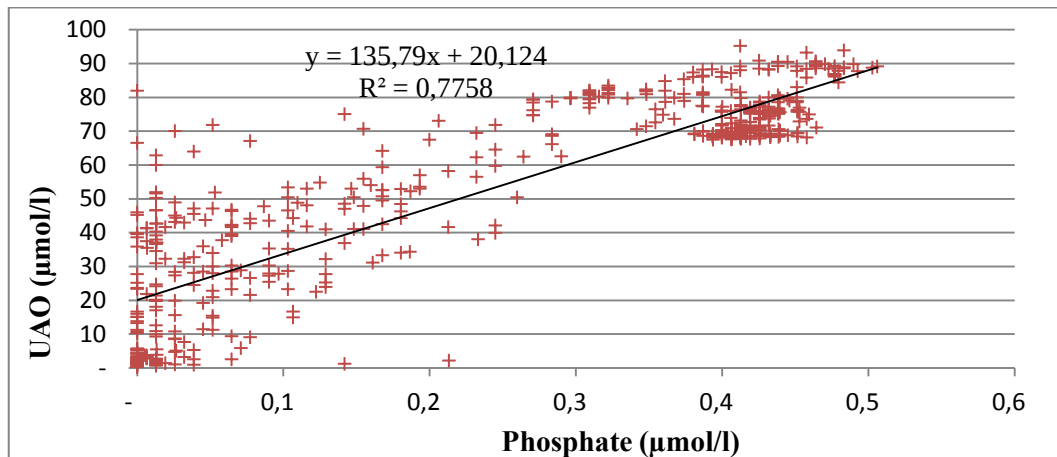


Figure 99: Diagramme UAO-Phosphate.

3.4 Comparaison entre trois campagnes (SOMBA GE 2014, MEDIPROD V, MEDIPROD VI)

3.4.1 Le diagramme θ -S

Le bassin occidental de la mer méditerranée et surtout le bassin algérien ont fait l'objet de plusieurs études approfondies par des campagnes océanographiques d'envergure. La campagne SOMBA (Aout/septembre 2014) est l'une des plus récentes. Deux campagnes océanographiques du programme MEDiterranean PRODUCTION (MEDIPROD) ont concerné le bassin algérien : MEDIPROD 5 en mai 1986 et MEDIPROD 6 en juin 1990. La comparaison des données de ces trois campagnes sera d'un grand intérêt scientifique.

La figure 100, constituée de superposition des diagrammes θ -S des trois campagnes océanographiques, montre que les données de la température et de la salinité des deux campagnes MEDIPROD6 et SOMBA sont en bonne concordance. Les diagrammes θ -S de ces deux campagnes sont donc constitués de masses identiques ou des mêmes masses d'eau. Cependant, les données de la campagne MEDIPROD5 présentent des différences assez nettes et significatives avec les données des deux autres campagnes : elles ont des salinités et des températures plus élevées. Par contre, les eaux profondes de la campagne

MEDIPROD 5 ont des salinités équivalentes à celles des autres campagnes mais avec des températures légèrement plus faibles.

Ces différences sont capitales et ne peuvent pas être analysées, discutées et interprétées dans ce travail. Dans ce dernier, on se limite à évoquer l'une des différences les plus importantes observée entre ces trois grandes campagnes. En effet, lors de la campagne MIDIPROD5, les eaux du courant algérien formaient des structures hydrodynamiques qui se déplaçaient dans l'espace (Millot, 1987). Lors de cette campagne, Millot (1987) avait montré l'existence de tourbillons cycloniques et anticycloniques, générés par le courant algérien. Cependant, lors des deux autres campagnes, les eaux du courant algérien se comportaient comme un grand fleuve avec des eaux qui s'écoulaient régulièrement d'ouest en est (Raimbault, et al., 1993 et ce travail) avec absence de structures hydrodynamiques.

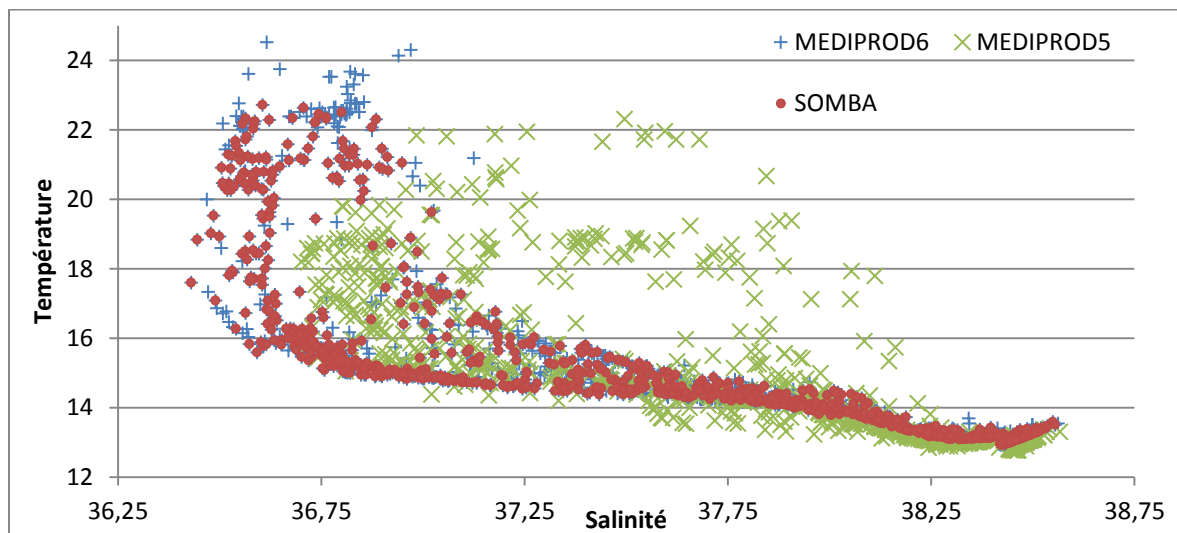


Figure 100: Diagramme θ -S pour les trois campagnes (MEDIPRODV, MEDIPRODV, SOMBA-GE)

3.4.2 Concentrations des sels nutritifs

En première approximation, les données de nutriments acquises à différentes profondeurs dans le bassin algérien, à la suite de la croisière SOMBA-GE 2014, permettent de comparer les données obtenues avec différentes campagnes (MEDIPROD V, MEDIPROD VI), même s'ils étaient dissemblables dans la distribution spatio-temporelle.

Dans la couche de 100 à 300 m de profondeur, la concentration des trois sels nutritifs (nitrate, phosphate et silicate) est relativement faible, surtout pour la campagne SOMBA. Cependant, dans la couche de 300 à 600 m de profondeur la concentration des sels nutritifs a augmentée considérablement. En effet, cette couche détient les concentrations maximales des nitrates et des phosphates. Vraisemblablement, cette augmentation peut être issue de la

régénération de ces sels nutritifs dans cette couche, car cette dernière correspond à la zone de régénération maximale des nitrates et des phosphates. Cette augmentation de concentrations de phosphate et de nitrate dans cette couche peut être attribuée aussi, en partie, aux afflux de l'Atlantique et aux afflux atmosphériques et terrestres. Malheureusement, il n'y a pas assez d'estimations des apports atmosphériques et terrestres disponibles à partir de mesures directes faites autour de la Méditerranée pour détecter une augmentation dans les sources atmosphériques et terrestres (Bethoux et *al.*, 1998). Et au-delà de 600 m de profondeur la concentration des nitrates et phosphates se stabilise à une concentration légèrement inférieure et assez homogène. Dans cette couche, la silice montre ses concentrations maximales, surtout pendant la campagne SOMBA où la concentration dépasse les 10 $\mu\text{mol/l}$, résultat de la régénération des silicates dans les eaux les plus profondes.

Tableau 7 : Concentration des nitrates en $\mu\text{mol/l}$ à différent couches lors des trois campagnes océanographiques.

Couches	MEDIPROD V	MEDIPROD VI	SOMBA
100-300 m	6,13	5,60	3,79
300-600 m	8,99	8,86	9,56
600-fond	8,75	8,53	8,58

Tableau 8 : Concentration des phosphates en $\mu\text{mol/l}$ à différent couches lors des trois campagnes océanographiques.

Couches	MEDIPROD V	MEDIPROD VI	SOMBA
100-300 m	0,26	0,23	0,14
300-600 m	0,42	0,40	0,46
600-fond	0,41	0,39	0,40

Tableau 9 : Concentration des silicates en $\mu\text{mol/l}$ à différent couches lors des trois campagnes océanographiques.

Couches	MEDIPROD V	MEDIPROD VI	SOMBA
100-300 m	3,85	3,27	2,70
300-600 m	7,1	7,33	7,99
600-fond	8,51	8,23	10,08

3.4.2.1 Couche 100-300 m

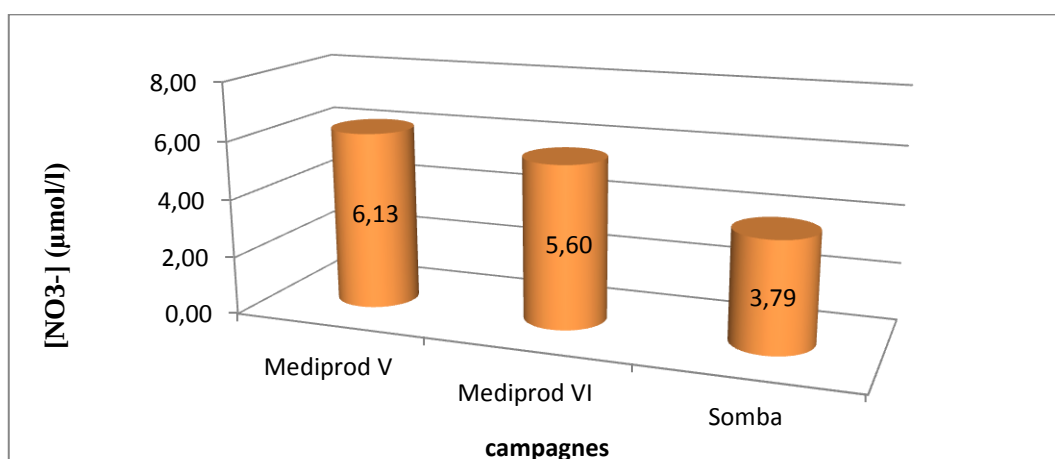


Figure 101: Concentrations des nitrates entre 100 et 300 m de profondeur pour les différentes campagnes.

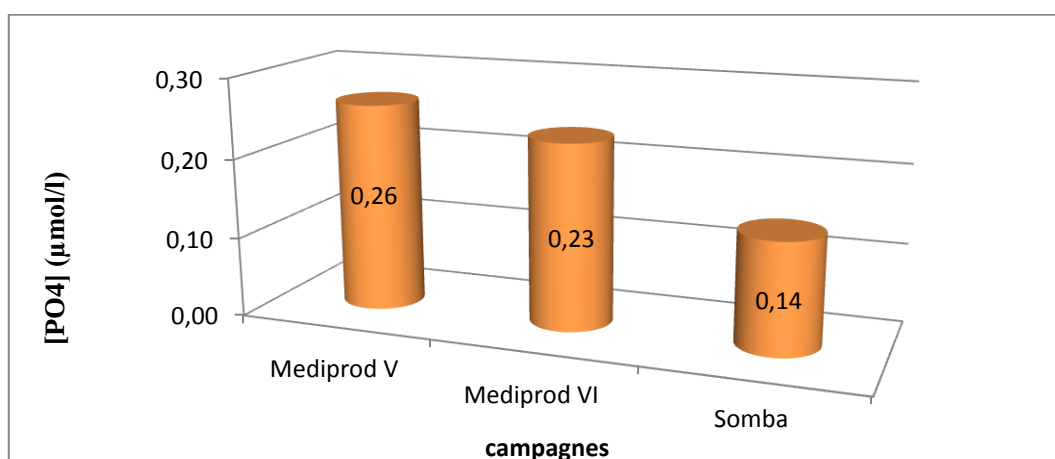


Figure 102: Concentrations des phosphates entre 100 et 300 m de profondeur pour les différentes campagnes.

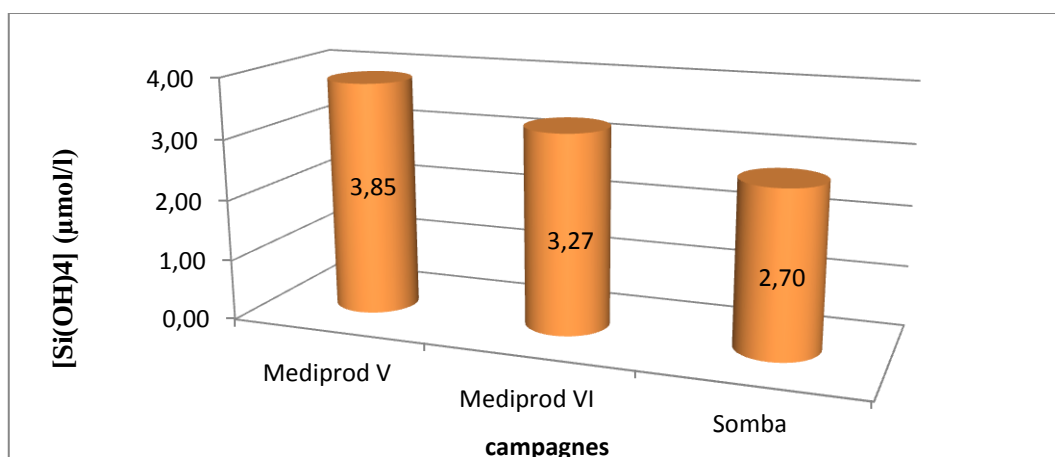


Figure 103: Concentrations des silicates entre 100 et 300 m de profondeur pour les différentes campagnes.

3.4.2.2 Couche 300-600 m

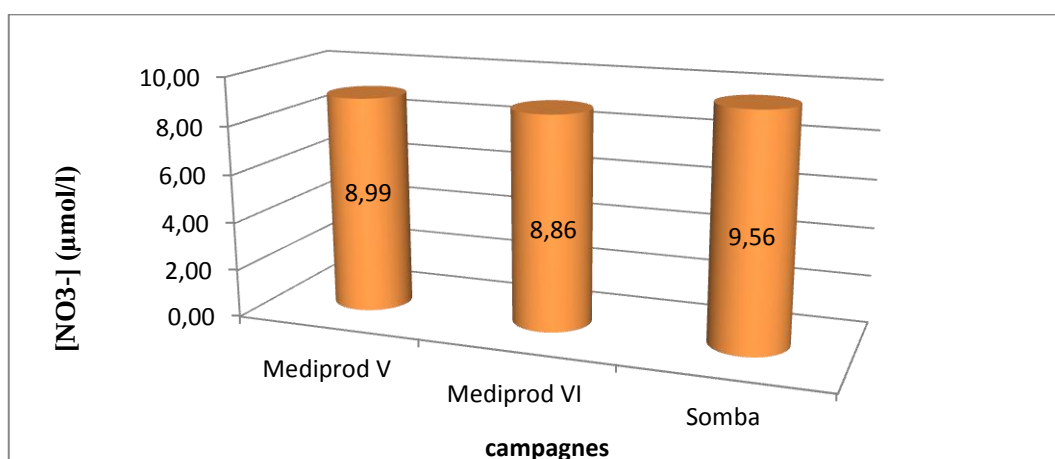


Figure 104: Concentrations des nitrates entre 300 et 600 m de profondeur pour les différentes campagnes.

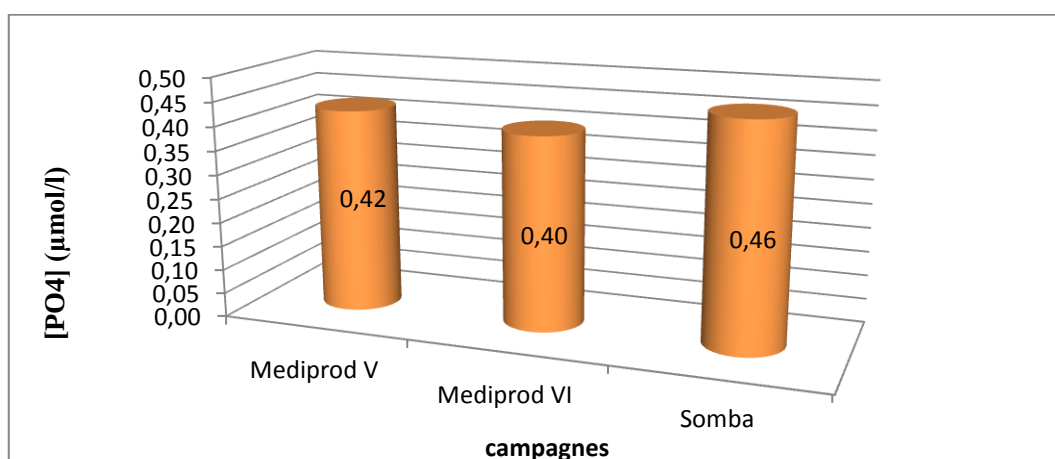


Figure 105: Concentrations des phosphates entre 300 et 600 m de profondeur pour les différentes campagnes.

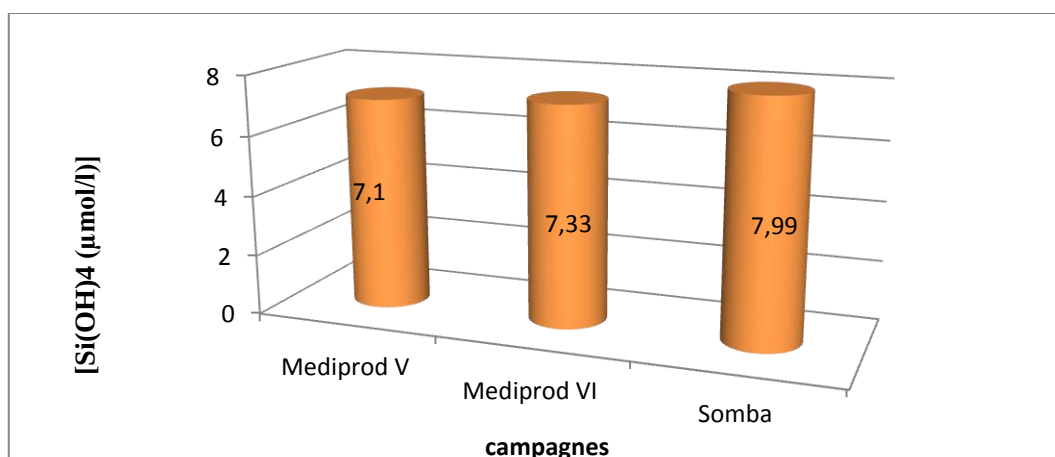


Figure 106: Concentrations des silicates entre 300 et 600 m de profondeur pour les différentes campagnes.

3.4.2.3 Couche 600- fond

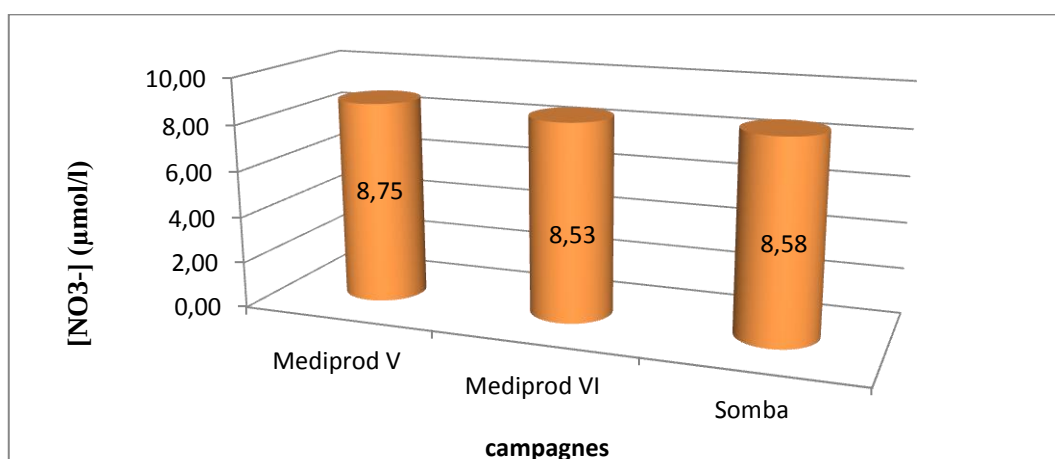


Figure 107: Concentrations des nitrates entre 600-fond pour les différentes campagnes.

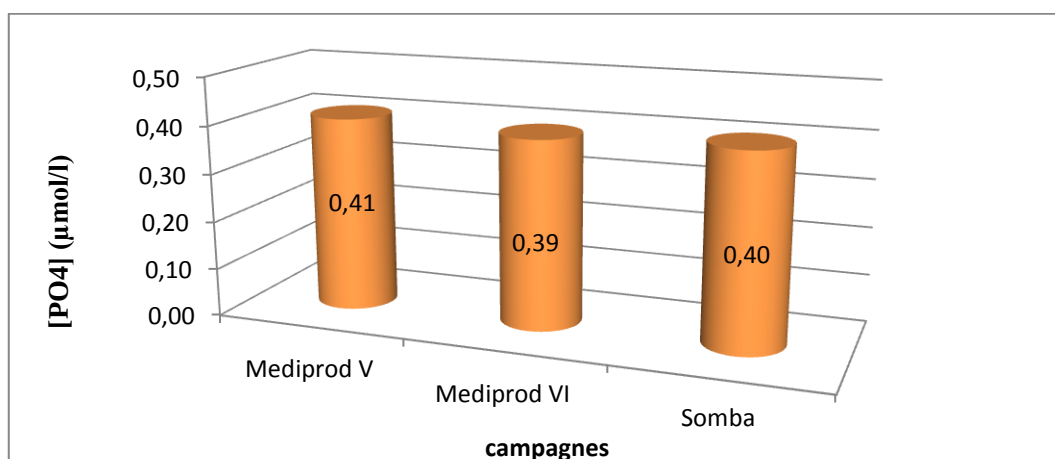


Figure 108: Concentrations des phosphates entre 600-fond pour les différentes campagnes.

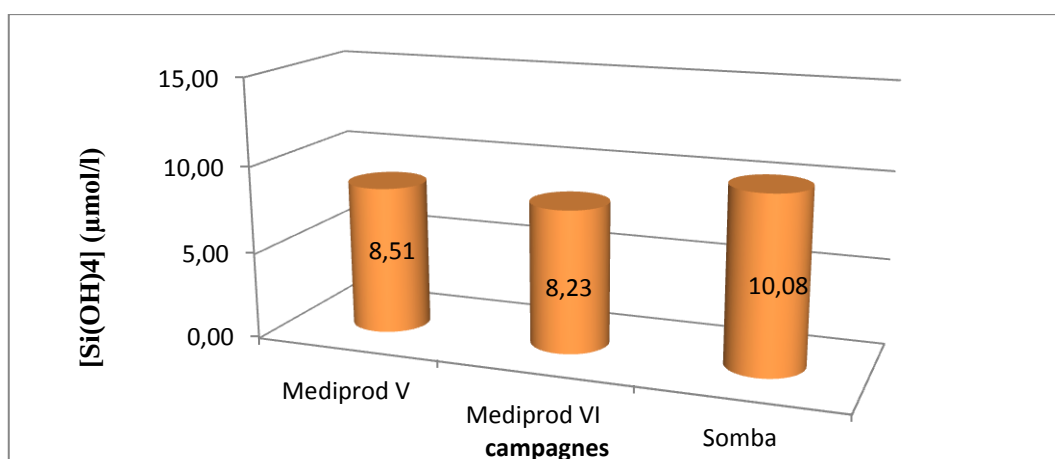


Figure 109: Concentrations des silicates entre 600-fond pour les différentes campagnes.

Conclusion

Conclusion générale

Au cours de la campagne SOMBA-GE 2014, de nombreuses mesures ont été réalisées sur l'ensemble du bassin Algérien permettant l'acquisition de nouvelles données. Ces données concernent l'hydrologie (Température, Salinité, Oxygène dissous), production (fluorescence), sels nutritifs (nitrates, phosphates et silicates).

Les données expérimentales obtenues dans le bassin algérien en 2014 illustrent l'homogénéité des concentrations de phosphate, nitrate et de silicate en eau profonde tout au long de ce bassin, comparable à l'homogénéité de la température et la salinité.

Les observations rapportées sur les distributions des éléments nutritifs au cours de la campagne SOMBA-GE 2014 sont en accord avec les données antérieures.

Les profils verticaux de concentrations de phosphate, nitrate et de silicate acquises dans le bassin algérien montrent des caractéristiques classiques de niveaux de nutriments dans la mer Méditerranée. Tout d'abord, les niveaux de nutriments augmentés, passant de la surface pauvre au niveau des eaux intermédiaires où de légères maxima sont atteints pour le nitrate et le phosphate. Il n'y a pas de maximum de silicate au niveau des eaux intermédiaires, dont la concentration augmente progressivement jusqu'au fond. Dans lequel l'absence d'un maximum de silicate dans la LIW a été interprétée comme une régénération plus lente du silicate que le phosphate ou les nitrates.

L'étude des paramètres hydrologiques a permis le recensement de trois masses d'eaux :

- La première masse d'eau est l'Eau Atlantique Modifiée (MAW) dont la salinité est inférieure ou égale à 38 psu, cette masse d'eau se trouve en surface (son épaisseur ne dépasse guère 200 m).
- La deuxième masse d'eau que l'on distingue relativement bien est l'Eau Levantine Intermédiaire ou LIW, que l'on trouve en-dessous de la MAW, entre 300 et 600 m de profondeur, caractérisée par des maxima de température et de salinité allant de 14 °C et 38,75 près du détroit de Sicile à 13,3 °C et 38,55 près du détroit de Gibraltar.
- La troisième eau type présente est l'Eau Profonde (WMDW), cette masse d'eau se caractérise par une température de 12,9 °C et une salinité de 38,45.

En utilisant les données des sels nutritifs et celle de l'oxygène dissous, nous avons tenté d'évaluer les rapports biochimiques de Redfield (rapports d'abondance) :

- Rapport N/P : on trouve un rapport de 20,93, largement supérieur à celui de Redfield admis pour l'océan global, mais il est équivalent à ce qui a été déjà trouvé dans la zone par d'autres auteurs.
- Rapport UAO/N : on trouve un rapport de 6,84 légèrement inférieur à celui de Redfield proposé pour l'océan global.
- Rapport UAO/P : on trouve un rapport de 135,79 équivalents à celui de Redfield admis pour l'océan global.

Une analyse statistique des données historiques ainsi que les nouvelles données acquises en 2014 démontrent une tendance croissante pour les concentrations de phosphate, nitrate et de silicate dans l'eau profonde.

Perspective

- Etude du mélange isopycnal et diapycnal à l'échelle du bassin algérien
- Estimation des rapports de Redfield de régénération

Bibliographie

Bibliographie

- Aminot A. et Chausse-Pied M., 1983.** *Manuel des analyses chimiques en milieu marin.* [éd.] CNEXO. Brest, France. p. 395.
- Aminot A. et Kerouel R., 2004.** *Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses.* [éd.] Ifremer. France. p. 336.
- Armstrong F.A., Stearns C.R. et Strickland J.D.H., 1967.** The measurement of upwelling and subsequent biological processes by means of a Technicon auto-analyser and associated equipment. *Deep Sea Res*, Vol. 14, pp. 381-389.
- Arnone R.A., Wiensenburg D.A. et Saunders K.D., 1990.** the origin and characteristics of the Algerian current. *Journal of Geophysical research*, Vol. 95, pp. 1587-1598.
- Benzohra M. et Millot C., 1995.** Characteristics and circulation of the surface and intermediate water off Algeria. *deep sea research*, Vol. 42, 10, pp. 1803-1830.
- Bethoux J.P., 1981.** Le phosphore et l'azote en Mer Méditerranée, bilan et fertilité potentielle. *Mar.Cham*, Vol. 10, pp. 141-158.
- Bethoux J., 1989.** Oxygen consumption, new production, vertical advection and environmental evolution in the mediterranean sea. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, Vol. 36, 5, pp. 769-781.
- Bethoux J.P., Morin P., Madec C. et Gentili B., 1992.** Phosphorus and nitrogen behaviour in the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Res*, Vol. 39, pp. 1641-1654.
- Bethoux J.P et Tailliez D., 1994.** Deep-Water in the Western Mediterranean Sea, Yearly Climatic Signature and Enigmatic Spreading. [auteur du livre] Allan R. Robinson. *Ocean Processes in Climate Dynamics: Global and Mediterranean Examples*. Dordrecht, pp. 355-369.
- Bethoux J.P et Gentili B., 1996.** The Mediterranean Sea, coastal and deep-sea signatures of climatic and environmental changes. [éd.] ELSEVIER, Vol. 7, pp. 383-394.
- Bethoux J.P., Morin P., Chaumery C., Connan O., Gentili B., Ruiz-Pino D., 1998.** Nutrients in the Mediterranean Sea, mass balance and statistical analysis of concentrations with respect to environmental change. *Marine Chemistry*, Vol. 63, pp. 155-169.
- Bethoux J.P., Morin P. et Ruiz-Pino D. P., 2002.** Temporal trends in nutrient ratios:chemical evidence of Mediterranean ecosystem changes driven by human activity. *Deep-Sea Research*, Vol. II, 49, pp. 2007-2016.
- Boudjakdji M., 2007.** Etude du cycle biogéochimique du carbone dans le bassin algéro-provençal. [mémoire de magister]. ISMAL. Alger. p. 88.

- Boulahtid M., 1987.** Analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Etude du mélange des masses d'eaux et de l'oxydation de la matière organique dans l'océan. *Thèse de Doctorat*. Université de Paris VI, France. p. 266.
- Boulahtid M. et Minster J.F., 1989.** Oxygen Consumption and Nutrient Regeneration Ratios along Isopycnal Horizons in the Pacific Ocean. *Marine Chemistry*, 26, pp. 133-153.
- Brankart J. et Brasseur P., 1998.** The general circulation in the mediterranean sea: a climatological approach. *Journal of Marine Systems*, Vol. 18, 1-3, pp. 41-70.
- Broecker W.S., Takahashi T. et Takahashi T., 1985.** Sources and flow patterns of deep-ocean waters as deduced from potential temperature, salinity, and initial phosphate concentration. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 90, pp. 6925–6939.
- Cardin V. et Gacic M., 2003.** Long-term heat flux variability and winter convection in the adriatic sea. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, Vol. 108, C9, pp. PBE4.1-PBE4.12.
- Chifflet S., Gerard P. et Fichez R., 2004.** *Manuel d'analyse des chimiques dans l'eau de mer*. Institut de recherche pour le developpement. p. 83, Notes techniques science de la mer, biologie marine .
- Coste B., 1969.** Echange des sels nutritifs entre la Mer Méditerranée et l'Océan Atlantique. *Cah. Océanogr*, Vol. 21, pp. 943-963.
- Coste B., Minas H.J. et Bonin M.C., 1984.** Propriétés hydrologiques et chimiques des eaux du Bassin Occidental de la Méditerranée. Campagne Mediprod 4, 15 octobre–17 novembre 1981. [éd.] CNEXO. *Technical Report 26. Resultats des campagnes a la mer*. p. 106.
- Coste B., Le Corre P., Minas H.J. et Morin P., 1988.** Les éléments nutritifs dans le bassin occidental de la Méditerranée. Bilan des échanges avec l'océan Atlantique à Gibraltar. *Oceanologica Acta*, pp. 87-93.
- Cullen J., Stewart E., Renger E., Eppley R. et Winant C., 1983.** Vertical motion of the thermocline, nitracline and chlorophyll maximum layers in relation to currents on the southern california shelf. *Journal of Marine Research*. Vol. 41, 2, pp. 239-262.
- Delmas R. et Treguer P., 1984.** Résultats de la campagne PHYCEMED 2. *Contrat CNEXO 83/29000, Groupe Chimie des Ecosystemes Marins*.
- Dugdale R. et Wilkerson F., 1988.** Nutrient sources and primary production in the eastern mediterranean. *Oceanol Acta*. Vol. 9, pp. 179-184.
- Flemer D. A., 1969.** Continuous measurement of in vivo chlorophyll of a dinoflagellate bloom in Chesapeake Bay. *Chesapeake Sci.* Vol. 10, pp. 99-103.
- Gascard J.C., 1978.** Mediterranean deep water formation, baroclinic instabilities and oceanic eddies. *Oceanologica Acta*. Vol. 1, 3, pp. 315-330.

- Gruber N., 2008.** The marine nitrogen cycle: Overview and challenges, pp. 1-50.
- Hamad N., Millot C. et Taupier-Letage I., 2005.** A new hypothesis about the surface circulation in the eastern basin of the mediterranean sea. *Progress in Oceanography*. Vol. 66, 2-4, pp. 287-298.
- Hood R.R., Michaels A.F. et Capone D.G., 2000.** Answers sought to the enigma of marine nitrogen fixation. *EOS*. Vol. 81, 13, pp. 133–139.
- Ingri N., 1959.** Equilibrium studies of polyanions. Silicate ions in NaCl medium. *Acta Chem. scand.* Vol. IV, 13, pp. 758-775.
- Jacques G. et Treguer P., 1986.** *Ecosystème pélagique marin. Collection d'écologie*. [éd.] Masson. Paris, France, p. 243.
- La Violette P.E., 1994.** Overview of the major forcings and water masses of the Western Mediterranean sea. Seasonal and interannual variability of the Western Mediterranean sea. [éd.] P.E La Violette. American Geophysical Union, pp. 1-11.
- Lacombe H., Gascard J.C., Gonella J. et Béthoux J.P., 1981.** Response of the Mediterranean to the water and energy fluxes across its surface, on seasonal and interannual scales. *Oceanologica Acta*. Vol. 4, 2, pp. 247-255.
- Lascaratos A. et Nittis K., 1998.** A high-resolution three-dimensional numerical study of intermediate water formation in the levantine sea. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 103, C9, pp. 18,497-18,511.
- Lascaratos A., Williams R.G. et Tragou E., 1993.** A mixed-layer study of the formation of levantine intermediate water. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 98, C8, pp. 739-749.
- Lorenzen C. L., 1966.** A method for continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep Sea Res.* Vol. 13, pp. 223-227.
- Madec G., Chartier M. et Crépon M., 1991.** The effect of thermohaline forcing variability on deep water formation in the western mediterranean sea : a high-resolution three-dimensional numerical study. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. Vol. 15, 3-5, pp. 301-332.
- Malanotte-Rizzoli P. et Hecht A., 1988.** Large-scale properties of the eastern mediterranean-a review. *Oceanologica Acta*. 11.Vol. 4, pp. 323-335.
- MEDOC-Group., 1970.** Observation of formation of deep water in the mediterranean sea. *Nature*. Vol. 227, pp. 1037-1040.
- Millero F.J. et Sohn M.L., 1992.** *Chemical Oceanography*, CRC, Press, p. 531.
- Millot C., 1999.** Circulation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Marine System*. Vol. 20, pp. 423–442.

- Millot C., 1994.** Models and data: a synergetic approach in the western Mediterranean sea. Ocean processes in climate dynamics: global and Mediterranean examples. Kluwer Academie, pp. 407-425.
- Millot C., 1987.** Circulation in the mediterranean sea. *Oceanol Acta*. Vol. 10, 2, pp. 143-149.
- Millot C. et Taupier-Letage I., 2005.** Circulation in the Mediterranean Sea. [auteur du livre] Alain Salot. *The Mediterranean Sea*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. Vol. 5, pp. 29–66.
- Millot C., Taupier-Letage I. et Benzohra M., 1990.** The Algerian eddies. *Earth-Science Reviews*. Vol. 27, pp. 203-219.
- Minas H.J., 1971.** Resultats de la campagne MEDIPROD I du JEAN CHARCOT, 1–14 Mars 1969 et 3–17 Avril 1969. *Cahiers Oceanographique*. Vol. 23, S1, pp. 93–144.
- Minster J.F. et Boulahdid M., 1987.** Redfield ratios along isopycnal subsurfaces : a complementary study. *Deep-Sea Research*. Vol. 34, 12, pp. 1981-2003.
- Moutin T. et Raimbault P., 2002.** Primary production, carbon export and nutrients availability in western and eastern mediterranean sea in early summer 1996 (MINOS cruise). *Journal of Marine Systems*. Vol. 33-34, 0, pp. 273-288.
- Mullin J.B. et Riley J.P., 1955.** The spectrophotometric determination of silicate-silicon natural waters with special reference to sea water. *Anal.Chil.Acta*. Vol. 12, pp. 162-170.
- Murphy J. et Riley J.P., 1962.** A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal.Chim.Acta*. Vol. 27, pp. 31-36.
- Obaton D., 1998.** *Circulation et modélisation de la Méditerranée Occidentale et du Golfe du Lion-Synthèse des connaissances et des travaux existants*. IFREMER. Brest, p. 87. DEUAO/D.0./98.58 .
- Puillat I., Taupier-Letage I. et Millot C., 2002.** Algerian Eddies lifetime can near 3 years. *Journal of Marine System*. ELSEVIER. Vol. 31, pp. 245–259.
- Pujo-Pay M., Pujo-Pay M., Conan P., Oriol L., Cornet-Barthaux V., Falco C., Ghiglione J.F., Goyet C., Moutin T. et Prieur L., 2011.** Integrated survey of elemental stoichiometry (c, n, p) from the western to eastern mediterranean sea. *Biogeosciences*. Vol. 8, 4, pp. 883-899.
- Raimbault P. et Bonin M.C., 1990.** Production pelagique de la Mediterranee sud-occidentale courant algerien, mesures hydrologiques, chimiques et biologiques. *Technical Report 16, COF/IFREMER*, p. 176.
- Raimbault P., Besse M.G., Lochet F. et Nguyen T., 1990.** Methode d'analyse des sels nutritifs, Variabilite a moyenne echelle du Bassin Algerien, observations hydrologiques , biologiques et chimiques. *Technical Report 11, COF/IFREMER*, pp. 12–69.

- Raimbault P., Coste B., Boulahdid M. et Boudjellal Y., 1993.** Origin of high phytoplankton concentration in deep chlorophyll maximum (DCM) in a frontal region of the Southwestern Mediterranean Sea (Algerian Current). *Deep-Sea Research I*. Vol. 40, 4, pp. 791-804.
- Redfield A.C., Ketchum B.H. et Richards F.A., 1963.** The influence of organisms on the composition of sea water. *The Sea*. Vol. 2, pp. 26–77.
- Ribera d'Alcalà M., Civitarese G., Conversano F. et Lavezza R., 2003.** Nutrient ratios and fluxes hint at overlooked processes in the mediterranean sea. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, pp. 1- 16.
- Riley et Chester., 1971.** *Introduction to marine chemistry*. Department of oceanography, The University of Liverpool, England. [éd.] ACADEMIC PRESS London and New York, p. 465.
- Rio M.H., Poulain P.M., Pascual A., Mauri E., Larnicol G. et Santoleri R., 2007.** A mean dynamic top ography of the mediterranean sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model. *Journal of Marine Systems*. Vol. 65, 1, pp. 484-508.
- Rodier J., Legube B. et Merlet N., 2009.** *L'analyse de l'eau*. [éd.] Dunod. Paris . 978-2-10-054179-9.
- Roether W. et Schlitzer R., 1991.** Eastern mediterranean deep water renewal on the basis of chlorouoromethane and tritium data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. Vol. 15, 3-5, pp. 333-354.
- Schott F., Visbeck M., Send U., Fischer J., Stramma L. et Desaubies Y., 1996.** Observions of deep convection in the gulf of lions, northern mediterranean, during the winter of 1991/92. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 26, 4, pp. 505-524.
- Sjöberg S., Nordin A., Ingri N., 1981.** Equilibrium and structural studies of silicon (IV) and aluminium (III) in aqueous solution. *Marine Chemistry*. Vol.10, pp. 521-532.
- Smith R.O., Bryden H.L. et Stansfield K., 2008.** Observations of new western mediterranean deep formation using argo floats 2004-2006. *Ocean Science*. Vol. 4, 2, pp. 133-149.
- Takahachi T., Broecker W.S. et Langer S., 1985.** Redfield ratios based on chemical data from isopycnal surfaces. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 90, pp. 6907–6924.
- Taupier-Letage I. et Millet C., 1988.** Surface circulation in the Algerian basin during 1984. *Oceanologica Acta*. (n°spécial), pp. 79-85.
- Taupier-Letage I., Puillat I., Millot C. et Raimbault P., 2003.** Biological response to mesoscale eddies in the Algerian Basin. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 108, C8.

Tintoré J.D., La Violette P.E., Blade I. et Cruzado A., 1988. A study of an intense density front in the eastern Alboran sea: the Almeria-Oran front. *Journal of physical Oceanography*. Vol. 18, pp. 1384-1397.

Tréguer P. et LeCorre P., 1975. *Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Utilisation de l'AutoAnalyser II Technicon*. 2nd ed. Brest, pp. 1-110.

Tréguer P., Nelson D.M., Van Bennekom A.J., DeMaster D.J., Leynaert A. et Quéguiner, B., 1995. The silica balance in the world ocean: a re-estimate. *SCIENCE*. Vol. 268, pp. 375-379.

Voituriez B. et Dandonneau Y., 1974. Relations entre la structure thermique la production primaire et la régénération des sels nutritifs dans le dôme de Guinée. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.* Vol. XII, 4, pp. 241-255.

Wood E. P. K., Amstrong F. A. J. et Richard F. A., 1967. Determination of nitrate in seawater by cadmium-cooper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Assc. U.K.* Vol. 47, pp. 23-31.

Wüst G., 1961. On the vertical circulation of the mediterranean sea. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 66, 10, pp. 3261-3271.

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Etalonnage et calcul des concentrations des sels nutritifs.

Tableau : Concentration des standards et leur hauteur de pic pour les échantillons de surface de 23/09/2014.						
STD	[C] NO3	HP	F	[C] PO4	HP	F
Eau de mer	0	0		0	1,3	
S1	2	3,6	0,556	0,2	2,8	0,133
S2	5	8,8	0,568	0,5	5,2	0,128
S3	10	17,9	0,559	1	9,5	0,122
Eau de mer		0		0	1,25	
S1	2	3,7	0,541	0,2	2,75	0,138
S2	5	8,9	0,562	0,5	5,3	0,125
S3	10	17,9	0,559	1	9,5	0,122
Eau de mer		0		0	1,25	
S1	2	3,7	0,541	0,2	2,7	0,143
S2	5	9	0,556	0,5	5,4	0,122
S3	10	18	0,556	1	9,6	0,120
Eau de mer		0		0	1,3	
S1	2	3,8	0,526	0,2	2,7	0,143
S2	5	9,1	0,549	0,5	5,2	0,128
S3	10	18	0,556	1	9,5	0,122
moyenne			0,552			0,129
effet sel		0,2			1,3	

Tableau : Concentration des standards et leur hauteur de pic pour les échantillons profonde de 29/09/2014.						
STD	[C] NO3	HP	F	[C] PO4	HP	F
Eau de mer	0	0		0	1,3	
S1	5	8,7	0,575	0,5	5,2	0,128
S2	8	14,1	0,567	0,8	7,7	0,125
S3	10	17,5	0,571	1	9,45	0,123
Eau de mer	0	0,1		0	1,25	
S1	5	8,7	0,575	0,5	5,1	0,132
S2	8	14,05	0,569	0,8	7,6	0,127
S3	10	17,5	0,571	1	9,25	0,126
Eau de mer	0	0,1		0	1,3	
S1	5	8,8	0,568	0,5	5	0,135
S2	8	14,2	0,563	0,8	7,5	0,129
S3	10	17,6	0,568	1	9,2	0,127
Eau de mer	0	0		0	1,3	
S1	5	8,7	0,575	0,5	5	0,135
S2	8	14,1	0,567	0,8	7,4	0,131
S3	10	17,5	0,571	1	9,2	0,127
moyenne			0,570			0,129
effet sel		0,2			1,3	

Tableau : Concentration des standards et leur hauteur de pic pour les échantillons profonde de 30/09/2014.						
STD	[C] NO3	HP	F	[C] PO4	HP	F
Eau de mer	0	0		0	1,3	
S1	5	8,7	0,575	0,5	5,2	0,128
S2	8	13,9	0,576	0,8	7,9	0,121
S3	10	17,3	0,578	1	9,7	0,119
Eau de mer	0	0		0	1,25	
S1	5	8,8	0,568	0,5	5,2	0,128
S2	8	14,1	0,567	0,8	7,8	0,123
S3	10	17,6	0,568	1	9,6	0,120
Eau de mer	0	0		0	1,3	
S1	5	8,8	0,568	0,5	5	0,135
S2	8	14,2	0,563	0,8	7,5	0,129
S3	10	17,6	0,568	1	9,2	0,127
Eau de mer	0	0		0	1,3	
S1	5	8,7	0,575	0,5	5	0,135
S2	8	14,1	0,567	0,8	7,4	0,131
S3	10	17,5	0,571	1	9,2	0,127
moyenne			0,571			0,127
effet sel		0,2			1,3	

Annexe 2 : Teste de reproductibilité

station	Prof (dBar)	C NO3	C PO4	station	Prof (dBar)	C NO3	C PO4
1-1	150	5,77	0,23	2-8	2809	8,84	0,41
1-1	150	5,80	0,23	2-8	2809	8,78	0,41
	Ecar-type	0,02	0,00		Ecar-type	0,04	0,00
1-5	50	0,06	0,01	2-9	2449	8,78	0,41
1-5	50	0,06	0,02	2-9	2449	8,78	0,41
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,00	0,00
1-6	30	0,06	0,02	2-10	20	0,06	0,00
1-6	30	0,06	0,03	2-10	20	0,00	0,00
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,04	0,04
1-9	150	4,25	0,12	2-12	2200	8,84	0,40
1-9	150	4,25	0,13	2-12	2200	8,84	0,40
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,00	0,00
1-11	75	0,41	0,05	2-13	10	0,06	0,00
1-11	75	0,44	0,06	2-13	10	0,06	0,00
	Ecar-type	0,02	0,01		Ecar-type	0,00	0,00
2-1	1005	9,23	0,43	2-14	2810	8,78	0,40
2-1	1005	9,23	0,43	2-14	2810	8,72	0,39
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,04	0,01
2-2	10	0,06	0,01	2-16	2636	8,81	0,40
2-2	10	0,06	0,01	2-16	2636	8,84	0,39
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,02	0,00
2-3	30	0,06	0,03	3-2	40	2,76	0,18
2-3	30	0,06	0,03	3-2	40	2,76	0,19
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,00	0,00
2-4	451	9,17	0,43	3-8	30	0,03	0,06
2-4	451	9,17	0,44	3-8	30	0,03	0,05
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,00	0,01
2-5	28	0,06	0,00	4-4	2829	8,61	0,39
2-5	28	0,06	0,00	4-4	2829	8,61	0,39
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,00	0,00
2-6	350	10,11	0,48	4-13	351	8,34	0,35
2-6	350	10,11	0,48	4-13	351	8,28	0,35
	Ecar-type	0,00	0,00		Ecar-type	0,04	0,00
2-7	400	9,61	0,46				
2-7	400	9,61	0,47				
	Ecar-type	0,00	0,00				

Résumé

Au cours de la campagne SOMBA-GE (2014), de nombreuses mesures de température, de salinité, d'oxygène dissous, de fluorescence et de sels nutritifs ont été réalisées sur l'ensemble du bassin Algérien suivant des transects côte-large et un transect parallèle au talus continental.

Les températures mesurées présentent un gradient décroissant de la surface (22 et 27 °C) vers le fond (12,9 °C). Les salinités les plus faibles sont retrouvées en surface avec des valeurs allant de 36,5 à 37,5. Ces valeurs augmentent pour atteindre un maximum (valeurs supérieures à 38,5) entre 300 et 500 m de profondeur. La salinité décroît ensuite légèrement pour atteindre des valeurs de 38.

La couche de surface, d'une épaisseur de 50 à 70 m, présente des concentrations en nitrates et phosphates presque nulles qui peuvent être expliquées par un épuisement dû à l'activité photosynthétique. Au-delà de cette couche, la concentration des sels nutritifs augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre un maximum entre 300 et 600 m avec des concentrations de l'ordre de 10 $\mu\text{mol/l}$ et 0,5 $\mu\text{mol/l}$ pour les nitrates et les phosphates respectivement. Dans les eaux profondes, cette concentration se stabilise légèrement entre 8 et 9 $\mu\text{mol/l}$ pour les nitrates et à 0,4 $\mu\text{mol/l}$ pour les phosphates. Les concentrations des silicates, quant-à-elles, augmentent de la surface vers le fond. En effet, les concentrations des silicates au niveau du bassin Algérien varient entre un minimum de 0,471 $\mu\text{mol/l}$ relevé en surface et un maximum de 11,199 $\mu\text{mol/l}$ au fond du bassin. La corrélation significative entre les données de nitrates et de phosphates ($R^2=0,967$) nous permet d'estimer un rapport N/P de 20,93.

Abstract

During SOMBA-GE cruise (2014), numerous measurements of temperature, salinity, dissolved oxygen, fluorescence and nutrients were conducted across the Algerian basin following north-south transects and a parallel transect to the slope.

The measured temperatures show a decreasing gradient from the surface (22-27°C) to the bottom (12.9°C). The lowest salinities are found in the surface with values ranging from 36.5 to 37.5. These values reach a maximum (values greater than 38.5) between 300 and 500 m depth. Salinity then decreases slightly to values of about 38.

The surface layer (0-70 m) is almost depleted in nitrates and phosphates, which can be explained by the photosynthetic activity. Beyond this layer, nutrients concentrations progressively increase with depth to reach a maximum between 300 and 600m with concentrations of about 10 $\mu\text{mol/l}$ and 0.5 $\mu\text{mol/l}$ for nitrates and phosphates respectively. In deep waters, these concentrations stabilize at about 8-9 $\mu\text{mol/l}$ for nitrates and 0.4 $\mu\text{mol/l}$ for phosphates. On the other hand, silicates concentrations increase from the surface toward the bottom of water column (from 0.471 to 11.199 $\mu\text{mol/l}$). The significant correlation between nitrates and phosphates data ($R^2 = 0.967$) allows the estimation of a N/P ratio of 20.93.