



Variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques de la Rade de Marseille



Rapport du TP Sortie en Mer dans le cadre de 'l'UE OCE102
M1 océanographie 2012-2013
Selles Jules _ Martinache Maxime _ Leclech Sebastien



Aix*Marseille
université



Sommaire

Résumé	2
1 Introduction	3
2 Matériels et Méthodes	4
2.1 Variables mesurés par la sonde CTD.....	5
2.2 Série à long terme SOMLIT.....	6
2.3 Analyse des micro-organismes autotrophes (phytoplancton) présent dans la colonne d'eau.....	6
2.4 Analyse des micro-organismes hétérotrophes (zooplancton).....	8
3 Resultats	8
3.1 Paramètres physico-chimiques	8
3.2 Paramètres biologiques.....	11
3.2.1 Biomasse phytoplanctonique.....	11
3.2.2 Biomasse zooplanctonique	14
3.2.3 Identification des organismes du neuston.....	16
3.3 Séries à long terme SOMLIT.....	18
3.3.1 Variabilité annuelle	18
3.3.1 Variabilité inter-annuelle	24
4 Discussion	28
4.1 Variabilité spatiale des écosystèmes pélagiques	28
4.1.1 Répartition des communautés zooplanctoniques	29
4.1.2 Répartition des communautés phytoplanctoniques	29
4.2 Variabilité temporelle dans les écosystèmes pélagiques.....	30
4.2.1 Variabilité annuelle.....	30
4.2.2 Variabilité inter-annuelle.....	30
Bibliographie	34

Résumé

La mise en évidence de l'évolution temporelle et spatiale des paramètres physico-chimiques (température, salinité, chlorophylle a, NO₃⁻) et biologique (biomasse et étude taxonomique des méso-organismes hétérotrophes) dans la rade de Marseille a été permise par une campagne en mer du 24 septembre au 04 octobre 2012.

Les stations SOMLIT, Frioul et Julio ont ainsi été échantillonnés par sonde CTD, et par bouteille Niskin® et ont permis de mettre en évidence une production primaire assez importante (« bloom automnale ») avec des valeurs de l'ordre de 0,2 à 0,3 µg/l aux profondeurs de maximum de fluorescence à la base de la thermocline à 30 m de profondeur.

L'étude de la variabilité spatiale des paramètres hydrobiologiques présente des tendances communes. Globalement, la thermocline est bien établie et délimite une faible couche de mélange dont la profondeur est d'environ 20 mètres. Les résultats fluorimétriques reflètent les variations des paramètres hydrologiques.

L'étude des biomasses zooplanctoniques met en évidence des différences dans les proportions de classes de taille différentes selon les stations, avec une prédominance du microplancton à SOMLIT (rôle important du recyclage) qui indique une fin de successions et donc de plus faibles productions primaires, alors que le mésoplancton domine dans les autres stations.

Enfin le traitement des séries à long terme de la station SOMLIT décrit la variation des paramètres physico-chimiques de l'écosystème à l'échelle de la décennie et décrit des cyclicités annuelles liées aux saisons (blooms printanier expliqué par le modèle de Sverdrup), et tendance générale d'eutrophisation de la rade de Marseille depuis 2005.

1 Introduction

Les écosystèmes pélagiques connaissent des variabilités dans l'espace et dans le temps assez importante sous l'influence de phénomènes atmosphériques, des circulations de masses d'eau qui impactent à leurs tours la distribution des organismes planctoniques. Cette répartition en patchiness subit des variations cycliques qui peuvent être approché quantitativement par des mesures de biomasse sèche pour les organismes hétérotrophes, par des mesures de fluorescence pour les organismes responsable de la production primaire par photosynthèse. Ces organismes sont dans les écosystèmes pélagiques la base du réseau trophique (contrôle « bottom-up ») et leurs abondances vont réguler celles des compartiments trophiques supérieurs. La variabilité de ces organismes sera étudié ici de manière globale par la variabilité de concentration en « chlorophylle a » afin de mettre en évidence des cyclicités à l'échelle de la semaine via les données échantillonnées, de l'année et interannuelle via les données de la station SOMLIT mis à disposition par le programme SOFTCOM. L'étude en parallèle des paramètres physico-chimique (e.g sels nutritifs, température, salinité.) permet de mettre en relation l'abondance des organismes autotrophes avec l'hydrodynamisme locale et les concentrations en éléments nutritifs.

Ces différents paramètres sont mesurés in situ depuis un certain nombre d'année, et la mesure de la « chlorophylle a » est probablement le paramètre physico-chimique le plus mesuré en Océanographie (Jeffrey & Mantoura, 1997) depuis que sa présence a été rapporté en milieu marin.

L'hydrodynamisme local est piloté par un courant d'ouest constitué d'eaux intermédiaires méditerranéennes oligotrophes. Il peut être perturbé par de forts coups de Mistral, qui souffle entre 135 et 150 jours par an, pouvant conduire à un mixage de la couche de mélange, entre autres, en modifiant la profondeur de la thermocline et les apports en sels nutritifs. La rade de Marseille comprend des particularités tant par ces caractéristiques géographiques, géomorphologiques, océanographiques que par ces aménagements anthropiques littoraux. Les aménagements, les émissaires d'eaux usées notamment celui de Cortiou et ces digues modifient l'hydrodynamisme local et la chimie de l'eau. L'ensemble de ces aménagements sont susceptibles de modifier durablement la distribution des organismes planctoniques à la base du réseau trophique.

Ce rapport propose une étude du milieu pélagique côtier au niveau de 3 stations présentent dans la rade de Marseille : Frioul, Julio et Somlit. Il s'articule autour du traitement des données prélevées durant la période de mesure du 24 septembre au 04 octobre 2012 qui a permis d'analyser les variabilités spatiales de la température, salinité, fluorescence et « chlorophylle a » à l'échelle de la rade de Marseille. Ainsi que sur le prélèvement par filet à plancton sur la colonne d'eau et en sub-surface afin d'analyser en parallèle l'abondance en organisme autotrophe puis celle des organismes hétérotrophes, principalement du métazooplacton, organisme de 20 μm à 2000 μm selon la classificaion de Sieburth *et al.* (1978), présents dans la couche de surface. Les séries temporelles à long termes acquises depuis 1997 (pour la température de surface) et depuis 2008 (température, salinité, fluorescence à 3 profondeur) à la station Somlit (Sofcom), ainsi qu'un profil annuelle de 2010 permettent d'étudier la variabilité intra et interannuelle.

Ces différentes séries de données nous permettent l'accès à la variabilité du système pélagique côtier de la côte marseillaise afin de définir les facteurs fondamentaux de son contrôle.

2 Matériels et Méthodes

Des prélèvements sur trois stations à l'aide du navire Antedon II (rattaché à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie MIO) ont été réalisés afin de représenter le plus fidèlement la distribution spatiale des peuplements phytoplanctons et zooplanctoniques (ensemble hétéroclite de micro-organismes autotrophes et hétérotrophes) en relation avec les variations des paramètres physico-chimique le long de la colonne d'eau. Nous avons également utilisé pour l'étude des séries temporelles à long terme de mesures des paramètres physico-chimiques de la station Somlit (Service d'Observation en Milieu Littoral) de périodicité 15 jours.

La caractérisation des masses d'eau et la détermination de leurs variabilités nécessitent la mesure de différents paramètres physico-chimique du milieu par l'intermédiaire d'une sonde CTD, mesure de :

- la température
- conductivité
- pression
- fluorescence
- profondeur
- irradiance (PAR)
- turbulence

Cette caractérisation permet d'identifier les différents événements physiques (mouvements de masses d'eau, évolution des gradients de salinités/température...) sur une série temporelle. De plus, une fois la stratification de la masse d'eau établit, l'analyse des paramètres biologiques du milieu est possible; tel que la biomasse de producteurs primaires évaluée à l'aide d'un fluorimètre (proxy de la concentration en chlorophylle a). A ces mesures s'ajoutent celle du PAR (photosynthetical active radiation) qui permet de définir la turbidité de la colonne d'eau, en parallèle de la mesure à l'aide du disque de Secchi.

En supplément des ces profils verticaux effectuer à l'aide d'une sonde CTD Seabird porté par un câble à l'arrière du navire océanographique, des prélèvements d'eau par bouteille Niskin ® à trois profondeurs (surface, fonds, profondeur de maximum de fluorescence) sont effectués. Ces prélèvements permettront de définir la biomasse de producteurs primaires.

A ces mesures, il faut ajouter la détermination de la biomasse sèche sur la colonne d'eau pour chaque station ainsi que la détermination des espèces du neuston (sub-surface).

Les prélèvement à bord de l'Antedon II dans la rade de Marseille ont été effectués sur trois sites: la station Julio au large du Planier (43° 8'7.80"N ;5°15'20.76"E, station n° 11,15) positionné en limite de plateau continentale sur une profondeur moyenne de 98,5m , le Frioul sur la face Sud de l'île (43°15'55.80"N ;5°18'4.44"E,station n°2,4,6,8,10,12,14,16) de profondeur moyenne 34,2m, et enfin la station d'observation SOMLIT (43°14'18.72"N ;5°17'15.60"E,station n°1,3,5,7,9,13) de profondeur moyenne 57m. Les sites ont été échantillonné du mardi 25 septembre au jeudi 4 Octobre par l'ensemble des groupes, la figure 1 positionne la zone d'étude, les conditions météorologiques d'échantillonnages seront décrites en parallèle des profils de CTD.

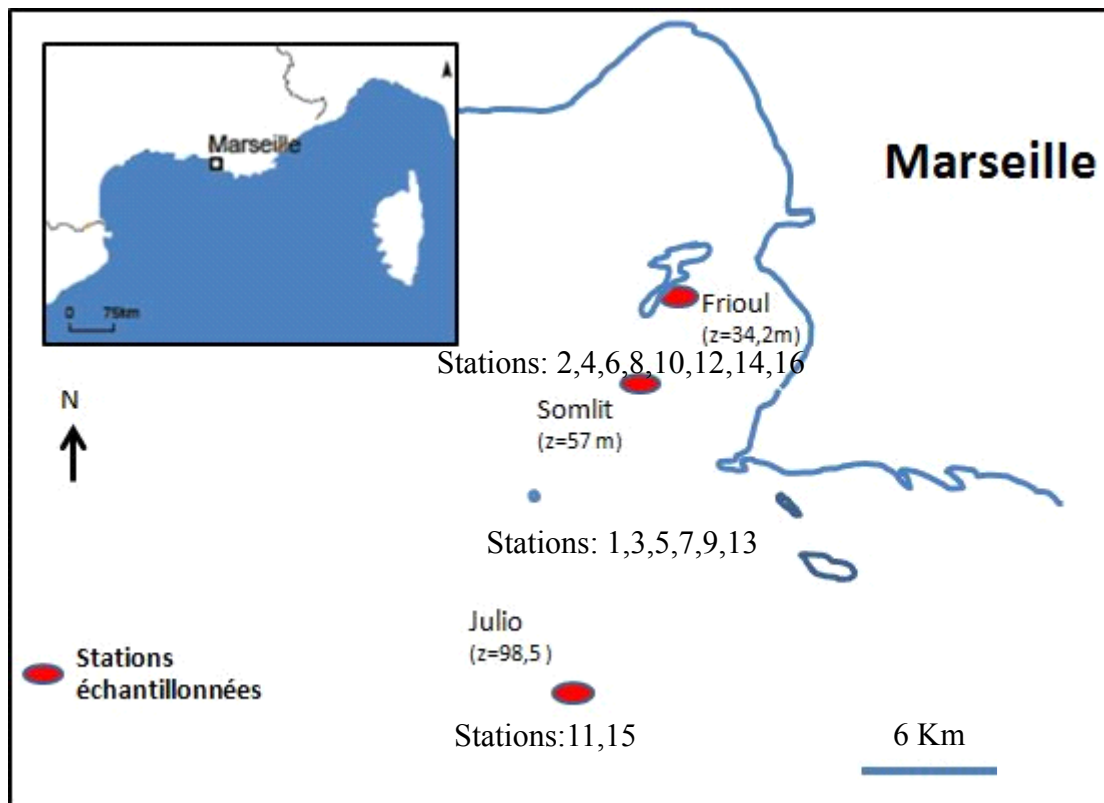


Figure 1 : Zone d'étude, rade de Marseille, où z (m) correspond à la profondeur moyenne du site.

2.1 Variables mesurés par la sonde CTD

L'utilisation d'une sonde CTD Seabird ® permet la détermination d'un profil vertical (mesure tout les 25 cm) d'un corps de paramètres physico-chimiques. Les données de fluorescence acquise par CTD sont corrélées avec les données de fluorescence calculées à partir des mesures de biomasses chlorophylliennes acquises lors des mesures effectuées dans les prélèvements obtenus à l'aide de la bouteille Niskin. De plus, elles permettent de définir la profondeur de coulée des bouteilles Niskin ® afin de prélever à la profondeur du pic de fluorescence. Les longueurs d'ondes d'excitation de la chlorophylle a sont à 460 nm et celles d'émission sont de 695 nm.

La température et la salinité, paramètres conservatifs caractéristiques des masses d'eau, sont étudiées afin de décrire les mouvements des différentes masses d'eau et de remettre dans leur contexte les résultats des autres paramètres. Plusieurs étapes et manipulations sont nécessaires pour l'acquisition de mesure fiable.

Pour l'acquisition du profil, la sonde est mise à l'eau et démarré à bord avant son immersion. Elle est ensuite stabilisée en surface afin de purger le circuit et son système de mesure. Ensuite, elle est descendue le long de la colonne d'eau, jusqu'à 5 m au dessus du fond pour l'acquisition du profil et remontée sur le pont du navire.

Dès lors que le profil de la CTD est acquis, le traitement des données est effectué directement à bord du navire par un technicien agréé. La sonde est connectée au poste informatique au moyen du logiciel «Seaterm», ce logiciel permet de collecter et d'enregistrer toutes les informations recueillies par la sonde lors des opérations en mer.

Le logiciel « Seasave » permet de visualiser rapidement les données brutes acquises afin de voir la qualité des données (profils correctement acquis, pic de fluorescence, etc.). Les données subissent un premier filtre pour supprimer les artefacts et sont convertis, corrigés et recalés en fonction de la

profondeur.

A partir des données d'oxygène l'indice d'utilisation apparente en oxygène (AOU) est calculé sur la colonne d'eau selon par l'intermédiaire de l'algorithme de Benson et Krause (1984), qui permet d'estimer la solubilité de l'oxygène à partir des données de salinité et de température.

L'AOU se calcul selon l'équation (1):

$$AOU=[O_2]_{\text{sat}}-[O_2]_{\text{mesurée}} \quad (1)$$

Exprimée en micromole O₂/Kg.

2.2 Série à long terme SOMLIT

Les séries à long terme de la station SOMLIT sont utilisés afin de décrire la variabilité annuelle et interannuelle des paramètres physico-chimiques de températures, de densité, de concentrations en "chlorophylle a" et nitrate.

La masse volumique de la colonne d'eau est calculée à partir de l'équation d'état de l'eau de mer de 1980 ajustée pour l'utilisation de la salinité pratique, de la température et de la pression (Millero et Poisson, 1981). La mesure de densité permet de définir un indice de stratification IS de la colonne d'eau, définit comme la différence moyenne de densité sur la colonne d'eau (équation (2)). Indice qui définit l'état stratifié ou mélangé de la colonne d'eau (IS >0 stratifié, IS =0 mélangé).

$$IS=(1/R_o)*1000-(1/R_{\text{moyen}})*1000 \quad (2)$$

Où R_o correspond à la masse volumique (Kg/ m³) de la masse d'eau. IS s'exprime en m⁻¹.

Les protocoles de mesures suivent le protocole adopté par SOMLIT qui utilise les standards décrit par Kérouel et Aminot (2007) pour les nutriments et regroupé dans les publications de l'Unesco sur les sciences de la mer (N°36 de 1984) pour les mesures physique (e.g temperature, salinité).

2.3 Analyse des micro-organismes autotrophes (phytoplancton) présent dans la colonne d'eau

A côté de ces mesures, trois prélèvements à l'aide d'une bouteille Niskin ® (5L) ont été effectués sur chaque station à trois profondeurs différentes, un échantillonnage en surface, un autre au fond de la colonne d'eau et le dernier à une profondeur intermédiaire choisit, au niveau du maximum de fluorescence. Suite aux prélèvements les échantillons sont placés dans des bouteilles ambrées (préalablement rincées avec l'eau du prélèvement) de manière à préserver les organismes photosynthétiques.

La concentration en chlorophylle a a été déterminée selon la méthode fluorimétrique de Yentch et Menzel (1963) adaptée par Holm-Hansen (1978) pour l'extraction des pigments chlorophylliens. Une filtration est effectuée au laboratoire de 250 ml d'échantillon par un filtre GF/F (porosité 0,7 micromètre). Les filtres sont ensuite plongés dans un solvant (une solution d'acétone à 90 % de volume 10ml) pour dissoudre la chlorophylle. Trois réplicats pour chaque profondeur et pour chaque station sont ainsi obtenus. Notons que nous avons isolé les tubes de la lumière en les enroulant dans du papier d'aluminium, et enfin placé au réfrigérateur pendant une journée. Ils sont enfin analysés au fluorimètre, réglé sur la longueur d'onde 635 nm (longueur d'onde excitant la chlorophylle a et ses dérivés) et taré avec le même solvant (i.e acétone). Suite à chaque mesure nous ajoutons dans chaque répliat quelques gouttes d'acide (HCL2 de concentration 1M). L'adjonction de HCL2 décompose la chlorophylle (en cassant un pont magnésium) et va permettre de mesurer la

concentration en phéopigments par fluorescence. Cette étape va nous permettre d'estimer le niveau de dégradation de la chlorophylle avant digestion et donc dans le milieu initial.

Après avoir analysé les 9 réplicats d'une station nous avons effectuer une nouvelle fois un blanc à l'acétone afin de mesurer la dérive de l'appareil au fil des mesures.

Le calcul de la chlorophylle a (+/- 15%) est ensuite permit par:

$$[chl a]=K.(F_0/F_a)_{max} \cdot [(F_0-F_a)/(F_0/F_a)_{max}-1] \cdot [v_{ext}/v_{filtré}] \quad (3)$$

$$[phéo]=K.(F_0/F_a)_{max} \cdot F_a [1-((F_0/F_a)_{max}-1)/(F_0/F_a)_{max}-1] \cdot [v_{ext}/v_{filtré}] \quad (4)$$

F₀: fluorescence avant acidification

F_a: fluorescence après acidification

v_{ext}: volume de l'extrait acétonique (10 ml)

v_{filtré}: volume filtré (250 ml)

K: constante de calibration

Une courbe étalon (présenté en figure 2) est réalisée à partir d'une série de solution de concentration en chlorophylle a connue. La pente issue de la mesure de fluorescence de cette gamme étalon donne accès à la constante de calibration K.

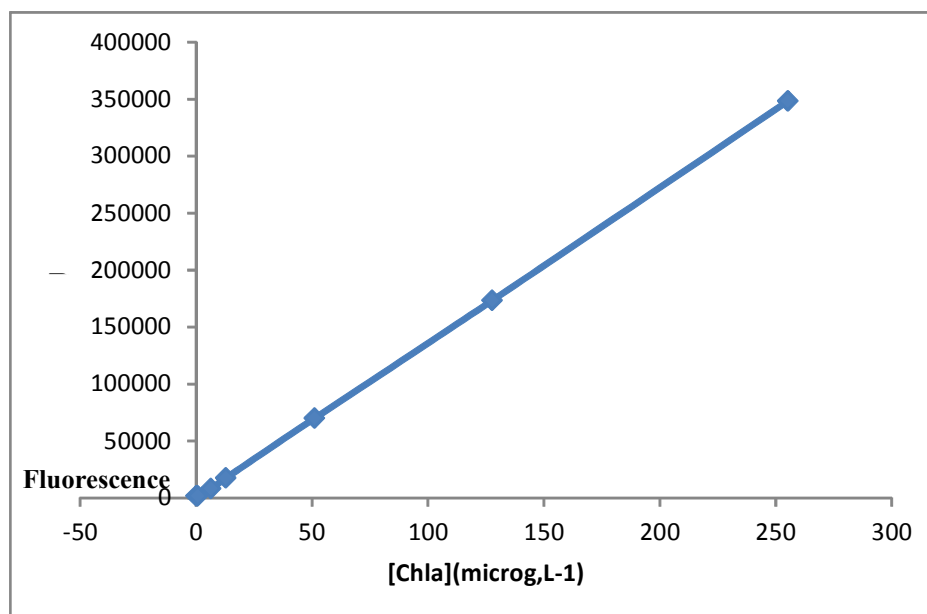


Figure 2 : Courbe étalonnage de la gamme étalon de concentration connue en chlorophylle a ($\mu\text{g/l}$) selon la fluorescence.

Le rapport entre concentration en chlorophylle a et phaéopigment est très important car il permet d'établir un bilan sur l'état de la population phytoplanctonique.

Le calcul de la qualité des pigments chlorophylliens est détaillé dans l'équation (3). Il permet de décrire les biais sur les mesures de concentration en chlorophylle (problème de filtration) et toutes contaminations éventuelles survenues. Ce paramètre est aussi utilisé pour évaluer la productivité du milieu.

$$(\text{Chl } a / (\text{Chl } a + \text{Phaeo } a)) \quad (5)$$

Dans le cas où le rapport est inférieur à 70%, on peut considérer que l'échantillon n'est pas qualitativement fiable pour caractériser la biomasse phytoplanctonique.

2.4 Analyse des micro-organismes hétérotrophes (zooplancton)

L'étude effectuée sur le zooplancton se décompose en deux parties: une estimation de la biomasse zoo-planctonique couplée à une identification taxonomique des espèces présentes sur les sites d'échantillonnage.

Pour ce faire, trois prélèvements par filets à plancton ont été réalisés.

Les deux premiers prélèvements se sont déroulés de la même façon. Un filet, dont la maille mesure 200 micromètre, a été descendu jusqu'au fond de la colonne d'eau puis remonté à une vitesse de 1 m/s vers la surface. Dans le but de rassembler dans le goulot récolteur les organismes, nous avons pris soin de rincer à l'eau de mer le filet. Les prélèvements sont placés dans un bidon de 2 L et conservés dans une glacière au frais et à l'obscurité.

Le troisième prélèvement a été réalisé avec un filet de maille 700 micromètre que nous avons placé en surface de la mer puis tracté pendant 5 minutes pour l'étude du métazooplancton (200 m – 200 cm), 30 mètres à l'arrière du navire pour éviter les perturbations liées au moteur. Il s'agit donc d'un prélèvement horizontal visant à récolter le neuston.

En laboratoire, les échantillons issus des prélèvements verticaux sont passés dans une colonne à tamis, de tailles respectives de 2 000 μm , 1 000 μm , 500 μm , 200 μm et 80 μm , pour séparer les organismes en fonction de leur taille. Puis on récupère sur des filtres l'ensemble des organismes de chaque taille à l'aide d'une pompe à vide. Les filtres sont alors pesés une première fois (on obtient alors le poids humide de l'échantillon) et ensuite mis à incuber à 60°C dans une étuve pendant 72 heures pour déshydrater les organismes. Les filtrats sont ensuite exposés à l'air libre, afin de les mettre à température ambiante, et pesés une dernière fois avec une balance digitale pour avoir le poids sec de chaque classe de taille. On en déduit la biomasse par unité de volume ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) par l'intermédiaire de la formule ci-dessous (d =profondeur filtrée, r =rayon du filet) établissant le volume d'eau filtré par le filet:

$$(\pi/r^2).d \quad (6)$$

L'échantillon prélevé avec le filet horizontal a été fixé au formol afin de procéder à l'observation à la binoculaire des organismes récoltés. Une analyse taxonomique permet de les identifier et de les quantifier.

3 Resultats

3.1 Paramètres physico-chimiques

Durant la période d'échantillonnage, les mesures via la sonde CTD ont permis d'obtenir les profils verticaux de température, de fluorescence et de salinité aux stations SOMLIT, Julio et Frioul. La répartition des stations dans la rade de Marseille sur le plateau continental pour les stations du Frioul et Somlit et sur le talus pour la station Julio nous donne une vision de la répartition spatiale des paramètres physico-chimiques dans la rade.

Les données météorologiques (tableau) de cette période permettent d'expliquer une partie de la distribution de ces paramètres notamment de la température, de la stratification de la colonne qui en milieu côtier est sous une influence atmosphérique forte.

Les données des trois premiers prélèvements sont absentes, mais globalement proches des conditions du 28/09/12 où le vent de Nord-Ouest de force faible domine impactant peu la colonne d'eau en cette période de l'année. Ce vent du Nord implique une faible couverture nuageuse d'où un ensoleillement assez constant. Ces conditions se maintiennent jusqu'au 2/10/12 avec des coups de vents du Nord plus forts qui peuvent déstabiliser la stratification de la colonne induite par des

températures assez élevées en moyenne 18 °C sur la période de prélèvements.

Le vent tourne ensuite pour devenir de Sud-Est avec des intensités élevés le dernier jour d'échantillonnages. Ce changement de vent induit des hausses de températures qui passe à 22 °C dans la matinée et peuvent induire une nouvelle stratification de la colonne d'eau. Le vent du vent impacte peu l'hydrodynamisme dans la rade.

Tableau 1 : Conditions météorologiques de la période d'échantillonnage, où chaque données est une moyenne horaire, D représente la direction du vent en °, T la température en °C, V la vitesse du vent en m/s, P la pression en Hpa, Ir l'irradiance en J/m² et Pr les précipitations en mm. Ces mesures sont effectuées pour chaque heure de la journée afin de décrire précisément les conditions atmosphérique de la campagne de mesure.

Jours échantillonnés	Stations	Heures d'échantillonnages	Conditions météorologiques					
			D (°)	T (°C)	V (m/s)	Ir (J/m ²)	Pr (mm)	P (Hpa)
24/09/12	1	8 : 30	—	—	—	—	—	—
	2	10 : 16	—	—	—	—	—	—
25/09/12	3	8 : 30	—	—	—	—	—	—
	4	10 : 00	—	—	—	—	—	—
27/09/12	5	8 : 30	—	—	—	—	—	—
	6	10 : 00	—	—	—	—	—	—
28/09/12	7	8 : 30	360	17,2	2	42,1	0	1017,9
	8	10 : 00	300	20,9	2	184,7	0	1015,1
1/10/12	9	8 : 30	340	17,0	4	139,8	0	1018,1
	10	10 : 00	320	18,1	5	255,1	0	1017,7
2/10/12	11	9 : 00	330	16,9	8	210,6	0	1020,7
	12	11 : 30	330	18,6	9	286,1	0	1019,9
3/10/12	13	8 : 30	100	17,7	2	135,3	0	1020,8
	14	10 : 00	280	19,9	3	254,5	0	1020,5
4/10/12	15	9 : 00	170	21,6	8	177,4	0	1019,2
	16	11 : 30	160	22,0	7	166,4	0	1019,0

Le profil de température (figure 3) montre une homogénéité jusqu'à approximativement 30 m de profondeur peut importe le zone d'échantillonnage. Ce qui est aussi remarquable est la similitude de la température des eaux de surfaces sur toute la rade de Marseille, et même plus au large à la station Julio avec des températures très proche de 21°C. Cette similitude disparaît avec la profondeur.

La station Frioul étant la moins profonde (40 m) c'est cette masse d'eau qui reste la plus chaude au fond (15°C). La masse d'eau à SOLMIT est légèrement plus froide au fond (14.5°C) car plus profonde qu'au Frioul (58 m). Et enfin la masse d'eau au large, à la station Julio atteint moins de 14°C à 100 m de profondeur. Ce fort gradient de température que la observe entre 30 et 60 m de profondeur est la thermocline saisonnière.

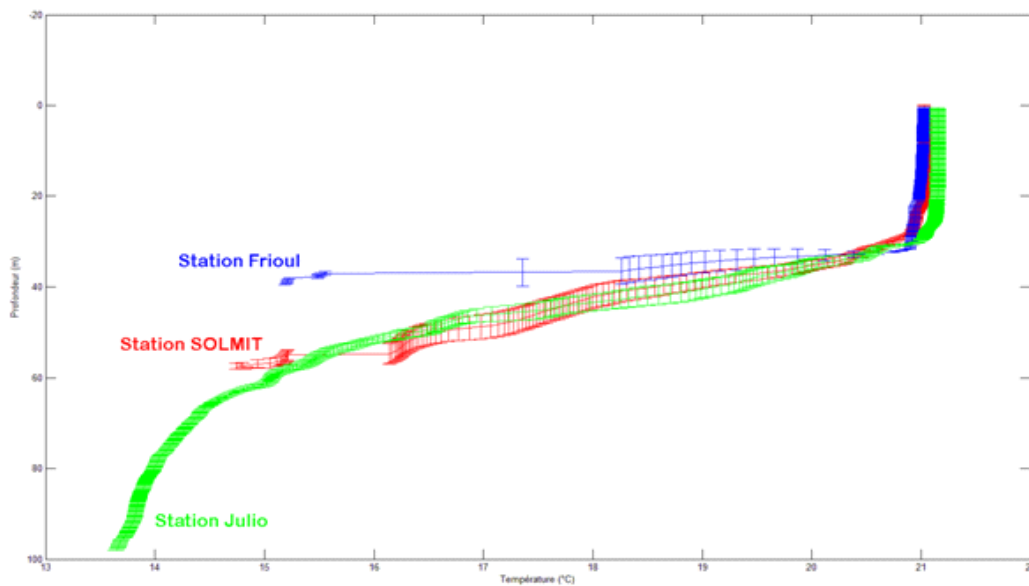


Figure 3 : Profil vertical des températures moyennes à chaque station, avec l'écart-type sur l'ensemble des échantillonnages.

Le profil de salinité (figure 4) nous montre toujours cette homogénéité des masses d'eau de la surface à 30 m de fond. Cependant on remarque que les salinités de surface ne sont pas similaires entre chaque zone, la station Frioul est la moins salée avec une salinité de 38.35. La masse d'eau à SOLMIT est légèrement plus salée, salinité de 38.36. Et enfin la masse d'eau à Julio est la plus salée de toutes avec une salinité de 38.38.

Un pic de salinité est observable à 33 m de fond à la station Frioul. Ce pic diminue ensuite rapidement dans la thermocline pour atteindre 38.15 au fond. En ce qui concerne la station SOLMIT, la salinité diminue fortement après 30 m pour atteindre une salinité minimum de 38.1 au fond. Enfin la salinité à la station Julio à un fort gradient de baisse après les 30 m jusqu'à 55 m, où la masse d'eau atteint sa salinité minimal de 38.1, ensuite suit une augmentation de la salinité avec la profondeur pour atteindre une salinité de 38.2 à 100 m de fond.

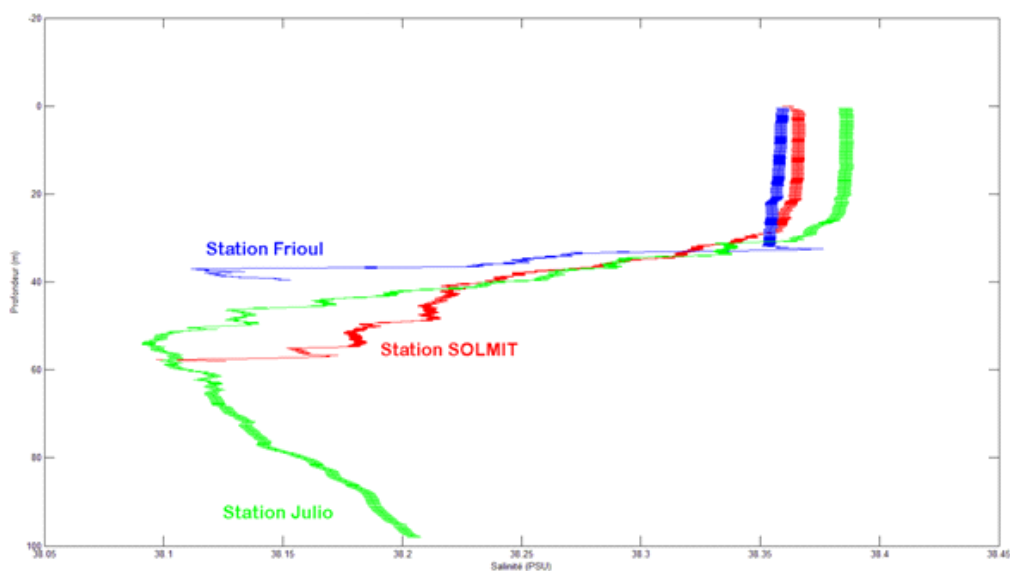


Figure 4 : Profil vertical des salinités moyennes à chaque station, avec l'écart-type associé.

Le profil de fluorescence (figure 5) nous montre que la station Julio est la zone avec le moins d'activité

phytoplanctonique en surface, la station Frioul est légèrement plus fluorescente que Julio mais moins que la station SOLMIT qui possède la plus forte fluorescence de surface. C'est au niveau de la thermocline que l'on remarque pour toutes les stations un maximum de fluorescence similaire en émission. Avec cependant un pic au niveau du fond à la station Frioul supérieur à toutes les autres fluorescences. On remarque aussi une forte diminution de la fluorescence à 45 m de fond à la station Julio, après ce minimum la fluorescence réaugmente pour atteindre un maximum vers 60 m de fond et diminue ensuite pour devenir aussi faible en surface qu'à 100 m de fond. La fluorescence est une approximation de la production primaire dans la colonne d'eau, cette mesure donne une vision approximation de la répartition verticale des organismes autotrophes.

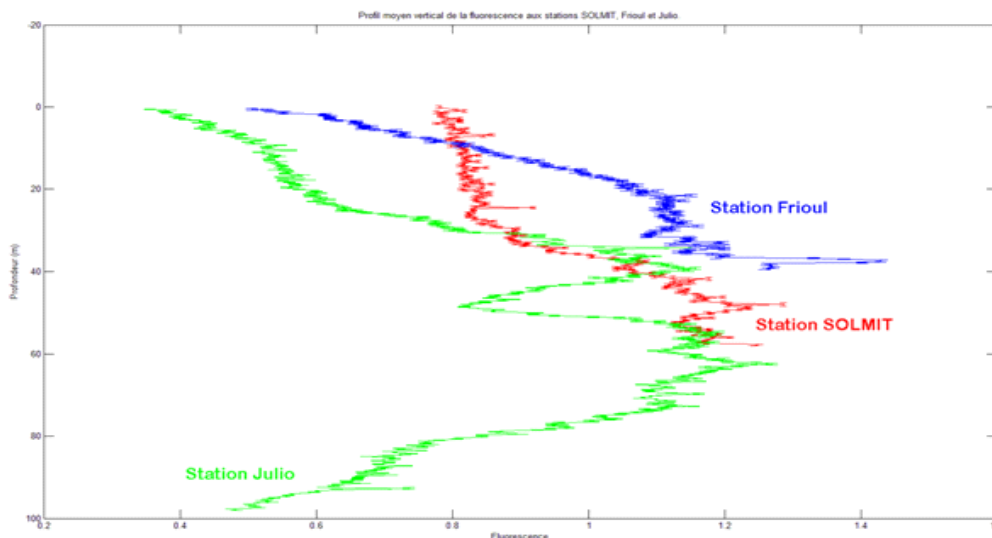


Figure 5 : Profil vertical des fluorescences moyennes à chaque station, avec l'écart-type sur l'ensemble des échantillonnages.

3.2 Paramètres biologiques

3.2.1 Biomasse phytoplanctonique

Les prélèvements d'eau de mer par bouteilles Niskin ® ont permis de mesurer la fluorescence des échantillons à trois profondeurs, en surface (1 m), au fond et à la profondeur de maximum de fluorescence, à la base de la thermocline saisonnière. Cette mesure de fluorescence permet de déduire la concentration en « chlorophylle a », qui approxime la concentration en organismes photosynthétiques. Ces mesures déterminent l'importance du compartiment autotrophe dans l'écosystème pélagique à chaque station de la rade. La couverture spatiale des mesures comparées aux mesures de fluorescence par CTD nous permet d'évaluer la variabilité spatiale tant horizontale que verticale au niveau du plateau continentale.

La concentration en phaeopigments permet de déterminer l'état dans laquelle se trouve la chlorophylle mesurée. Les phaeopigments correspondent à un état dégradé des pigments photosynthétiques de chlorophylle, le rapport de la mesure de chlorophylle sur le totale de pigments mesurés évalue la proportion de pigments 'actifs' (cellules vivantes dans le phytoplancton) ayant un rôle trophique des cellules issues de la dégradation bactériennes, zooplanctonique ou simplement par agents oxydants.

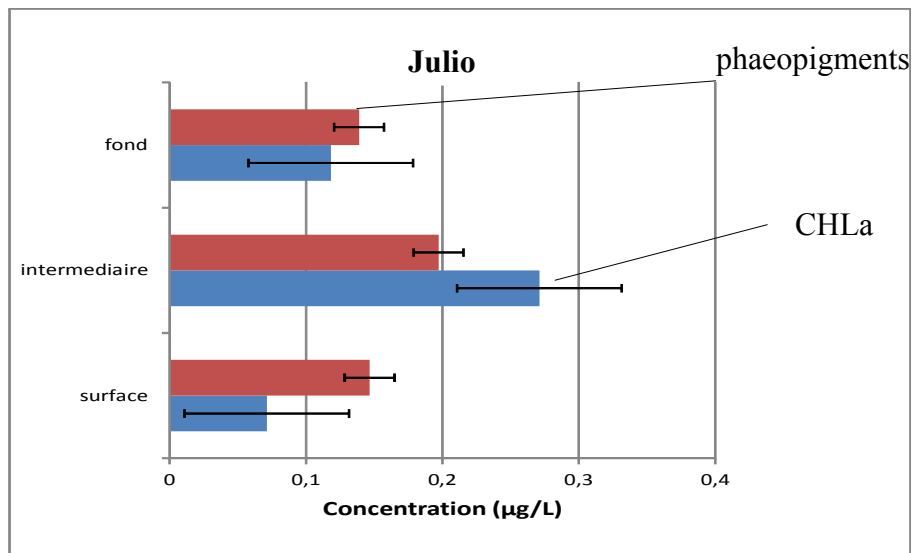


Figure 5 : Concentrations en « chlorophylle a » (µg/l) en surface, à la profondeur de maximum de fluorescence et au fonds à la station Julio en bordure de plateau continentale.

Sur la figure 5, on remarque une quantité en « chlorophylle a » variable sur les différentes profondeurs avec un maximum au niveau de la profondeur intermédiaire alors que les concentrations en phaeopigments restent relativement homogène. Cette tendance d'une forte concentration aux profondeurs intermédiaires est identique pour les deux stations de Julio. Enfin on s'aperçoit que les résultats sont peu pertinents du fait des forts écart-types au niveau des chlorophylles. La qualité de la chlorophylle (tableau 2) permet de définir si l'échantillon est fiable. Dans le cas où le rapport est inférieur à 70%, on peut considérer que l'échantillon n'est pas qualitativement fiable pour caractériser la biomasse phytoplanctonique.

Tableau 2 : Qualité chlorophylle de la station Julio

JULIO			
Qualité chlorophylle (Chl a / (Chl a + Phaeo a))	Sation 11	station 15	Moyenne (%)
surface	0,49	0,35	42
intermediaire	0,69	0,49	59
fond	0,34	0,51	43

La concentration en chlorophylle est très homogène au Frioul (figure 6), elle varie de 0,2 à 0,25µg/L sur toutes les profondeurs avec des valeurs relativement proches aux profondeurs intermédiaires et fond. La concentration en phaeopigments reste elle aussi homogène comprise en 0,12 et 0,17µg/L pour les profondeurs. Les écart-types restent faibles donc la qualité des résultats est satisfaisante.

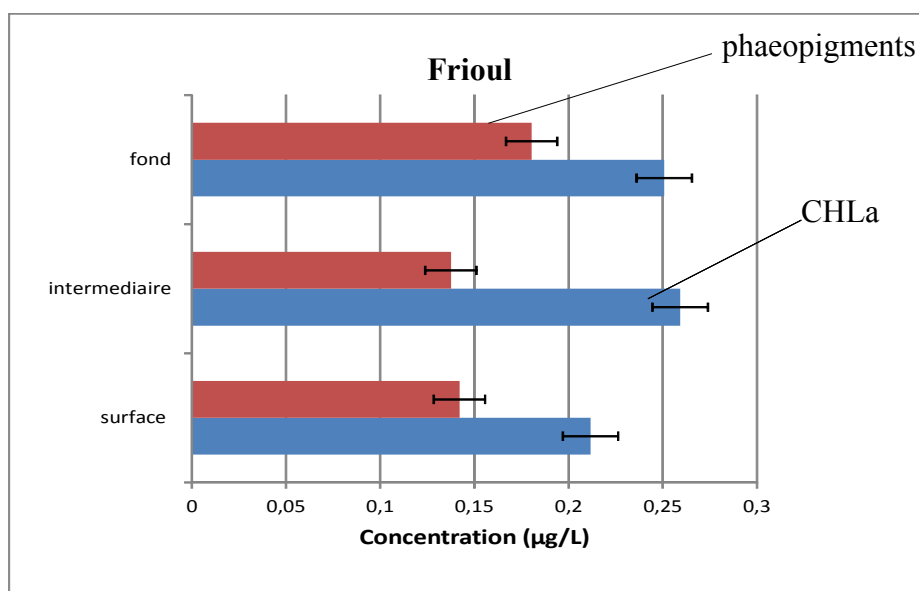


Figure 6 :Concentrations en « chlorophyll a » (µg/l) en surface, à la profondeur de maximum de fluorescence et au fonds à la station Frioul.

La qualité chlorophylle (tableau 3) est globalement insuffisante si l'on observe la moyenne des stations échantillonnées avec de fortes disparités entre les stations : notamment les stations 2 et 8 qui sont respectivement très en dessous du seuil et au dessus. Les résultats peuvent être considérés comme possible en regard des faibles différences de moyenne sur les trois profondeurs.

Tableau 3 :Qualité chlorophylle de la station Frioul

FRIOUL									
Qualité chlorophylle	station 2	station 4	station 6	station 8	station 10	Station 12	Station 14	station 16	Moyenne (%)
surface	0,48	0,60	0,40	0,88	0,39	0,65	0,54	0,55	56
intermediaire	0,00	0,66	0,62	0,73	0,42	0,71	0,61	0,71	56
fond	0,43	0,57	0,51	0,63	0,33	0,69	0,57	1,02	59

Les concentrations en chlorophylle de la station SOMLIT (figure 7) sont proches sur toute la colonne d'eau et varie autour de 0,17µg/L , la concentration en phaeopigments croit avec la profondeur atteignant presque 0,2µg/L au fond. Les erreurs commis sur cette station sont peu importantes en regard des écart-types. A noter que la station 5 possède une valeur maximum de chlorophylle à la profondeur intermédiaire avec 0,35µg/L. On notera par ailleurs que la double profondeur intermédiaire de la station 13 à été rapporté à une seule pour une comparaison plus facile entre les différentes stations.

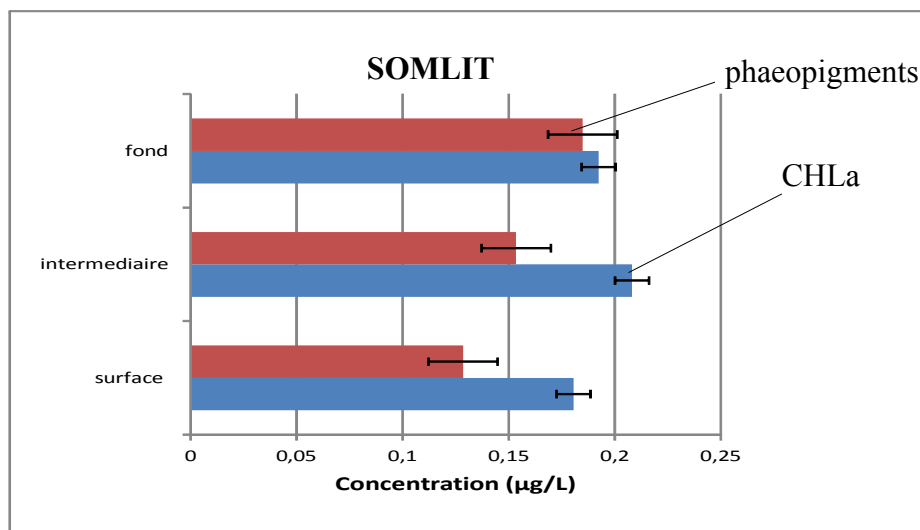


Figure 7 :Concentrations en « chlorophyll a » (µg/l) en surface, à la profondeur de maximum de fluorescence et au fonds à la station SOMLIT.

La qualité chlorophylle à SOMLIT (tableau 4) est encore une fois insuffisante en synthétisant toutes les stations échantillonnées. Les disparités des qualités de chlorophylles sont fortes entre chaque station. Les stations 1 et 9 possèdent des valeurs largement en dessous du seuil alors que la station 7 est fiable. La pertinence de ces résultats est donc un peu compromise du fait de la forte hétérogénéité.

Tableau 4 :Qualité chlorophylle de la station SOMLIT

SOMLIT							
Qualité chlorophylle	station 1	station 3	station 5	station 7	station 9	station 13	Moyenne (%)
surface	0,44	0,6	0,55	0,78	0,39	0,61	56
intermediaire	0,54	0,61	0,68	0,66	0,32	0,57	56
fond	0,34	0,55	0,56	0,58	0,38	0,56	59

En comparant les valeurs de chlorophylle pour les différentes stations on peut dire que la station Julio possède le maximum de chlorophylle pour la profondeur intermédiaire, Frioul pour la valeur maximale au fond et Somlitt reste inférieure aux différentes stations pour toutes les profondeurs.

3.2.2 Biomasse zooplanctonique

La mesure de la biomasse des organismes hétérotrophes de 80 µm à 2000 µm détermine la quantité totale sur l'ensemble de la colonne d'eau. La détermination par classe de taille met en relief l'intérêt trophique du zooplancton selon sa taille. Le microzooplancton de 80 µm à 200µm (e.g ciliés, dinoflagellés) qui se nourrit de bactéries, de microphytoplancton et de particules organique dissoutes. Puis le mézozoplancton de 200 µm à 2000 µm qui va regrouper des organismes du mero et de l'holoplancton (e.g cténaires, annélides, crustacés, mollusques, tuniciers). Ces organismes vont avoir des relations complexes avec les compartiments hétérotrophes et autotrophes

de l'écosystème pélagique.

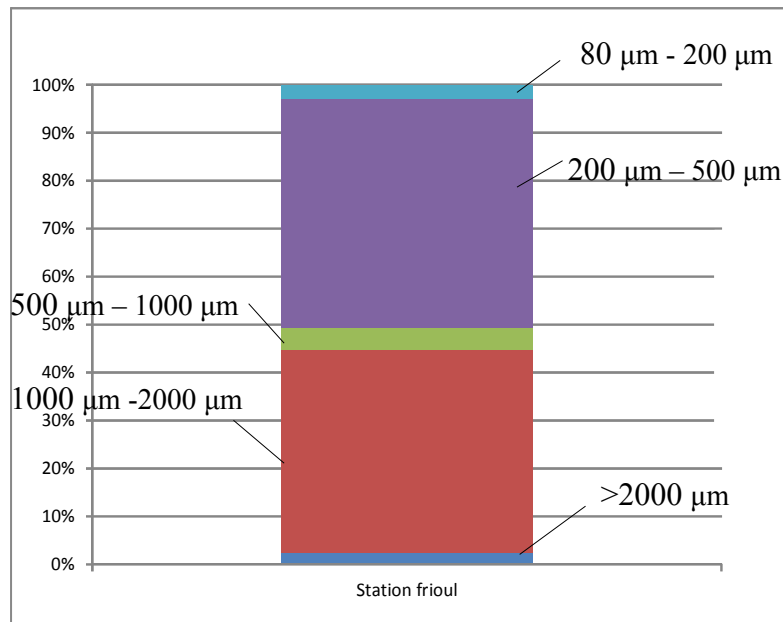


Figure 8 : Biomasse zooplanctonique prélevés sur la colonne d'eau (g/m^3) exprimé en pourcentage de la biomasse totale à la station Frioul.

Pour la station Frioul (figure 8), la biomasse est dominée par des organismes de taille compris entre 200 et 500 μm et 1000 à 2000 μm qui représente chacune 40% de la biomasse des organismes hétérophes.

Pour la station SOMLIT (figure 9), les organismes de taille compris entre 80 et 200 μm représente près de 80% de la biomasse totale. Cette valeur paraît extrêmement compromise si l'on compara avec les valeurs obtenues durant les années précédentes où la répartition des biomasses aux différentes classes de tailles étaient plus homogène.

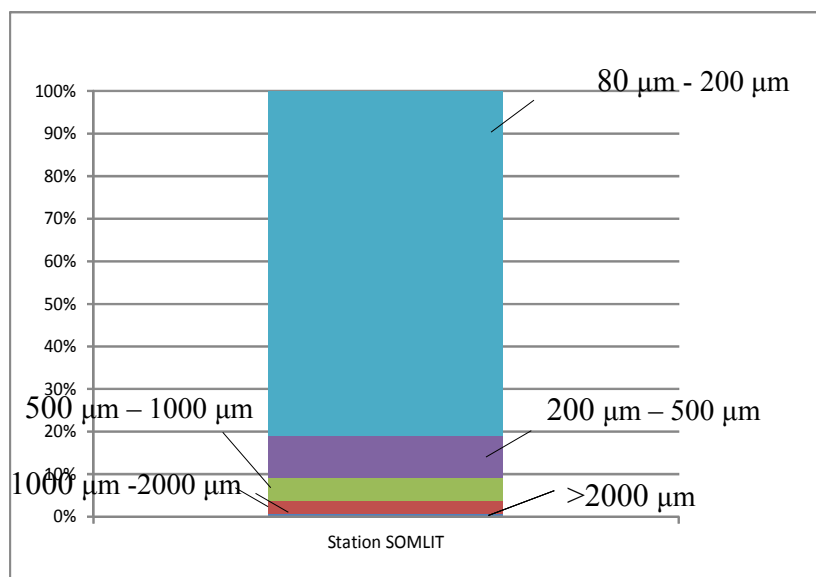


Figure 9 : Biomasse zooplanctonique prélevés sur la colonne d'eau (g/m^3) exprimé en pourcentage de la biomasse totale à la station SOMLIT.

A Julio (figure 10), la biomasse est relativement homogène avec une dominance des organismes compris entre 200 et 1000µm (80% en tout).

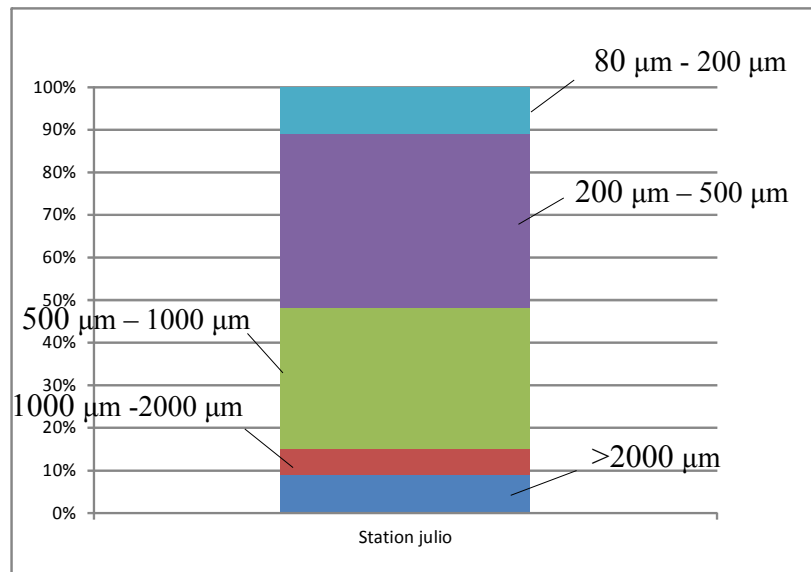


Figure 10 : Biomasse zooplanktonique prélevés sur la colonne d'eau (g/ m^3) exprimé en pourcentage de la biomasse totale à la station Julio.

Enfin, les biomasses restent peu fiables pour les trois stations du fait de la présence de nombreuses valeur négatives ce qui n'est pas possible, ces erreurs viennent de problème de manipulations et empêche une interprétation correcte des résultats.

3.2.3 Identification des organismes du neuston

Après l'identification taxonomique des différents organismes présents dans les prélèvements, on établit la biomasse par ordre (phylogénie) pour chaque station. La quantification au niveau taxonomique de l'ordre permet d'écartier les erreurs d'identification effectuées par les différents groupes de TP.

La détermination des organismes de sub-surface détermine la variabilité spatiale des écosystèmes pélagiques. Le choix d'une maille assez large sélectionne le métazooplancton (200 µm – 200 cm) plus simple à déterminer. Cette étude cible principalement les organismes gélatineux, méroplancton et crustacés, ensemble d'organismes hétérotrophes dépendant des abondances autotrophes desquelles ils se nourrissent.

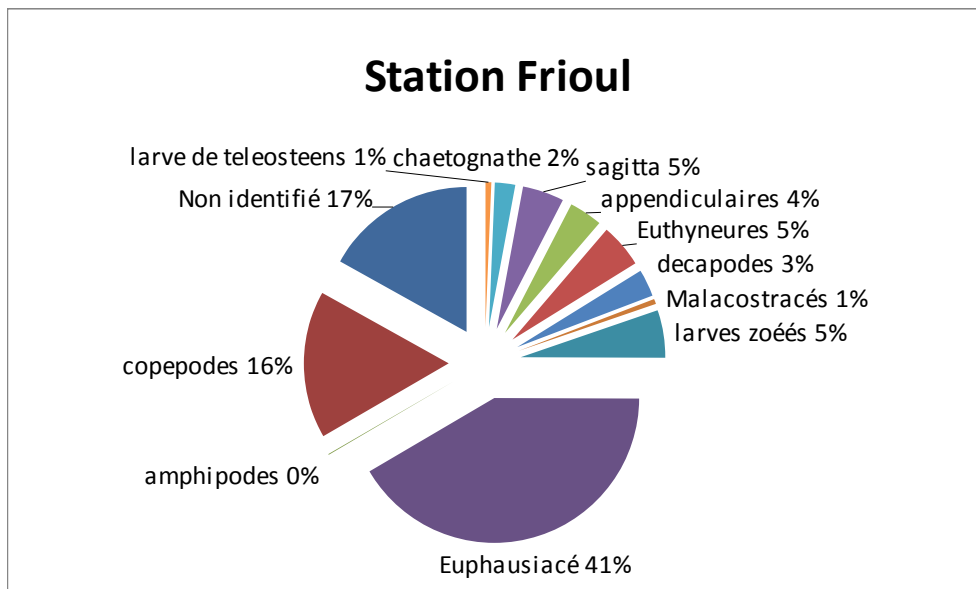


Figure 11 : Quantification (% d'individus) au niveau de l'ordre des organismes de sub-surface à la station Frioul

L'échantillonnage horizontal au Frioul (figure 11) nous montre la forte présence d'euphausiacé (41%). On trouve aussi dans des proportions égales des copépodes et des hydrozoaires non identifié. La portion des organismes restants sont dans des proportions plus faibles. Cependant il faut tout de même remarquer la forte diversité des organismes à la station Frioul.

L'échantillonnage de la masse d'eau à SOLMIT (figure 12) dans les mêmes conditions que précédemment, nous montre toujours la présence de copépodes et d'hydrozoaires en proportion importante. Par contre, on observe la présence d'euthyneures en même proportion que les deux précédents alors que les euphausiacés sont bien plus faiblement représentés. On remarque sur cette station une faible diversité des organismes ce qui permet une biomasse plus importante pour le reste des espèces présent sur cette station.

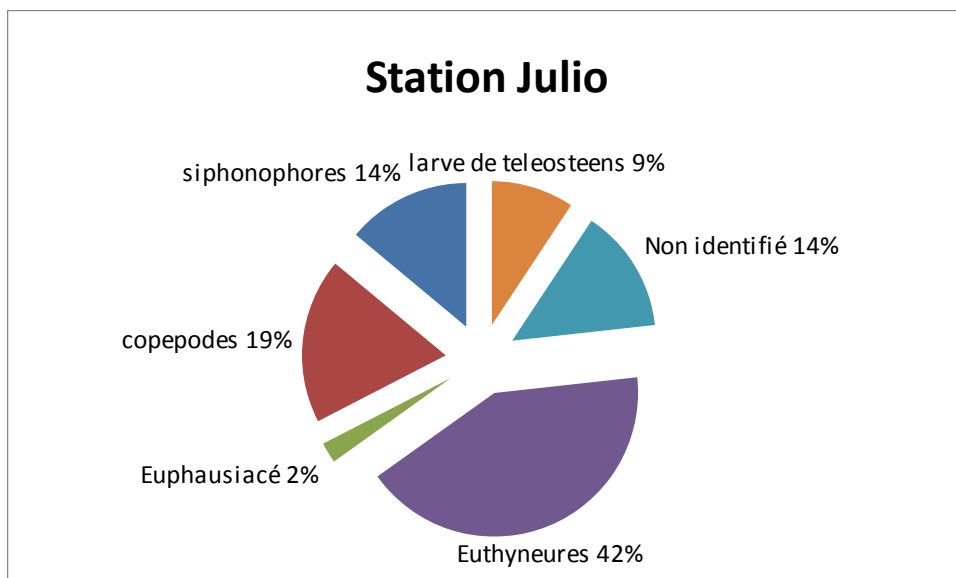


Figure 12 : Quantification (% d'individus) au niveau de l'ordre des organismes de sub-surface à Julio.

L'échantillonnage de la station Julio (figure 13) dans les mêmes conditions que les deux stations précédentes nous permet de voir une forte présence d'euthyneures. On observe également la présence de copépode, de siphonophore de chaetognathe dans des proportions similaire. Alors que les euphausiacés et les larves de téléostéens sont faiblement représentés. Ce qui est aussi évident en observant ce graphique est la faible diversité des organismes présents à la station Julio.

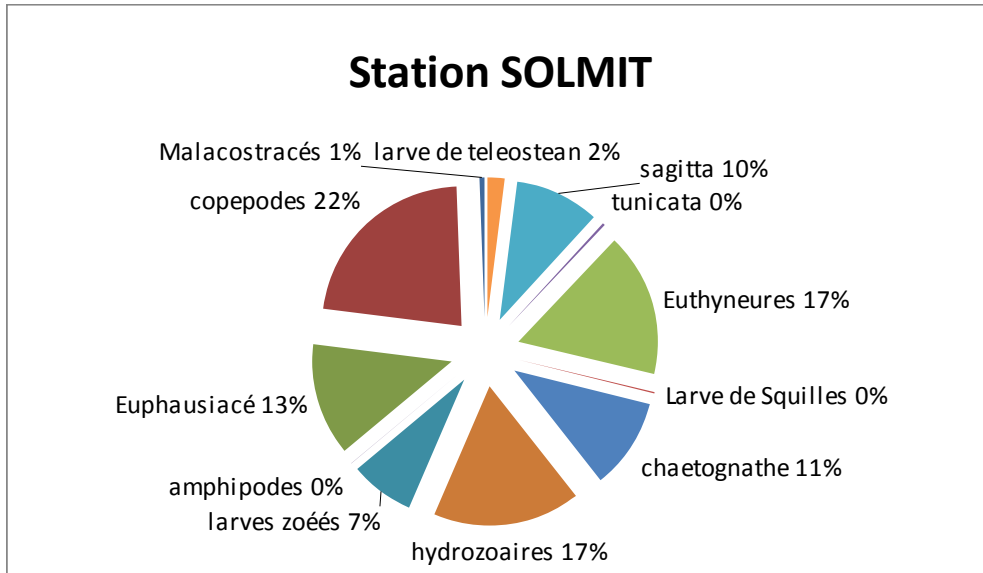


Figure 13 : Quantification (% d'individus) au niveau de l'ordre des organismes de sub-surface à la station SOMLIT

3.3 Séries à long terme SOMLIT

3.3.1 Variabilité annuelle

L'année 2010 sert de base à la compréhension de la variabilité annuelle des conditions physico-chimique et biologique de la colonne d'eau à la station SOMLIT, qui représente les conditions globales de la rade de Marseille.

Les données mensuels de température figure 14 (une mesure tous les 15 jours) déterminent la stratification de la masse d'eau en milieu peu profond. On observe une thermocline saisonnière en période estivale très marqué avec des températures de surface atteignant 24°C de juillet à septembre avec un refroidissement brutale en Août, probablement due à un épisode de Mistral (vent froid et sec du Nord-Ouest). Durant cette même période les températures au fonds avoisine les 15 °C décrivant un gradient de température de 2,5 °C tout les 10 m. La masse s'homogénéise ensuite à partir de décembre avec des températures de 13 °C globalement stable sur la verticale jusqu'en avril.

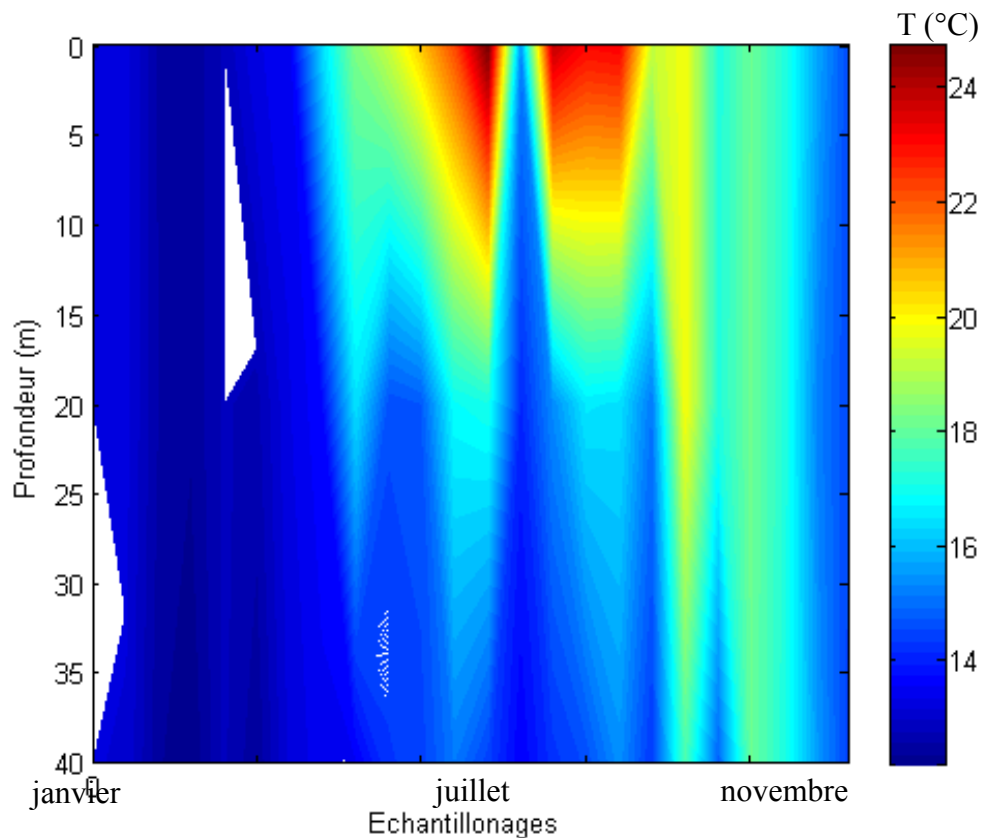


Figure 14 : Profil verticale de température (°C) en 2010 à la station SOMLIT de janvier à décembre.

La figure 15 décrit l'évolution de la différence densité de l'eau de mer avec la moyenne sur toute la colonne d'eau (de 0 à 40 m).

L'indice de stratification met clairement en évidence des périodes de stratification de la colonne d'eau, indice > 0 , et des périodes de mélanges, indice = 0.

L'indice de l'année 2010 définit une période hivernale de mélange de fin décembre à fin avril, et une période estivale stratifiée de fin juin à fin octobre. Cette période comprend une période automnale et printanière semi-stratifiée qui correspond aux transitions entre les deux états. La période stratifié est sous l'influence de forçage atmosphérique, principalement des coups de vents d' Ouest ou de Nord-Ourst (Mistral) qui peuvent destabiliser la colonne d'eau et induire des phénomènes d'upwelling (remontée d'eau à la cote).

La stratification est principalement sous l'influence des variations saisonnières de température et des forçages atmosphériques qui évoluent de manière synchrone, avec des dynamiques atmosphériques et donc hydrologique plus importante en hiver qu'en été.

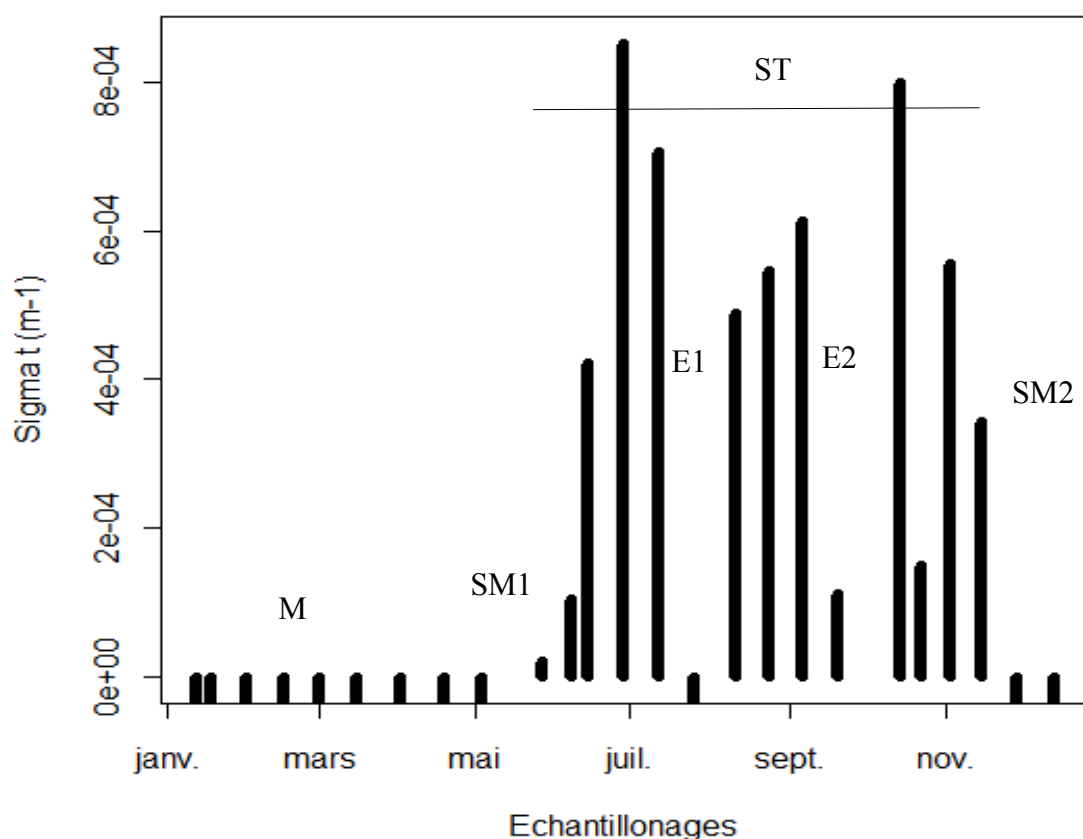


Figure 15 : Indice de stratification IS de la colonne d'eau, calculé comme la différence moyenne de densité (m^{-1}) de 0 à 40 m de profondeurs de l'année 2010. ST : période estivale stratifié ; M : période mélangé ; SM1,2 : période de semi mélange ; E1,2 : épisode de forçage atmosphérique (coup de Mistral ou de vent d'Ouest).

Les données de concentration en « chlorophylle a » de l'année 2010 (figure 16) mettent en évidence un maximum de 1,2 $\mu\text{g/l}$ qui débute en mai jusqu'à une profondeur de 20 m puis jusqu'en juin jusqu'au fonds. Ce maximum correspond au début du bloom printanier qui démarre durant la période semi-mélangé, lorsque la lumière devient non limitante et que la disponibilité en nutriments est maximum. Cette période persiste jusqu'en juillet puis les nutriments (notamment l'azote devient limitant dans cette zone de la méditerranée) manque. Les épisodes de vents E1 et E2 permettent e renouveler la production primaire en août et plus faiblement en septembre. Puis la production atteint des valeurs assez faibles de 0,2 $\mu\text{g/l}$ durant la période hivernale.

La concentration en chlorophylle ne permet pas de déterminer l'état des pigments, et donc du phytoplancton présent, ni de mettre en évidence les successions des organismes. De plus la quantité de « chlorophylle a » n'est pas directement proportionnel à la biomasse phytoplanctonique, elle reste néanmoins une bonne approximation de la production primaire.

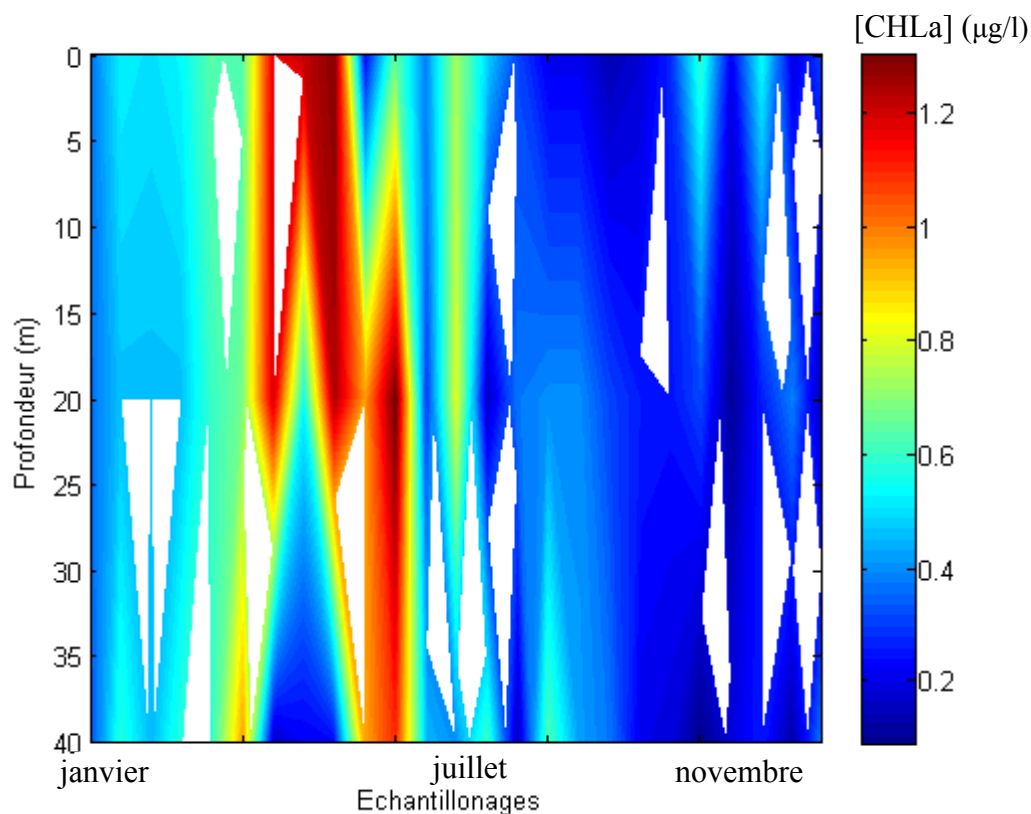


Figure 16 : Profil vertical de concentration en « chlorophylle a » en µg/l sur l'année 2010 à la station SOMLIT.

La distribution en nitrate (figure 17) suit globalement celle de la « chlorophylle a », en tant que produit issue de la dégradation de la matière organique particulaire (MOP) et dissoute (MOD) par les bactéries hétérotrophes et le nanozooplancton ($< 20 \mu\text{m}$), le nitrate va constituer la fraction azotée à l'origine de la production nouvelle. L'afflux de nitrate dans la couche photique de surface est sous l'influence de l'hydrodynamisme, soit en milieu peu profonds du vent. La concentration en nitrate est forte durant la période hivernale mélangée dans toute la colonne d'eau avec des valeurs jusqu'à $2 \mu\text{g/l}$, puis diminue très fortement après le bloom printannier vers des valeurs de l'ordre de $0,5 \mu\text{g/l}$.

La production régénérée (issue de l'ammonium NH_4^+ premier composant provenant de la dégradation de la MOP) prend le relais pour maintenir la production primaire jusqu'en Juillet. Les épisodes de vents E1 peuvent réinjectés du nitrate dans les couches de surfaces avec de forte concentrations comme en Août et ce nitrate est à l'origine du pic de CHLa dans le même mois. Les concentrations rediminuent ensuite et les stocks se reformeront à la fin de la floraison assez faible de l'automne.

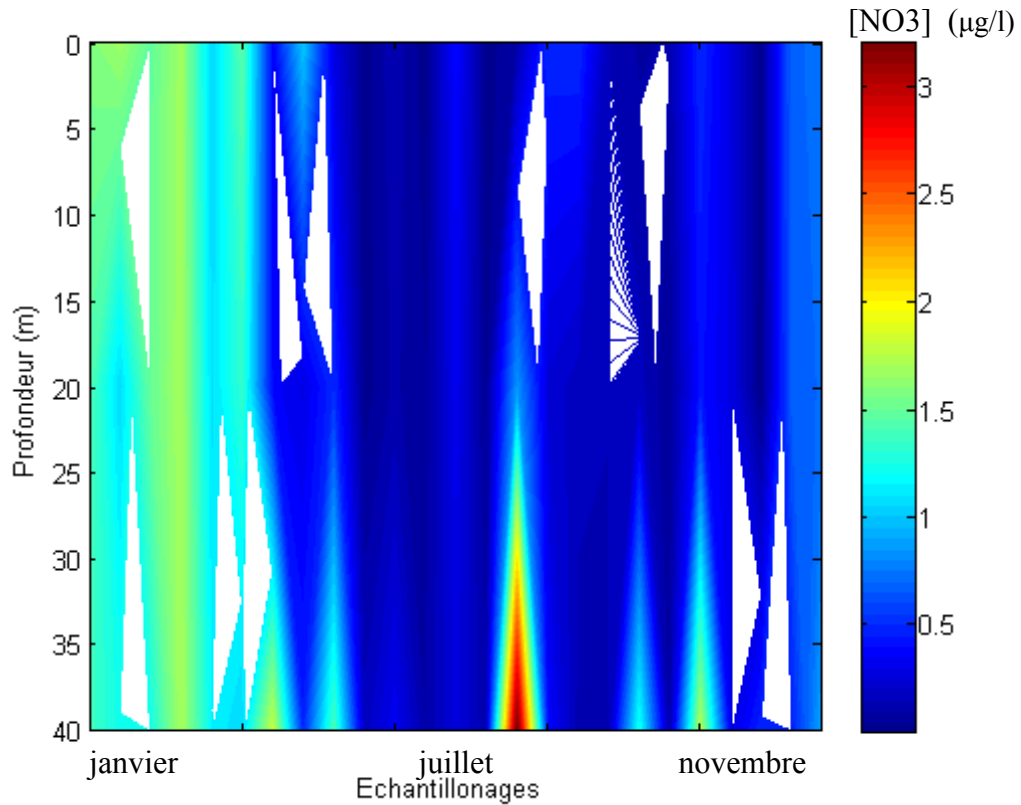


Figure 17 : Profil vertical de concentration en nitrate en $\mu\text{g/l}$ sur l'année 2010 à la station SOMLIT.

L'utilisation apparente en oxygène permet de décrire la consommation ou au contraire la production d'oxygène dans la colonne d'eau tout au long de l'année 2010 (figure 18). Les valeurs positives indiquent une sursaturation en oxygène (O_2) due au processus de photosynthèse par les organismes phytoplanctoniques dans la zone photique.

Les périodes de consommation surviennent après les blooms phytoplanctoniques dont la matière organique va consommer de l'oxygène pour sa décomposition. Paradoxalement les périodes où l'oxygène sera sursaturé vont correspondre aux périodes mélangées de faible production primaire. Ces périodes où l'eau sera plus froide sur toute la colonne permettront des échanges plus intenses avec l'atmosphère. Les valeurs maximales sont de $100 \mu\text{mol/Kg}$ atteint lors des périodes de mélange. Les valeurs minimales atteignent $-100 \mu\text{mol/Kg}$, sous la profondeur de maximum de production; sous la thermocline en période stratifiée et en surface en période de bloom printanier.

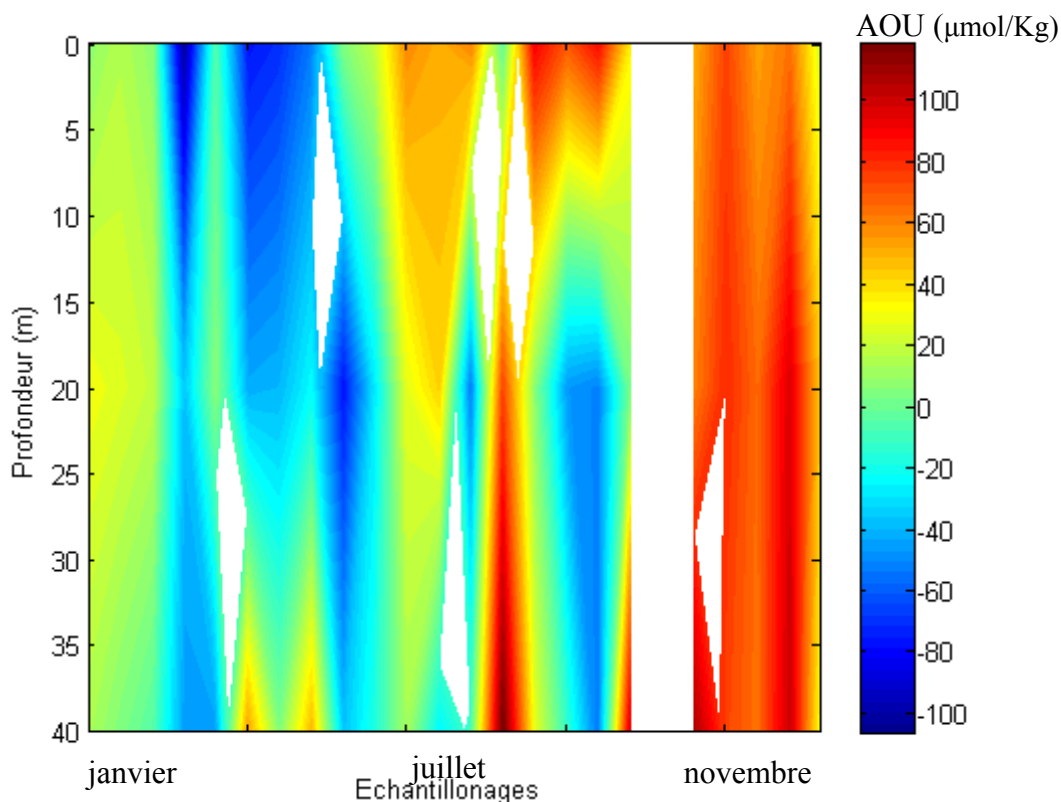


Figure 18 : Profil vertical de l'AOU en $\mu\text{mol/Kg}$ sur l'année 2010 à la station SOMLIT.

Le rapport du carbone organique particulaire (COP) à la biomasse chlorophyllienne (Tableau 5) estime l'importance des populations autotrophes ou hétérotrophes dans le milieu marin, ainsi que l'état de dégradation du phytoplancton. Ce rapport COP/Chl *a* établit à partir d'une valeur de référence comprise entre 20 et 140 $\mu\text{g}/\mu\text{g}$, caractérisent le phytoplancton frais d'après Savoye (2011). Lorsque la population autotrophe est en phase de croissance exponentielle (début du bloom) ce rapport sera faible, les concentrations en Chl *a* étant croissantes à ce moment. Au contraire, plus le phytoplancton sera vieillissant, plus les pigments chlorophylliens seront dégradés et en faible concentration par rapport au COP, le rapport augmentera.

Tableau 5 : Etat de la biomasse phytoplanctonique en fonction du rapport COP/Chl *a*.

Etat de la biomasse phytoplanctonique	COP/Chl <i>a</i>
Phytoplancton "frais "	≤ 100
MOP dominé par phytoplancton	≤ 200
Phytoplancton fortement dégradé/ MOP dominé par hétérotrophe	≥ 200

Le rapport COP/CHLa (figure 19) définit les périodes de forte production primaire, lorsque le rapport est inférieur à 200 on considère que la biomasse organique est dominée par le phytoplancton qui va apporter des matériaux issue de production nouvelle au réseau trophique. Les valeurs décrivent bien la saisonnalité des pics de productions primaires en périodes semi-stratifiées puis le

réseau trophique va s'appuyer sur le recyclage de la MOP par des organismes hétérotrophes de petites tailles (e.g. nanozooplancton, bactérioplancton). La période hivernale de mélange est dominée par ces organismes hétérotrophes qui prennent la place du phytoplancton pour soutenir le réseau trophique des niveaux supérieurs.

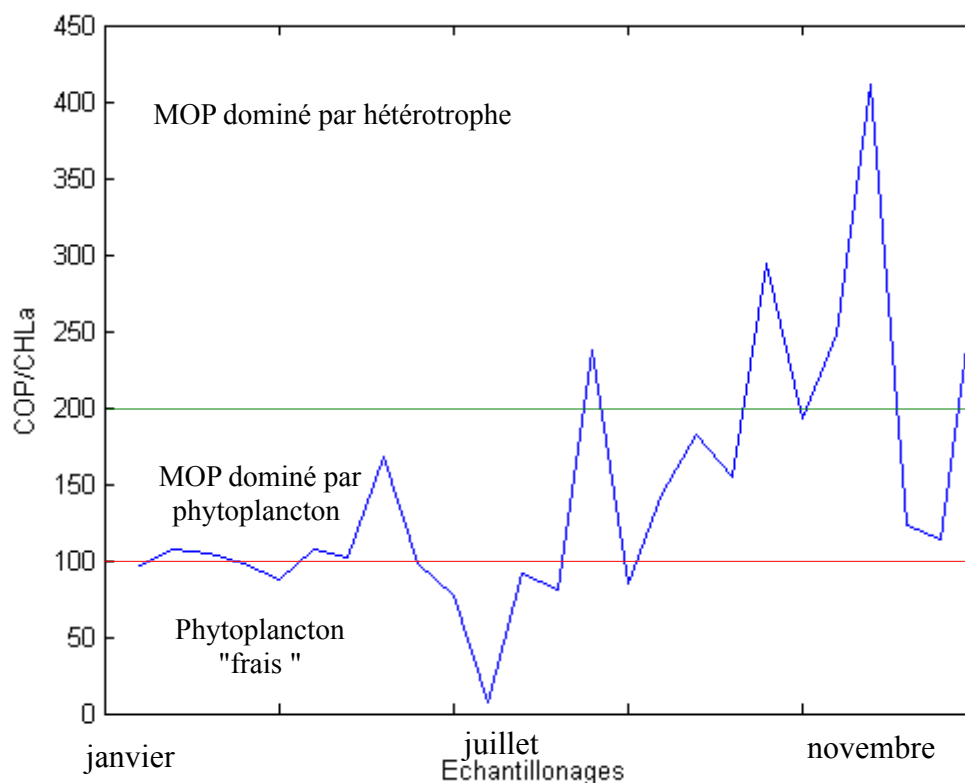


Figure 19 : Variation du rapport carbone organique particulaire (COP) sur la concentration en "chlorophylle a "(CHLa), à la profondeur de maximum de fluorescence de l'année 2010.

3.3.1 Variabilité inter-annuelle

Les séries à long terme à la station SOMLIT donnent une vision de la variabilité inter-annuelle des paramètres de température et de concentration en « chlorophylle a ». Ces variations permettent d'estimer une tendance globale sur une décennie.

Les données de température (figure 20) varient selon le cycle annuel des saisons, mais on observe aucune tendance globale au réchauffement sur la décennie de série de mesure, les températures auraient même tendance à diminuer à partir de 2010. Les températures de surface subissent directement l'influence de l'irradiance, et les échanges de chaleur avec l'atmosphère, via l'évaporation.

Les données du fond sont trop courtes pour estimer une tendance à long terme.

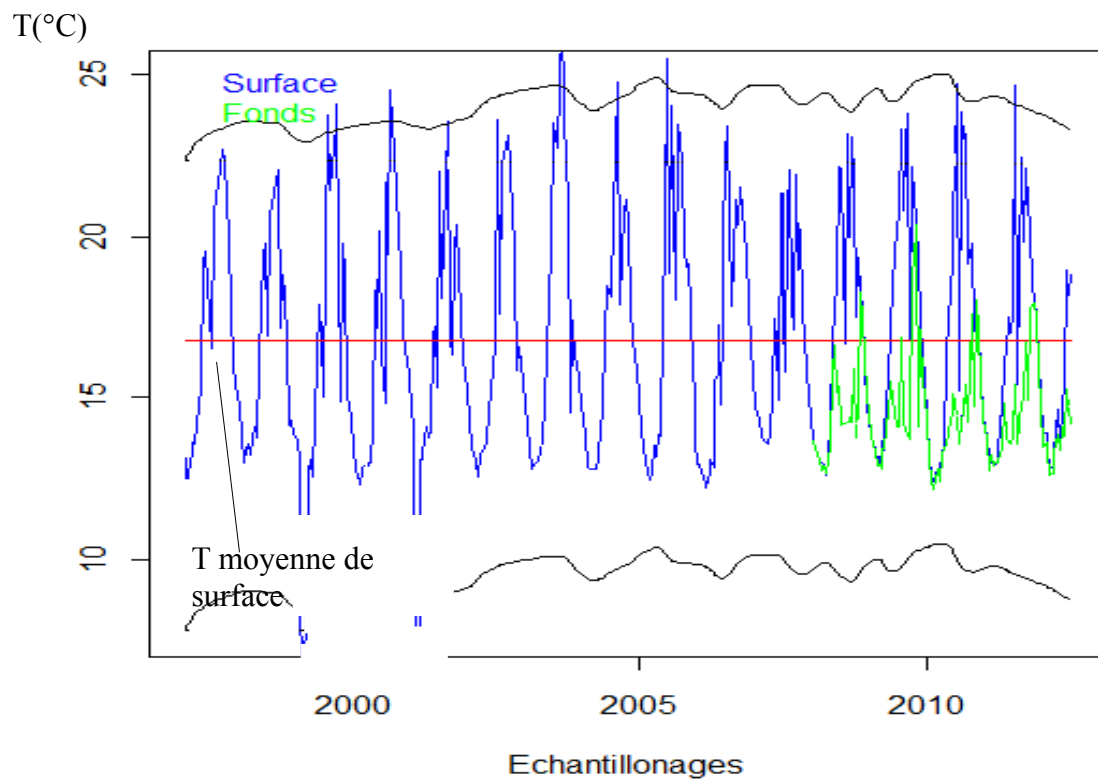


Figure 20 : Evolution de la température (°C) de surface et du fonds et température moyenne de surface de 1997 à 2011 à la station SOMLIT, avec l'intervalle de confiance à 95 % à SOMLIT.

Les anomalies de températures (figure 21) mettent en évidence clairement la tendance du période de tendance positive de 2000 à 2010 puis une inversion à partir de 2010, mais l'étude sur un plus longue période mettrait en évidence un réchauffement important de ces valeurs de surface corrélés à l'augmentation de température dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle.

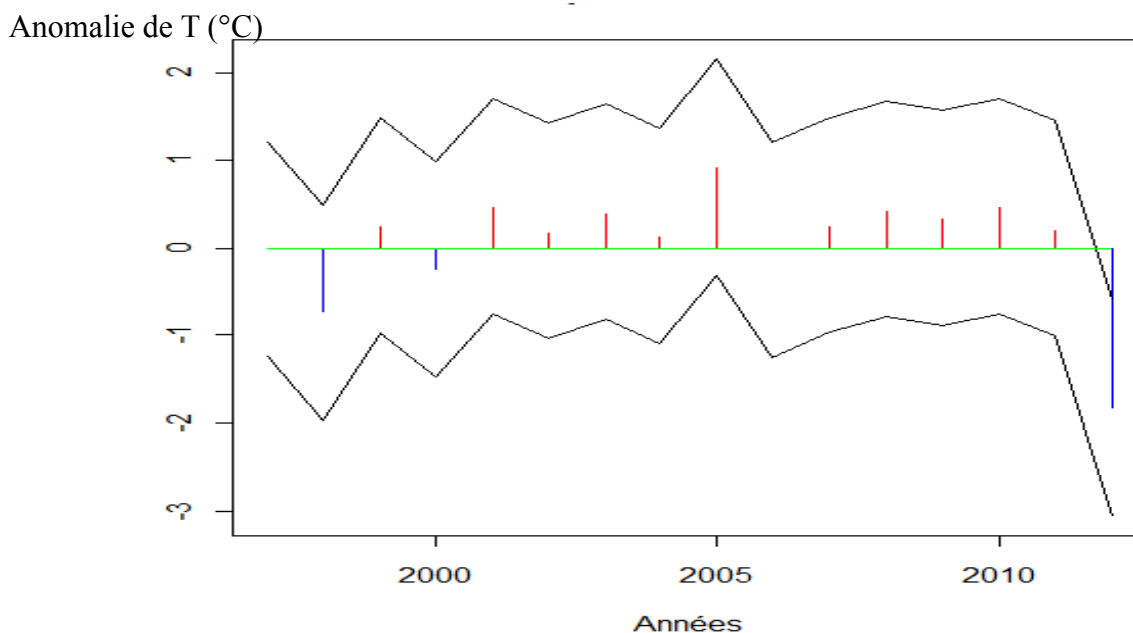


Figure 21 : Anomalie de température de surface calculé comme la différence des températures de surface avec la moyenne (en °C), avec l'intervalle de confiance à 95% à SOMLIT.

Les données de « chlorophylle a » (figure 22) depuis 1997 mettent en évidence, en plus de la cyclicité annuelle décrite précédemment des variations dans la biomasse d'organisme photosynthétique. Avec des maximums pour certains bloom printanier en surface dépassant les 1,5 $\mu\text{g/l}$, cette tendance s'affirme depuis 2005 avec des blooms de plus grande ampleur. Une autre interprétation serait que les organismes responsable de ce bloom aient changé à cette même période, des organismes des quantités intrinsèques en CHLa supérieur. Malgré tout la cyclicité n'est pas totale est certaine le bloom printanier reste très faible, par exemple en 2011 où la valeur d'environ 0,6 $\mu\text{g/l}$ est à peine supérieur à la moyenne de l'année de 0,4 $\mu\text{g/l}$. Ces valeurs annuelles de CHLa décrivent un état mésotrophe de la rade, la position assez proche de la côte permet à la station SOMLIT d'avoir accès à de certaines quantités de produits issues de lessivage et des rejets notamment via l'Huveaune. Il aurait été intéressant de décrire les valeurs au niveau de la profondeur du maximum de fluorescence, qui aurait permis de quantifier la biomasse chlorophyllienne.

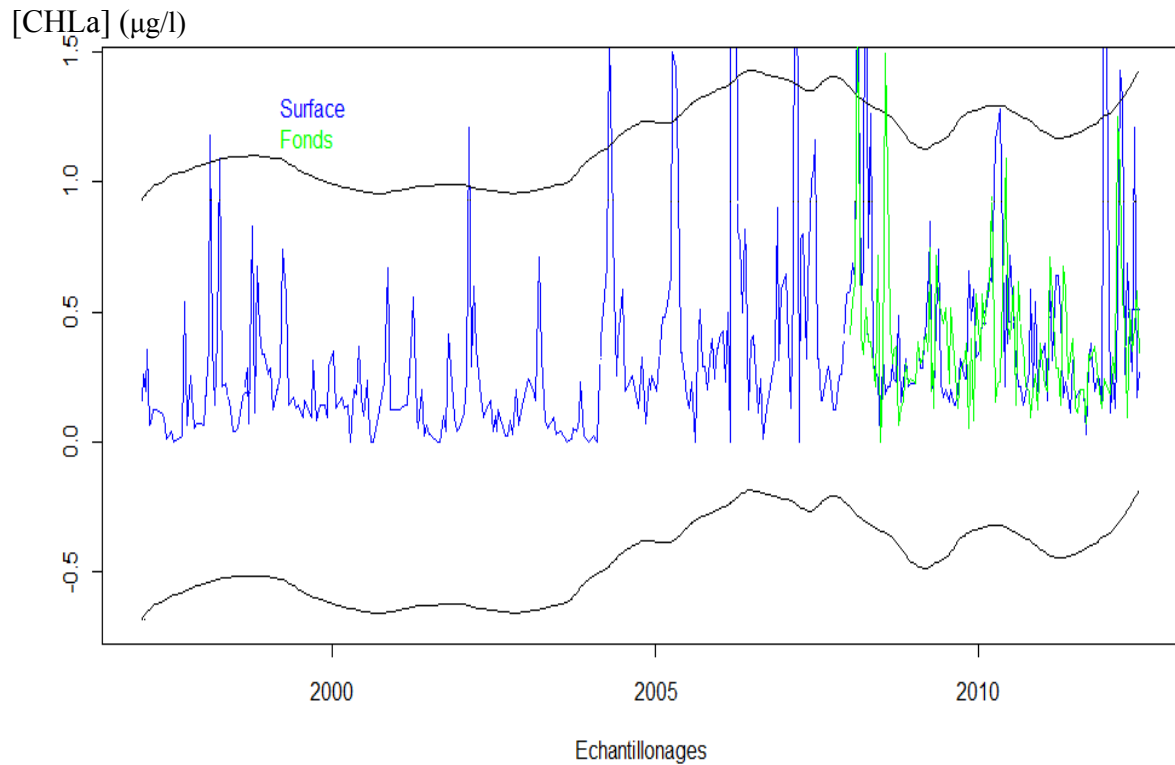


Figure 22: Evolution de la concentration en « chlorophylle a » en $\mu\text{g/l}$ en surface et au fonds, avec l'intervalle de confiance à 95% à SOMLIT.

Le rapport du carbone organique particulaire sur la "chlorophylle a" (figure 23) décrit les mêmes phases que la série précédente. On observe un inversement des tendances à partir de 2005, où la biomasse organique (MOP) passe d'un état fortement dominé par les hétérotrophes, avec une intense activité de recyclage, avec des valeurs du rapport supérieur à 200. Cette condition s'inverse ensuite malgré un pic en 2007, il peut s'agir d'un artefact, où d'un épisode très perturbant qui aurait détruit les communautés phytoplanctoniques est dégradée la chlorophylle. Mais au vue de la valeur très élevé il s'agirait plutôt d'un artefact dans le calcul du rapport, une tel perturbation dans le milieu serait peu probable. Quoiqu'il en soit à partir de 2005 la biomasse organique revient sous le contrôle des organismes phytoplanctoniques qui vont de nouveau dominés le milieu pélagique. Les valeurs passent de nouveau sous le seuil des 200, voir des 100 en période de bloom printanier.

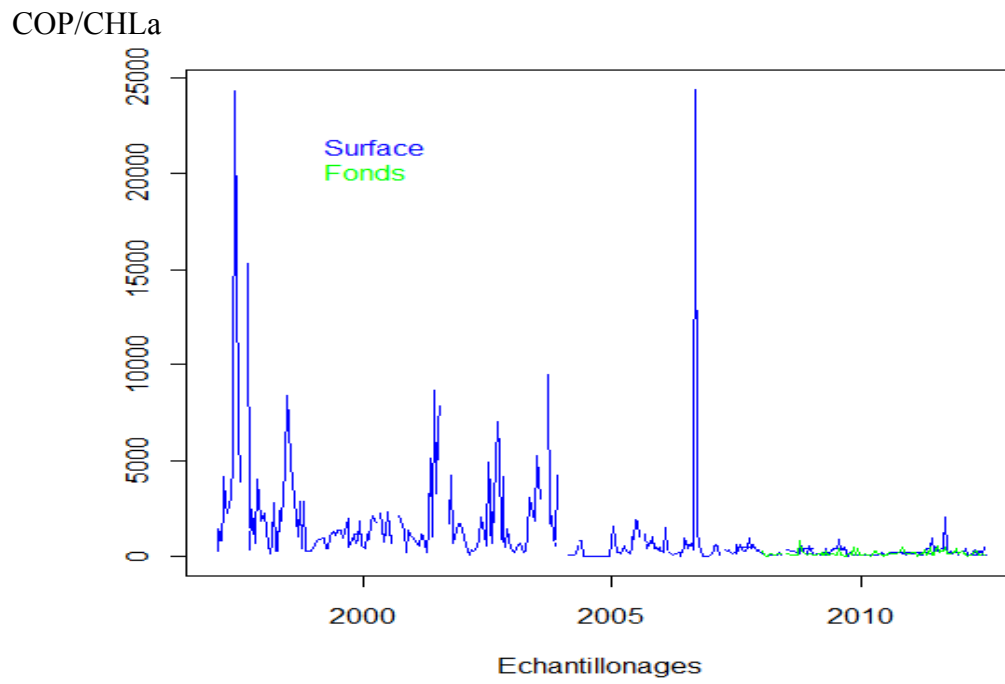


Figure 23 : Evolution du rapport de la concentration en carbone organique particulaire COP sur la concentration en « chlorophylle a ». Ce rapport décrit la qualité de la chlorophylle à SOMLIT.

4 Discussion

4.1 Variabilité spatiale des écosystèmes pélagiques

Après comparaison des différents profils pour chaque station, on observe que la température est similaire aussi bien au niveau de la station Frioul, que SOLMIT et que Julio. En étudiant les conditions atmosphériques de la période d'échantillonnage on remarque que les conditions météorologiques sont assez constantes :

- vitesse de vent faible : permet un approfondissement de thermocline car la masse d'eau n'est pas mélangé en surface par les phénomènes de friction du vent.
- Température atmosphérique constante : la température atmosphérique est similaire à la température de la couche de surface de la masse d'eau.
- absence de précipitation et forte irradiance : engendre une couche euphotique importante.

La combinaison des ces paramètres atmosphériques permet d'obtenir une masse d'eau homogène en surface sur toute la rade de Marseille et même plus au large à la station Julio. La thermocline se trouve à la même profondeur à toutes les stations et les variations de température au dessous de la thermocline s'explique uniquement par la différence de profondeur.

En observant les profils de salinité on se rend compte que les stations SOLMIT et Frioul sont légèrement moins salées que la station Julio. Cette différence s'explique certainement par la présence d'apport fluviatile faible au niveau de la rade de Marseille. Ce faible apport d'eau douce fait donc varier faiblement la salinité de surface. On observe ensuite au niveau de la thermocline une diminution de la salinité avec la température. A la station Julio, à partir de 60 m de profondeur on observe une ré-augmentation de la salinité certainement du au mélange avec des eaux plus salé du large.

L'observation des profils de fluorescence sur chaque station nous confirme la présence d'organisme photosynthétique sur toute la masse d'eau, du fait de la forte irradiance et de la faible turbidité de l'eau permettant une importante couche euphotique. Cependant c'est à la base de la thermocline que l'on observe le maximum de fluorescence pour chaque station. Il est aussi remarqué à la station Julio un second maximum de fluorescence beaucoup plus en profondeur certainement du par le mélange de la masse d'eau avec des eaux plus riche en nutriment (augmentation de salinité) et cumulé avec la présence de lumière suffisamment importante on observe un développement phytoplanctonique.

On peut aussi souligner la fluorescence plus importante en surface à la station SOLMIT et Frioul qu'à la station Julio par la proximité de la ville de Marseille qui peut être une source de nutriments utilisé pour le développement phytoplanctonique. La station SOLMIT se trouve certainement plus proche de la source que la station Frioul qui doit être protégé de ce courant de contaminant par la présence de l'île du Frioul. Et la station Julio est bien trop au large pour être concerné par ce courant qui se dilue rapidement dans la rade de Marseille.

Les conditions météorologiques permettent une similitude des paramètres physico-chimique dans les 3 stations d'étude (SOLMIT, Frioul et Julio). Des différences se font uniquement par la présence d'activité anthropique ou le mélange avec des courants larges permettant ainsi le développement d'organismes photosynthétiques dans des proportions similaire au niveau de la base de la thermocline. Seule la profondeur plus importante de la station Julio permet un deuxième pic plus profond permis grâce au mélange avec des eaux riches venant du large.

4.1.1 Répartition des communautés zooplanctoniques

Une caractéristique importante des populations zooplanctoniques est l'hétérogénéité de leur répartition dans le milieu pélagique (Queguigner, 2009). Ces organismes présentent fréquemment une répartition en tache (maculorépartition ou patchiness) liée à l'action de différents facteurs (physiques mais aussi biologiques). Ce regroupement des individus peut être parfois très important et conduire à la formation de véritables essaims de zooplancton qui peuvent être visibles à l'œil nu. Ce patchiness du zooplancton a pour conséquence d'entraîner également une distribution hétérogène du phytoplancton qui présente alors lui aussi ce phénomène de patchiness.

Pour nos trois stations d'une manière globale les biomasses de zooplancton restent faibles avec des pics de biomasses selon les classes de tailles. Comme dans les précédentes années, les fractions de biomasse qui dominent sont celle de 200 à 500 μm et 500 à 1000 μm . Les classes de tailles nous permettent de dire que l'on a du métazooplancton pour tous les organismes supérieur à 200 μm et la plus petite classe de taille correspond aux protozooplancton.

La classe de 80 à 200 μm est légèrement faussée car le filet de prélèvement vertical faisait 200 μm donc les espèces présentes pour cette fine classe sont des agrégats de petits organismes.

A SOMLIT, les organismes dominants sont ceux inférieurs à 80 μm avec plus de 80% de la biomasse. De plus c'est la plus forte biomasse de toutes nos stations avec une moyenne de 23mg.m⁻³. Les valeurs nous permettent de supposer qu'à SOMLIT le recyclage y est rapide avec peu d'organismes phytoplanctonique et une boucle microbienne très active. Toutefois les valeurs obtenues peuvent être entachées d'erreurs obtenues lors des prélèvements et tamisage. Enfin les valeurs de « chlorophylle a » sont les plus faibles pour cette station ce qui confirme la faible présence de phytoplancton et de zooplancton de grandes tailles.

A Frioul, on a une très forte biomasse avec 40% respectivement pour les classes de tailles de 200 à 500 μm et 1000 à 2000 μm . Ces organismes de plus grande tailles montrent avec des valeurs fortes de « chlorophylle a » par rapport aux différentes stations une activité phytoplanctonique remarquable traduisant une présence de zooplancton (organismes de grandes tailles) à cette station.

Julio quand à elle est caractérisé par des valeurs très faibles de biomasses pour toutes les tailles. L'activité zooplanctonique y est faible et sûrement saisonnière en regard des données de « chlorophylle a » qui sont les plus importantes aux profondeurs intermédiaires. Les classes de tailles sont homogènes, pas de dominances particulières.

4.1.2 Répartition des communautés phytoplanctoniques

En observant les données obtenues après mesure de la chlorophylle lors de la campagne d'échantillonnage, on se rend compte que la quantité de chlorophylle est pratiquement similaire à la quantité de phaeopigments. Cela s'explique par une dégradation de la matière organique qui enrichi la masse en d'eau en nutriment. De plus, de par la forte stratification de la masse d'eau, les eaux de surface sont très appauvri en nutriment, c'est pour cette raison que les concentrations en chlorophylles sont faible a la station Julio, cependant, a cause des apports anthropique dans la rade de Marseille les concentrations en chlorophylle en surface pour les stations SOLMIT et Frioul sont plus élevés. Les concentrations en phytoplancton présent durant la période d'échantillonnage sont principalement du à la reminéralisation de la matière organique car on observe la plus forte concentration entre la base de la thermocline et le fond. Il n'y a qu'à la station Julio ou la couche euphotique devient limitant dans la production phytoplanctonique et c'est pourquoi on observe de faible concentration au fond.

De plus la période d'échantillonnage s'est effectuée durant la période automnale, cela implique naturellement de faible concentration en nutriment du fait qu'ils ont été utilisés lors du 1^{er} bloom du printemps et du 2^{ème} bloom automnal. On se trouve dans des périodes de semi stratification.

4.2 Variabilité temporelle dans les écosystèmes pélagiques

Les écosystèmes pélagiques présentent de fortes variabilités dans le temps, avec des variations saisonnières directement reliées aux cycles climatiques, aux variations des paramètres physiques, principalement la température en milieu côtier. Les différentes échelles de variabilités définissent des tendances et des cyclicités très différentes qu'il faut étudier selon le contexte de l'étude. Les cycles annuels de production décrivent dans la rade un bloom printanier principale, alors que la variabilité inter-annuelle met en évidence une tendance à l'eutrophisation de la rade.

4.2.1 Variabilité annuelle

L'écosystème de la rade est marqué par une forte saisonnalité liée directement aux variations de l'irradiance des zones tempérées. Dans ces systèmes selon Legendre & Le Fèvre (1989), les grands organismes phytoplanctoniques sont généralement représentés par les diatomées qui sont avantagés au cours des premiers stades de succession lorsque les apports nutritifs sont importants et que le mélange vertical est toujours élevé. L'importance de la biomasse phytoplanctonique durant ces périodes de forte production est permise par l'absence de broutage. La faible proportion de brouteurs est liée au bas niveau de production primaire en dehors des périodes de blooms. Dans ces conditions, ces écosystèmes possèdent une forte capacité de sédimentation dont le dépôt est lié à l'hydrodinamisme dans la rade de Marseille.

Le cycle annuel de production s'articule autour d'un bloom printanier important, celui-ci démarre suite à une période hivernale très mélangée où les nutriments s'accumulent dans toute la colonne d'eau. Quand l'irradiance permet l'activité photosynthétique dans toute la colonne d'eau la production primaire débute de façon brutale, le modèle de Sverdrup (1953) décrit assez bien ce phénomène en milieu côtier des écosystèmes tempérés. C'est sous l'influence du phytoplancton sûrement en première phase de succession par des diatomées pélagiques puis des organismes de plus petite taille. Ce contrôle bottom-up va laisser place avec l'épuisement des nutriments à une dominance des hétérotrophes de taille inférieure où le recyclage permettra de prolonger la productivité de l'écosystème.

Des études plus approfondies sur la composition des communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques permettraient de déterminer clairement les mécanismes physico-chimiques mesurés.

4.2.2 Variabilité inter-annuelle

De manière générale l'étude à l'échelle décennale met en évidence une augmentation de la production primaire lors des épisodes de blooms printaniers dans la rade de Marseille. Cette augmentation peut-être liée directement aux rejets anthropiques dans la rade via l'Huveaune et aux lessivages par précipitations dans les différents bassins versants marseillais. Une eutrophisation des eaux, une augmentation des précipitations, une modification dans la courantologie expliqueraient cette tendance à l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique observé via la concentration en « chlorophylle a ». Cette augmentation pourrait s'expliquer simplement par une modification dans les successions phytoplanctoniques avec la prédominance dans le bloom d'espèce à concentration intrinsèque en « chlorophylle a » supérieur.

En ce qui concerne les données de température de surface l'on observe pas de tendance au réchauffement sur la décennie observée. Ceci peut-être aux forçages atmosphériques par l'action du Mistral qui engendre des phénomènes d'upwelling surtout en période hivernale, l'action du vent peut créer une certaine inertie dans la réponse de la couche de surface à l'augmentation des températures observées dans l'atmosphère.

Les écosystèmes pélagiques sont donc très complexe et comporte de fortes hétérogénéités tant spatiale que temporelle. L'étude de cette variabilité nécessite la prise de nombreux facteurs, physiques comme la température, la salinité, paramètres conservatifs qui décrivent les mouvements des masses d'eau dans leur composante verticale, stratification de la colonne d'eau, horizontale par les courants et les transports qui engendrent une répartition non homogènes des composants chimiques et donc des organismes. La lumière joue un rôle primordial dans la capacité des organismes photosynthétiques à se développer et donc leur répartition verticale dans la colonne d'eau. Il en résulte finalement tout un équilibre dynamique dans la répartition des organismes photosynthétiques dans la colonne d'eau qui vont induire une répartition du même type des organismes du zooplancton brouteurs et ceux qui participent au recyclage. La répartition de ces micro-organismes au sein de la colonne peut alors s'apparenter à un « patchwork » avec des zones de forte densité et des zones d'absence.

Afin de déterminer toute cette variabilité il convient de mettre au point des systèmes de mesures haute fréquence à forte résolution pour déterminer jusqu'à l'échelle du femtoplancton pour décrire scrupuleusement la distribution spécifique au sein des systèmes pélagiques. Ce type de travaux permettra d'établir le rôle trophique de chaque organisme avec leur dynamiques dans le temps et dans l'espace en corrélation avec les paramètres physico-chimique du milieu.

Bibliographie

- **Aminot A., Kérouel R.**, 2004. Hydrobiologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyse. Ed. Ifremer, 336 p.
- **Barrett J., Jeffrey S.W.**, 1964. Chlorophyllase and formation of an atypical chlorophyllide in marine algae. *Plant physiology*, 39, 44-47.
- **Benson B and Daniel Krause D.**, 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. *Limnol. Oceanogr.*, 29(3), 1984, 620-632.
- **Holm-Hansen O., Rieman B.**, 1978. Chlorophyll a determination : improvement in methodology. *Oikos*, 30.
- **Jeffrey S. W., Mantouran R.F.C.**, 1997. Phytoplankton pigments in oceanography : guidelines to modern methods. Unesco, Paris, France. Monographs on Oceanographic methodology, 10, 661 p.
- **Legendre L., Le F vre J.**, 1989. Hydrodynamic singularities as controls of recycled versus export production in oceans. *In: Berger W.H., Smetacek V.S., Wefer G. (eds) Productivity of the ocean: present and past.* Wiley, Chichester, pp. 49-63.
- **Millero F.J., Poisson A.**, 1981. International one atmosphere equation of state of seawater. *Deep-Sea Res.*, 28 a: 625:629.
- **Qu guiner B.** 2009. Structure et Fonctionnement des Ecosyst mes Pélagiques Marins. Centre d'Oc anologie de Marseille, Aix-Marseille Universit  ; CNRS ; LOPB UMR 6535, Laboratoire d'Oc anographie et de Biog ochimie, OSU/Centre d'Oc anologie de Marseille, 89 pp.
- **Savoie N.**, 2011. UMS CNRS – Station Marine d'Arcachon. Pr sentation des COP-NOP. http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/.../Presentation_COPNOP.pdf
- **Sieburth J.M., Smetacek V., Lenz J.**, 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartment of the plankton and their relationship to plankton size-fractions. *Limnology and Oceanography*, 23:1256-1263.
- **Sverdrup H.U.**, 1953, On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du Conseil international pour l'Exploration de la Mer*, 18:287-295.
- **Yentsch C.S., Menzel D.W.**, 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and pheophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.*, 10, 221-231.