

**Rapport de Stage de master 1^{ère} année
Année 2020-2021
Master Sciences de la Mer**

**Élaboration d'une stratégie de campagne en
mer pour l'étude du couplage physique-
biologie à méso-échelle dans l'Atlantique Sud**

Raphaël CLEMENT

Réalisé sous la responsabilité de Andrea DOGLIOLI

MIO – Institut Méditerranéen d'Océanologie

Sous la supervision académique de Dominique DAVOULT

1. Introduction

En 1934, alors qu'il étudiait les microbiotes des lacs salés californiens, Baas Becking formula la célèbre hypothèse « *tout est partout, mais l'environnement sélectionne* ». Cette hypothèse postule que la distribution et la composition des communautés de phytoplancton sont entièrement déterminées par les conditions du milieu et donc par la sélection environnementale. Cependant, il a été démontré que l'advection (transport physique horizontal) entre les masses d'eau pouvait encore plus influencer la composition des communautés de micro-organismes que la sélection environnementale (Hanson, *et al.*, 2012).

Dans ce contexte, grâce à l'utilisation de modèles couplés physiques et biologiques, les travaux de Lévy *et al.* (2015) ont permis de constater que des structures physiques à méso-échelle, comme des tourbillons et des fronts pouvaient influencer les communautés de phytoplancton et leurs interactions dans le gyre subtropical de l'Océan Atlantique Nord. Ici, les fronts sont considérés comme des zones de transition entre deux masses d'eau à forts contrastes en température et densité. Leurs travaux ont permis de conclure qu'il existe une plus grande diversité et des types à croissance plus rapide sur les fronts, où les apports en nutriments sont plus importants et où les populations des masses d'eau adjacentes sont constamment mises en contact ; et une plus faible diversité au cœur des tourbillons, où les masses d'eau sont maintenues isolées suffisamment longtemps pour permettre une exclusion compétitive (Lévy *et al.*, 2015). Seulement cette hypothèse est construite à partir de modèles numériques et n'a jamais été testée *in situ*. Ce stage s'inscrit justement dans ce contexte : vérifier *in situ* cette hypothèse de modélisation.

Un défi majeur pour tester cette hypothèse avec une étude *in situ* est de savoir comment détecter la concurrence entre les différents groupes phytoplanctoniques : la métabolomique semble fournir un moyen d'y parvenir (Poulson-Ellestad *et al.*, 2014). Une stratégie d'échantillonnage a alors été élaborée, puis sera mise en pratique lors de la campagne océanographique AtlantECO qui se déroulera en février 2022 à bord du *Tara*. Cette campagne fait partie des récentes campagnes disposant à bord une sélection d'outils automatisés de dernière génération permettant de réaliser des analyses métabolomiques et protéomiques, afin d'étudier les interactions entre microorganismes et de caractériser les communautés phytoplanctoniques grâce aux protéines et métabolites dispersés dans les échantillons (Poulson-Ellestad *et al.*, 2014). La campagne AtlantECO se déroule au sein de l'expédition *Tara Microbiomes*, une mission d'envergure regroupant 44 organisations scientifiques issues de plus de 14 pays. C'est pendant sa navigation dans l'Atlantique Sud que le programme AtlantECO viendra guider les opérations du *Tara*. Le plan d'échantillonnage développé dans le cadre de ce stage concerne la région de l'Atlantique Sud autour des 20°O, entre 30°S et 40°S lors de la traversée qui se fera entre Punta Arenas et Capetown (Fig. 1). Le travail en mer sera réalisé en



Figure 1. Carte de l'expédition *Mission Microbiomes* suivie par le *Tara* à travers l'océan Atlantique Sud. Le cadre rouge représente la zone d'échantillonnage (à environ 20°O et entre 30°S et 40°S).

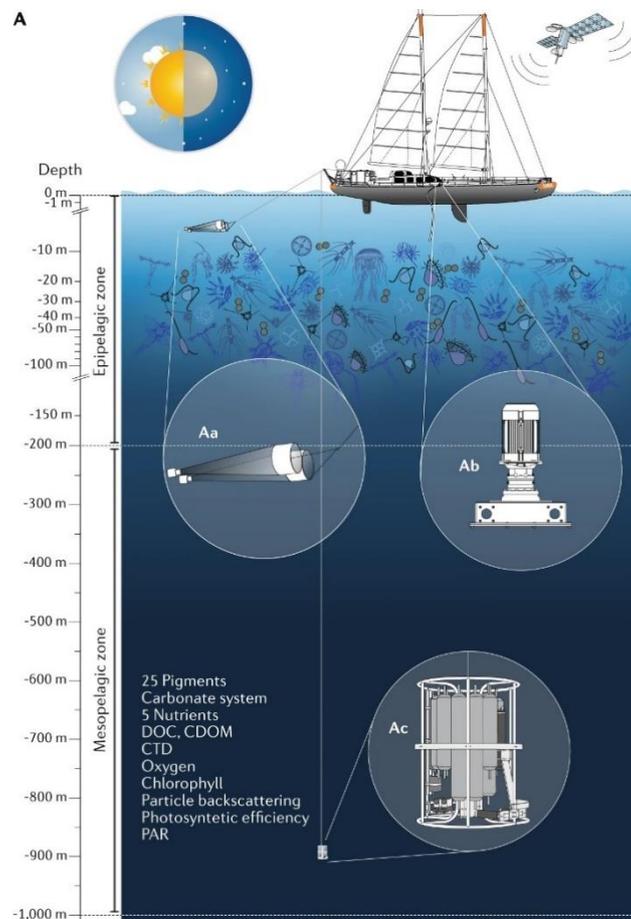


Figure 2. Quelques outils déployés au cours de la campagne. **Aa** : filets à plancton ; **Ab** : pompe péristaltique ; **Ac** : rosette équipée des bouteilles Niskin. Figure extraite de Sunagawa *et al.*, (2020).

interaction avec une équipe à terre, permettant de guider le bateau à distance pour suivre au mieux une structure tourbillonnaire grâce à l'analyse des données satellites en temps réel (altimétrie et chlorophylle-a). Pour mettre en évidence l'effet de la dynamique à méso-échelle sur la composition et les interactions entre les différents groupes phytoplanctoniques, une stratégie Lagrangienne a donc été mise en place, afin d'effectuer un suivi temporel des masses d'eau et des communautés les composant.

2. Matériels et méthodes

2.1 Mesures *in situ*

Le *Tara* est un voilier français destiné à la recherche scientifique et à la défense de l'environnement. C'est une goélette à deux mâts avec une coque en aluminium de 36 mètres possédant à bord du matériel d'étude océanographique, un laboratoire sec et un humide, et peut accueillir jusqu'à 15 marins et scientifiques. L'expédition *Mission Microbiomes* est conçue par la *Fondation Tara Océan* et ses partenaires scientifiques parmi lesquels le CNRS, le CEA et l'EMBL. Pendant 2 ans, le *Tara* va parcourir plus de 70 000 kilomètres en Atlantique Sud, le long des côtes sud-américaines et africaines, jusqu'en Antarctique (Fig. 1). Après avoir quitté Lorient le 12 décembre 2020, son retour est programmé pour la mi-septembre 2022. La phase *AtlantECO*, financée par l'UE et coordonnée par la *Stazione Zoologica Anton Dohrn* (Italie) a pour but de déterminer la structure et la fonction du microbiome atlantique dans le contexte de la circulation océanique et de la présence de polluants, afin d'évaluer son rôle dans la dynamique des écosystèmes marins. Une expérience sera dédiée à l'étude de l'impact des phénomènes physiques méso-échelle sur le phytoplancton, en combinant données *in situ* et données satellitaires, dont la stratégie d'échantillonnage est développée ici.

Pour les mesures en continu, de l'eau de surface est prélevée constamment grâce à une pompe péristaltique industrielle à grand volume (Fig. 2). Les variables de température et de salinité de surface peuvent alors être mesurées grâce à un thermosalinographe (TSG) (Sunagawa *et al.*, 2020). Cette arrivée d'eau continue alimentera également un cytomètre en flux automatisé, utilisé pour l'analyse de la microbiologie. Ce cytomètre de modèle CytoSense fabriqué par CytoBuoy¹ est un outil qui permet de distinguer les différentes populations de phytoplancton à partir de leurs propriétés optiques (pigments) et de la taille des particules. Des filets à plancton seront également déployés pour filtrer d'énormes volumes d'eau jusqu'à 1000 mètres de profondeur et ainsi, selon la taille des mailles, collecter des types particuliers de micro-organismes (Fig. 2).

Des méthodes de séquençage de l'ADN et des gènes exprimés de l'ARN pourront être exécutées en temps réel, grâce des séquenceurs haut débit. Mais l'un des points forts de la mission AtlantECO, ce sont les outils d'analyse protéomique et métabolomique présents à bord du bateau : des spectromètres de masse permettront de détecter et d'identifier des molécules (protéines et métabolites) dispersées dans les échantillons puis de caractériser leur structure chimique (Poulson-Ellestad *et al.*, 2014).

1. <https://www.cytobuoy.com/options/bencht>

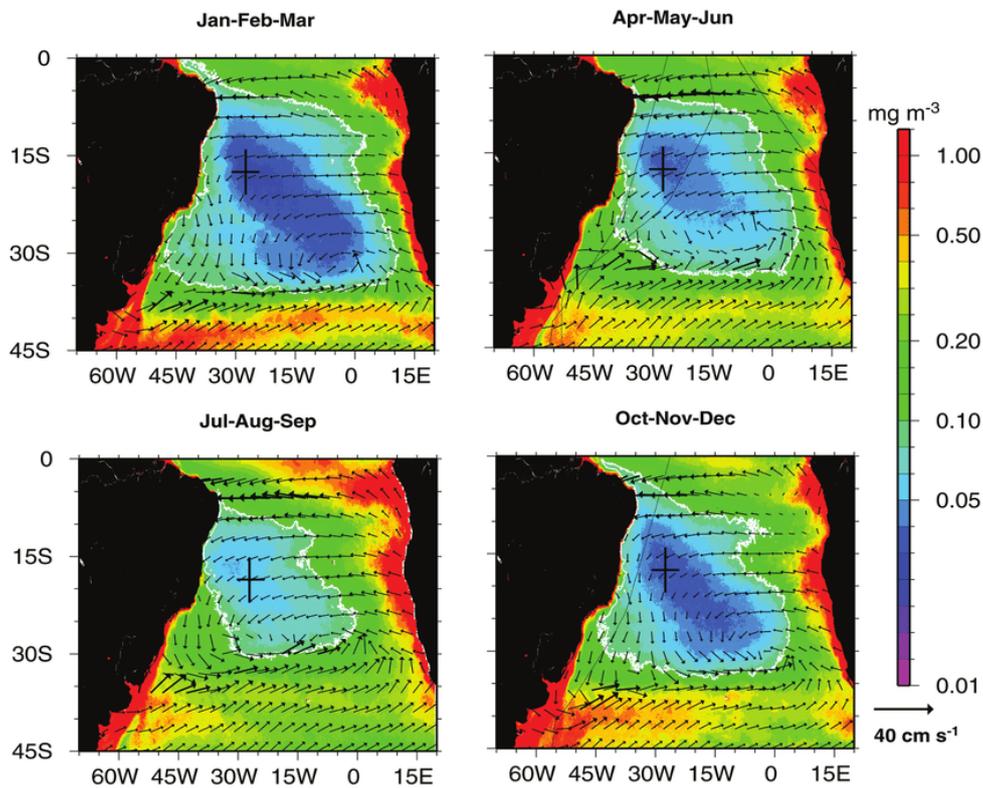


Figure 3. Climatologie saisonnière de la chlorophylle-a en Atlantique Sud avec les courants de surface superposés, obtenue grâce aux données de SeaWiFS de septembre 1997 à août 2002. Figure extraite de Signorini *et al.* (2004).

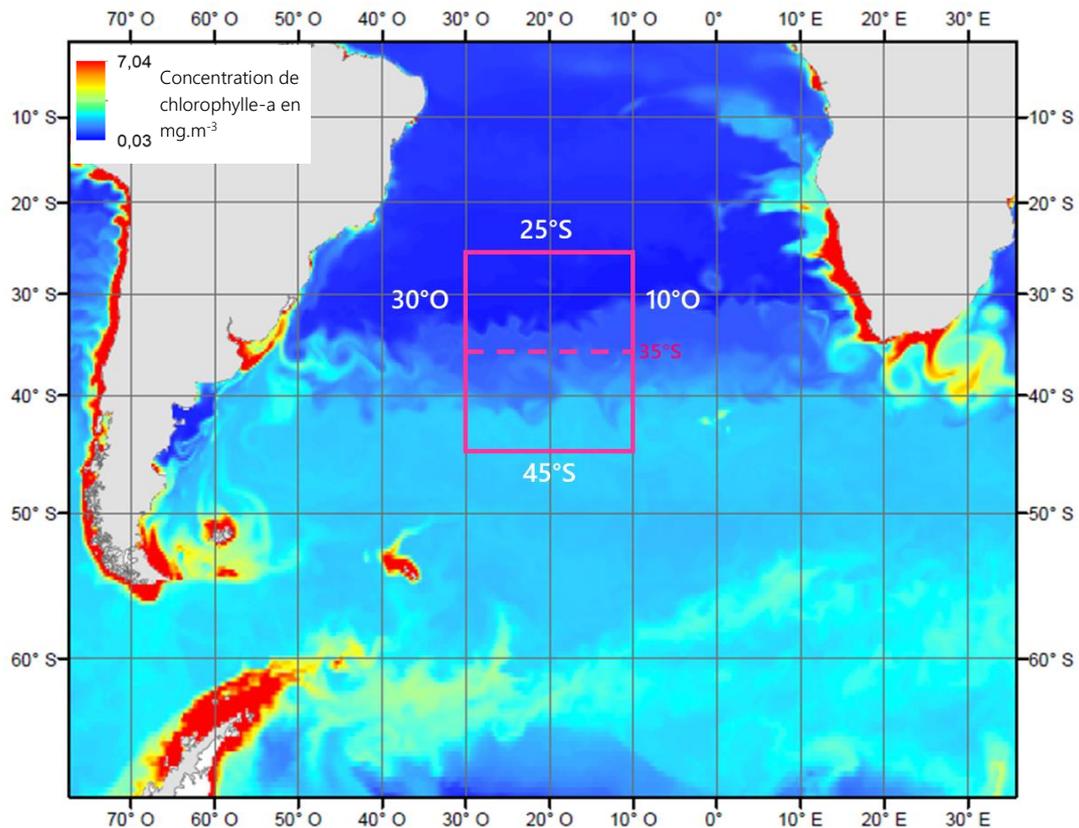


Figure 4. Carte satellite de la distribution moyenne de chlorophylle-a en surface en mars 2019 à partir des données quotidiennes issues du modèle biogéochimique GLOBAL_REANALYSIS_BIO_001_029 (Mercator-Ocean), disponibles sur le site du CMEMS.

Les analyses génomiques, protéomiques, métabolomiques et cytométriques nous permettront d'obtenir de solides informations sur la diversité du microbiome et des interactions entre organismes. Afin de caractériser la structure verticale et horizontale de la colonne d'eau, un système innovateur est utilisé sur le *Tara* : il s'agit d'un long câble accroché à l'arrière du navire, coulant à 100 mètres de profondeur. Sur ce dernier sont attachées 5 sondes CTD (*Conductivity–Temperature–Depth*), réparties tous les 20 mètres, récoltant la conductivité et température de l'eau ainsi que la profondeur. Cependant ce système ne pourra être déployé que sur de petits tronçons de la zone d'échantillonnage, car la trainée exercée sur le bateau le ralentira énormément (déplacement 3 nœuds environ avec le câble déployé). La Rosette est une structure en aluminium de 250 kg qui pourra être larguée une fois l'embarcation à l'arrêt (Fig. 2). Elle est composée de 11 bouteilles de type Niskin, qui sont programmées pour collecter de l'eau à différentes profondeurs, et de capteurs CTD mesurant les paramètres physico-chimiques afin d'obtenir un profil vertical profond (Sunagawa *et al.*, 2020).

Enfin, des bouées dérivantes munies d'une ancre flottante seront utilisées pour mesurer le courant de surface grâce à leur balise GPS. Ces flotteurs SVP (*Surface Velocity Programme*) fournissent également la température de surface et seront lâchés par triplète en différents endroits stratégiques pour suivre le déplacement des masses d'eau. Les trois bouées composant les triplètes seront larguées à environ 1 miles nautique d'intervalle. En plus des images satellites de l'altimétrie et de la chlorophylle-a, les mesures TSG ainsi que le suivi des bouées nous permettront de suivre au mieux le tourbillon rencontré sur place.

Le *Tara* quitte le Chili en février 2022 et regagne l'Afrique du Sud en avril 2022. Située sur sa trajectoire, la zone d'étude sera atteinte vers la mi-mars 2022, et l'équipe disposera alors de 15 jours pour réaliser l'échantillonnage complet. Cette zone s'étend des 25°S aux 45°S, entre les méridiens 30°O et 10°O (Fig. 1). Une fois entré dans ce cadre, le *Tara* devra se diriger vers la structure visée, qui sera définie en temps réel car il est très difficile de prédire la formation et la localisation de fronts en avance. C'est l'équipe à terre qui informera le *Tara* et le guidera vers le tourbillon.

2.2 Mesures par satellite

Afin de construire la stratégie d'échantillonnage sur une structure déjà existante et d'optimiser la visualisation du plan, des images satellites de chlorophylle-a ont été utilisées. Ces images représentent un tourbillon observé sur la zone d'étude en mars 2021.

Nous avons ensuite étudié les variations annuelles de concentration en chlorophylle-a pour connaître l'effet potentiel de la saisonnalité sur le phytoplancton induit par les dates d'échantillonnage. Pour cela, nous avons d'abord divisé la zone d'étude en 2 cadres séparés autour du parallèle 35°S, à cause du fort contraste en chlorophylle-a entre le gyre subtropical de l'Atlantique Sud et le courant Circumpolaire Antarctique (Fig. 3) (Signorini *et al.*, 2004). Ensuite, les moyennes spatiales

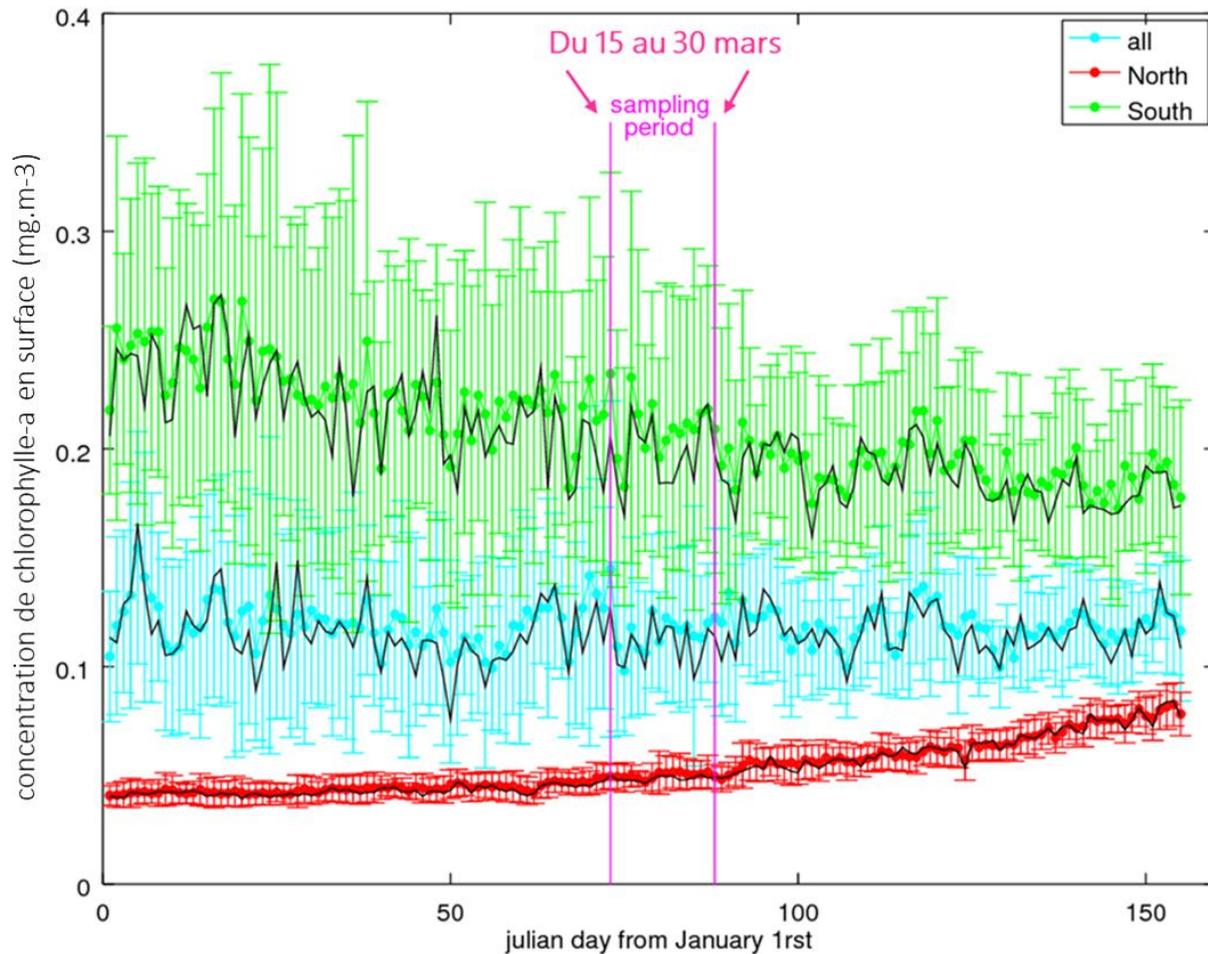


Figure 5. Graphique des moyennes quotidiennes de chlorophylle-a en surface dans le cadre Nord (en rouge), le cadre Sud (en vert) et dans les deux cadres réunis (en bleu), calculées sur la période 2008-2020. Les données sont issues des observations satellites journalières L3 (ACRI-ST), importées puis traitées sur OCTAVE GNU.

mensuelles ont été calculées pour l'année 2019 grâce aux outils de statistiques zonales du logiciel ArcMAP à partir d'images satellites issues du CMEMS (Fig. 4). Nous avons ensuite optimisé ces résultats avec une climatologie obtenue à partir des données quotidiennes L3 calculées sur la période 2008-2020 (données fournies par A. Doglioli), afin de vérifier la dynamique des blooms phytoplanctoniques dans la zone à la période de la campagne.

3 Résultats

3.1 Stratégie d'échantillonnage

Nous avons donc finalement retenu une stratégie finale qui permettrait de tester notre hypothèse de départ, soit : la présence d'une plus grande diversité sur le front d'un tourbillon de méso-échelle, contre une diversité plus faible au cœur. Pour y répondre, nous avons donc choisi d'effectuer une campagne Lagrangienne, nous permettant de suivre l'évolution temporelle des communautés phytoplanctoniques sur le bord et au centre du tourbillon. Ainsi, avec un nombre suffisant de stations, nous pourrions comparer statistiquement les communautés caractérisant ces deux zones du tourbillon. Les protocoles opérés sur chaque station sont explicités dans la section Matériels & Méthodes. Il faut compter entre 10 et 12 heures par station pour effectuer toutes les opérations. Le bateau voguera donc la nuit et les échantillonnages seront faits de jour.

L'équipe à terre guidera le *Tara* vers le tourbillon, et une fois atteint, l'équipage pourra larguer deux triplettes de flotteurs dérivants : une dans la partie inférieure, l'autre dans la partie supérieure de la bordure (Fig. 6). Une station biologique sera réalisée à chaque jetée de bouées : en effet, multiplier les mesures à la frontière d'un tourbillon nous aidera à la délimiter à une échelle fine. Seulement une vingtaine de miles nautiques sépareront ces deux stations en bordure. Ainsi, le système du câble aux 5 CTD pourra être déployé : la traînée engendrée ralentira le navire à une vitesse de 3 nœuds, une nuit entière sera donc nécessaire pour relier ces stations. Ensuite, le bateau rejoindra le centre du tourbillon, toujours guidé par l'équipe à terre. Comme nous nous attendons à trouver un gyre avec un rayon d'environ 50 miles nautiques (structure méso-échelle), il faut compter 9 à 10 heures de navigation à 5 ou 6 nœuds pour rejoindre le centre, sans le câble déployé. Nous n'aurons pas de profil vertical continu sur ce tronçon, mais la pompe maintiendra les mesures physico-chimiques et biologiques en surface. Lorsque le voilier accédera au centre, la dernière triplette de drifteurs sera jetée à l'eau et une station protocolaire effectuée. Ainsi, la triplette au centre devrait simplement entrer en rotation sur elle-même, et les bouées en bordure devraient s'aligner le long du tourbillon et suivre son mouvement. Le plan Lagrangien consiste alors à effectuer des allers-retours entre le cœur et le bord du gyre, en suivant le mouvement des bouées. Si les triplettes sont correctement placées, l'embarcation devrait donc effectuer un suivi temporel des masses d'eau, épousant la rotation anti-horaire du tourbillon. Les 14 jours d'échantillonnage seront alors consacrés à cette analyse en continu : un jour d'échantillonnage

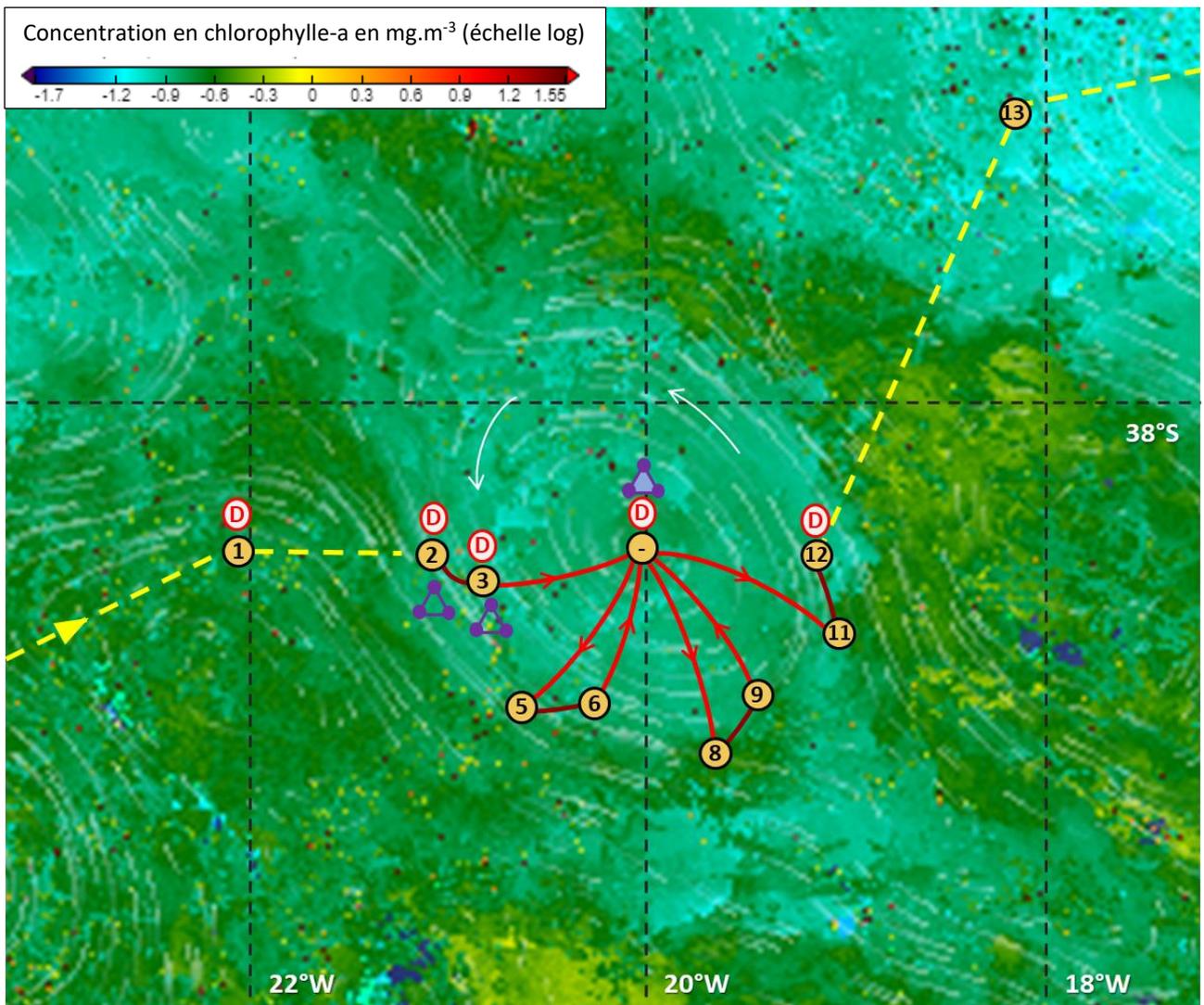


Figure 6. Stratégie d'échantillonnage Lagrangienne schématisée sur une structure tourbillonnaire. Chaque numéro représente une station, les stations marquées d'un D majuscule sont complétées par une mesure CTD profonde (1000 mètres). Les flèches rouges et jaunes représentent la trajectoire que le *Tara* va suivre. Les traits rouges plus foncés marquent les tronçons du trajet où le système du câble+CTD sera déployé. Les triangles violets représentent les triplettes de bouées dérivantes larguées en bordure et au centre du tourbillon. L'image de fond provient d'une capture d'écran de la concentration en chlorophylle-a à la surface moyennée sur 15 jours, issue du produit *OC4ME* (OLCI) représenté sur le site de l'*Ocean Virtual Laboratory* (ESA).

au centre, une nuit de navigation vers le bord, une journée d'échantillonnage, une nuit de navigation, etc... Quatre répliqués de ces trois stations seront alors réalisés durant cette période.

Enfin, deux stations « témoins » seront effectuées en plus : une à l'ouest et l'autre à l'est du tourbillon, représentatives d'une zone riche et d'une zone oligotrophe. Le tableau 1 synthétise la liste des stations avec leurs coordonnées, les dates et durées des trajectoires, au format CNFH (*Commission Nationale Flotte Hauturière* par l'Ifremer).

3.2 Mesures satellites

L'analyse des variations saisonnières de chlorophylle-a à partir de l'étude climatologique nous a permis de situer temporellement la période d'échantillonnage en fonction du bloom phytoplanctonique printanier. La figure 5 nous montre que les 15 jours de campagne ont lieu après la floraison et nous donne un ordre de grandeur de la concentration en chlorophylle-a moyenne lors de la deuxième quinzaine de mars. Les courbes mettent également en évidence la différence de concentration entre les deux grands cadres : beaucoup plus faible dans le gyre subtropical (au Nord des 35°S) que dans le courant circumpolaire Antarctique (au Sud des 35°S). Les concentrations pendant la période ciblée se situent autour des 0,05 mg.m⁻³ au-dessus des 35°S, contre 0,2 mg.m⁻³ en-dessous de ce parallèle.

4 Discussion

Contrairement aux campagnes océanographiques traditionnelles, AtlantECO se déroule à bord d'un voilier. Malgré l'optimisation des matériaux et l'organisation minutieuse du navire, la campagne est limitée par deux grands inconvénients : la taille réduite et la faible vitesse du *Tara*. A cause du manque de place, les quarante bouées prévues initialement ont dû être réduites à neuf seulement, et la lenteur nous a contraint dans l'organisation de la stratégie. Néanmoins, cette vitesse qui ne dépasse pas les six nœuds lui confère un avantage : les résultats pourront être acquis à plus haute résolution.

Au cours de ce stage, le travail réalisé a permis d'élaborer une stratégie d'échantillonnage cohérente avec l'expérimentation puis d'analyser la climatologie de la zone visée et d'exploiter les calculs, dans le but d'affiner la stratégie. En effet, ces données vont nous permettre de tester virtuellement la stratégie grâce à l'utilisation de deux modèles numériques issus des travaux de Lévy *et al.*, (2015) et Lévy *et al.*, (2014). Le modèle physique GYRE simule les courants océaniques et les variations des conditions environnementales de l'échelle du bassin jusqu'à la sous-méso-échelle, et le modèle multi-phytoplanctonique DARWIN décrit l'évolution de différents types de phytoplancton en fonction des paramètres abiotiques. Ainsi, en appliquant ces deux modèles combinés dans la zone d'étude, nous pourrions vérifier si en présence de gradients des caractéristiques et des abondances des différents organismes retrouvés dans les simulations, notre plan de campagne permet de les observer *in situ* dans les stations choisies et si oui à quel degré de précision.

Tableau 1. Tableau au format CNFH de la Flotte Océanographique Française synthétisant les étapes et détails des stations du plan d'échantillonnage.

								
Daily schedule								
DATE	TIME	Day	Zone name	South degrees (decimals deg.)	West degrees (decimals deg.)	Speed (kt) (outgoing)	Travelling time to the next station (hours)	Type of work
15/3	9H00	1	Station 1 - Outside West	38,60°	22,00°	5	7,6h	- Biological - Deep CTD cast
16/3	9H00	2	Station 2 - External border	38,60°	21,19°	3	6h	- Biological - Buoy system - Deep CTD cast
17/3	9H00	3	Station 3 - Internal border	38,75°	20,85°	5	8,4h	- Biological - Buoy system - Deep CTD cast
18/3	9H00	4	Station 4 - Center	38,58°	19,98°	5	10h	- Biological - Buoy system - Deep CTD cast
19/3	9H00	5	Station 5 - External border	39,25°	20,61°	3	7h	- Biological
20/3	9H00	6	Station 6 - Internal border	39,27°	20,16°	5	8,4h	- Biological
21/3	9H00	7	Station 7 - Center	38,58°	19,98°	5	10,5h	- Biological
22/3	9H00	8	Station 8 - External border	39,42°	19,66°	3	6,7h	- Biological
23/3	9H00	9	Station 9 - Internal border	39,19°	19,35°	5	9,4h	- Biological
24/3	9H00	10	Station 10 - Center	38,58°	19,98°	5	10,2h	- Biological
25/3	9H00	11	Station 11 - External border	38,88°	18,97°	3	5,2h	- Biological
26/3	9H00	12	Station 12 - Internal border	38,65°	19,12°	5	20h	- Biological - Deep CTD cast
27/3	-	13				5		Navigation to station 13 - all day long
28/3	9H00	14	Station 13 - Outside East	37,28°	18,20°	6	-	- Biological
29/3		15				6	-	Navigation out of the study area

Références

- Fondation Tara Océan, 2020. Conférence de Presse : Mission Microbiomes, la nouvelle expédition de la Fondation Tara Océan. <https://www.youtube.com/watch?v=3TguGbBzjiU>
- Hanson, C.A., Fuhrman, J.A., Horner-Devine, M.C., Martiny, J.B.H., 2012. Beyond biogeographic patterns: processes shaping the microbial landscape. *Nat Rev Microbiol* 10, 497–506. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2795>
- Lévy, M., Jahn, O., Dutkiewicz, S., Follows, M.J., 2014. Phytoplankton diversity and community structure affected by oceanic dispersal and mesoscale turbulence. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments* 4, 67–84. <https://doi.org/10.1215/21573689-2768549>
- Lévy, M., Jahn, O., Dutkiewicz, S., Follows, M.J., d’Ovidio, F., 2015. The dynamical landscape of marine phytoplankton diversity. *Journal of The Royal Society Interface* 12, 20150481. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0481>
- Lévy, M., Klein, P., Tréguier, A.-M., Iovino, D., Madec, G., Masson, S., Takahashi, K., 2010. Modifications of gyre circulation by sub-mesoscale physics. *Ocean Modelling* 34, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2010.04.001>
- Poulson-Ellestad, K.L., Jones, C.M., Roy, J., Viant, M.R., Fernández, F.M., Kubanek, J., Nunn, B.L., 2014. Metabolomics and proteomics reveal impacts of chemically mediated competition on marine plankton. *PNAS* 111, 9009–9014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1402130111>
- Signorini, S., Hooker, S., McClain, C., 2004. Bio-Optical and Geochemical Properties of the South Atlantic Subtropical Gyre.
- Sunagawa, S., Acinas, S.G., Bork, P., Bowler, C., Eveillard, D., Gorsky, G., Guidi, L., Iudicone, D., Karsenti, E., Lombard, F., Ogata, H., Pesant, S., Sullivan, M.B., Wincker, P., Vargas, C. de, 2020. Tara Oceans: towards global ocean ecosystems biology. *Nat Rev Microbiol* 18, 428–445. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0364-5>

Annexe – Covid 19

Malgré ce contexte un peu particulier, mon sujet se travaillait surtout depuis mon ordinateur, me permettant d'avancer n'importe où. Néanmoins, je me suis tout de même rendu au MIO de Marseille comme prévu, car je préfère travailler dans un bureau prévu à cet effet. De plus, tous les mardis je retrouvais mon maître de stage pour discuter de l'avancée du projet. J'ai pu également rencontrer les autres membres de l'équipe. J'ai donc beaucoup apprécié me rendre à Marseille pour effectuer la totalité du stage en présentiel, même si j'avais la possibilité de le réaliser depuis chez moi. Je n'ai rencontré aucune difficulté.