



Adaptation méthodologique de l'indicateur PH2 - Phytoplancton en Méditerranée : 2^{ème} partie

Propositions pour le cycle 3 basées sur l'analyse des données

Anne GOFFART, Dorothée VINCENT, Eric GOBERVILLE, Marion VILAIN

Septembre 2022

A.Goffart@uliege.be

Note réalisée dans le cadre de la convention OFB.21.01750 (DCSMM - Habitats pélagiques)
entre l'OFB et l'Université de Liège

Version du 12/09/22

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Introduction	4
1. Objectifs et stratégie	5
2. Précision sur les termes « Tchl a » et « chl a »	6
3. Distribution verticale de la chl a en zone côtière	6
3.1 Site de référence de Calvi (station PHYTOCLY) et choix des périodes	6
3.2 Données côtières issues du chantier collecte DCSMM	8
3.3 Comparaison des chl a mesurées <i>in situ</i> et dérivées des images satellite	11
4. Distribution verticale de la chl a au large	13
4.1 Site de référence au large de Calvi (station Tête de canyon)	13
4.2 Données du large issues du chantier collecte DCSMM	17
4.2.1 Boussole	17
4.2.2 Mola	18
4.3 Comparaison des chl a mesurées <i>in situ</i> et des données du système de modèles MedBFM3	20
5. Propositions pour les travaux d'évaluation DCSMM	22
6. Conclusions et perspectives	23
7. Liste des figures et des tableaux	23
8. Références	23
9. Annexe	26

RESUME

L'évaluation du Bon Etat Ecologique du descripteur 1 - Biodiversité « Habitats pélagiques » de la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) repose sur le seul critère D1C6 dans les 4 sous-régions marines françaises (Manche - Mer du Nord, Mers Celtiques, Golfe de Gascogne et Méditerranée Occidentale). Les 3 indicateurs utilisés actuellement (PH1, PH2 et PH3) ont été développés par les groupes de travail de la convention OSPAR pour l'Atlantique Nord-Est. Ils ciblent l'analyse des changements de la biomasse ou d'abondance, de la composition (*i.e.* rapports entre groupes fonctionnels) et de la diversité des communautés phyto- et zooplanctoniques. La synthèse bibliographique de Goffart et al. (2022a) au titre des habitats pélagiques de la DCSMM a montré qu'une caractéristique majeure du phytoplancton méditerranéen est la présence d'un maximum profond de chlorophylle (« Deep Chlorophyll Maximum », DCM) pendant toute la période de stratification thermique. En Méditerranée Occidentale, le DCM est essentiellement le résultat d'une accumulation de biomasse active. Il constitue une source de nourriture importante pour le zooplancton et une partie de l'ichtyoplancton qui s'y concentrent 6 à 8 mois par an.

Lors du cycle 2 de l'évaluation du Bon Etat Ecologique (BEE) des Habitats pélagiques, l'indicateur PH2 OSPAR - Phytoplancton a été adapté aux eaux françaises par Duflos et al. (2018) et appliqué aux eaux de surface des 4 sous-régions marines, sans que les spécificités du phytoplancton méditerranéen (*e.g.* dynamique ; variabilité spatio-temporelle ; composition et groupes fonctionnels) ne soient prises en considération. Cette note synthétise un jeu de données méditerranéennes pour proposer des adaptations méthodologiques de l'indicateur PH2 DUFLOS - Phytoplancton basé sur les changements de biomasse (concentration en chlorophylle *a*). Elle a pour objectif d'aboutir à un indicateur PH2 MEDIT - Phytoplancton qui intègre les spécificités des communautés phytoplanctoniques méditerranéennes, en particulier en ce qui concerne leur variabilité spatio-temporelle.

Le jeu de données étudié montre, ***en milieu côtier***, que la concentration en chlorophylle *a* (chl *a*) de surface est un proxy qui :

- permet de caractériser de manière satisfaisante les niveaux de biomasse observés en profondeur,
- répond aux apports continentaux intermittents et aux pressions anthropiques saisonnières.

Au large, et en raison de la présence du DCM, la chl *a* de surface n'est pas représentative de la distribution verticale de la biomasse phytoplanctonique dans la colonne d'eau. Il est donc nécessaire d'intégrer les données de biomasse sur la verticale pour y caractériser les communautés phytoplanctoniques.

Pour les futures évaluations DCSMM, nous proposons d'uniformiser les métriques de l'indicateur PH2 MEDIT - Phytoplancton comme suit :

- Masses d'eau côtière : moyennes mensuelles des concentrations en chl *a* de surface ($\mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$).

Nous proposons d'utiliser les données stationnelles de surface et les produits dérivés des images

satellite comme sources de données alimentant l'indicateur PH2 MEDIT - Phytoplancton. Ce choix est justifié par la bonne correspondance et la complémentarité des 2 produits.

- Large : moyennes mensuelles des concentrations en chl *a* intégrées sur la verticale (0-100m) par la méthode du point milieu et divisées par la profondeur d'intégration ($\mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$). En l'absence de correspondance entre les données *in situ* et celles du système de modèles MedBFM3, nous nous limiterons aux suivis stationnels actuellement disponibles au large, à savoir sur les points Boussole (Projet Boussole¹) et Mola (SNO MOOSE²).

Les travaux ont également mis en évidence le besoin d'acquérir de la donnée et des connaissances pour affiner la description des principales caractéristiques du DCM (profondeur, intensité, saisonnalité) en relation avec les contraintes environnementales qui contrôlent son développement.

¹ <http://www.obs-vlfr.fr/Boussole/html/home/home.php>

² Réseau élémentaire de l'IR-ILICO : <https://www.moose-network.fr/fr/organization-fr/>

INTRODUCTION

L'évaluation du Bon Etat Ecologique du descripteur 1 - Biodiversité « Habitats pélagiques » de la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) repose sur le seul critère D1C6 dans les 4 sous-régions marines françaises : Manche - Mer du Nord, Mers Celtiques, Golfe de Gascogne et Méditerranée Occidentale. Les 3 indicateurs utilisés pour décrire l'état écologique des Habitats pélagiques (PH1, PH2 et PH3) sont des indicateurs de surveillance (Shephard et al. 2015 ; Bedford et al. 2018) développés dans le cadre de la convention OSPAR pour l'Atlantique Nord-Est. Les développements actuels pour cette région sont réalisés par le groupe de travail ICG-COBAM au sein du projet européen NEA-PANACEA³ (2021 - 2023). Les indicateurs PH1, PH2 et PH3 ciblent les caractéristiques des communautés phyto- et zooplanctoniques dont l'organisation est contrôlée par les facteurs abiotiques et biotiques propres à chaque sous-région marine. Ces indicateurs permettent de détecter d'éventuels changements de la biomasse ou de l'abondance, de la structure (*e.g.* rapports entre groupes fonctionnels) et de la biodiversité des communautés planctoniques en réponse aux forçages exercés par les conditions environnementales dominantes. En particulier, l'indicateur PH2 OSPAR - Phytoplancton porte sur les changements de biomasse phytoplanctonique exprimés en concentrations de chlorophylle *a*, les données de surface ayant été mobilisées lors des travaux d'évaluation du Bon Etat Ecologique (BEE) au cycle 2 (Duflos et al. 2018).

La synthèse bibliographique réalisée en première partie de cette note (Goffart et al. 2022a) a montré qu'une caractéristique majeure du phytoplancton méditerranéen est la présence d'un maximum profond de chlorophylle (« Deep Chlorophyll Maximum », DCM) pendant toute la période de stratification thermique. Une étude récente (Cornec 2020) a souligné qu'en Méditerranée Occidentale, le DCM est essentiellement le résultat d'une accumulation de biomasse active (« Deep Biomass Maximum », DBM). Le DCM est une entité dynamique située sous la thermocline, au niveau de la nitracline, là où les nutriments nécessaires à la croissance du phytoplancton sont présents et où la lumière est encore suffisante pour permettre la photosynthèse. Le DCM, qui n'est pas détecté par les satellites en raison de sa profondeur, constitue une source de nourriture importante pour le zooplancton pendant 6 à 8 mois par an. Il attire aussi une partie de l'ichtyoplancton qui profite de cette agrégation de nourriture. Le DCM a donc un rôle essentiel dans le fonctionnement du milieu pélagique méditerranéen. Le DCM est observé partout en Méditerranée, à l'exception des zones côtières peu profondes où toute la colonne d'eau est épuisée en éléments nutritifs et en phytoplancton après le bloom phytoplanctonique de fin d'hiver.

Lors de l'évaluation du BEE au titre des Habitats pélagiques au cycle 2, l'indicateur PH2 OSPAR - Phytoplancton a été adapté aux eaux françaises par Duflos et al. (2018) et appliqué aux eaux de surface des 4 sous-régions marines. Le PH2 DUFLOS - Phytoplancton proposé a été calculé à partir de données

³ ICG-COBAM : Intersessional Correspondence Group on Coordination of Biodiversity Assessment and Monitoring ; NEA-PANACEA : North East Atlantic project on biodiversity and eutrophication assessment integration and creation of effective measures.

mensuelles de surface sous la forme d'anomalies correspondant à un écart (positif ou négatif) par rapport à un cycle saisonnier de référence. Le rôle majeur du DCM en Méditerranée montre qu'il est nécessaire d'intégrer *la dimension verticale* afin de caractériser l'état écologique des communautés phytoplanctoniques de cette sous-région.

1. OBJECTIFS ET STRATEGIE

Cette note vise à synthétiser un jeu de données méditerranéennes pour proposer des adaptations méthodologiques de l'indicateur PH2 DUFLOS - Phytoplancton et aboutir à un indicateur PH2 MEDIT - Phytoplancton qui intègre les spécificités du phytoplancton méditerranéen.

La stratégie du travail consiste à :

1. présenter des exemples types d'évolution saisonnière de la distribution verticale de la chlorophylle *a* dans un site de référence côtier (Baie de Calvi, Ouest Corse) et dans les eaux du proche large (Courant Ouest Corse au large de Calvi) ;
2. comparer un jeu de données de distribution verticale de chl *a* issues du chantier collecte des données DCSMM pour l'évaluation cycle 3 aux résultats précédemment obtenus à Calvi ;
3. comparer les données *in situ* aux autres données mobilisables : données satellite, données issues de la modélisation couplée hydrodynamique/biogéochimie ;
4. proposer une méthode de travail et des métriques adaptées à la sous-région marine Méditerranée Occidentale.

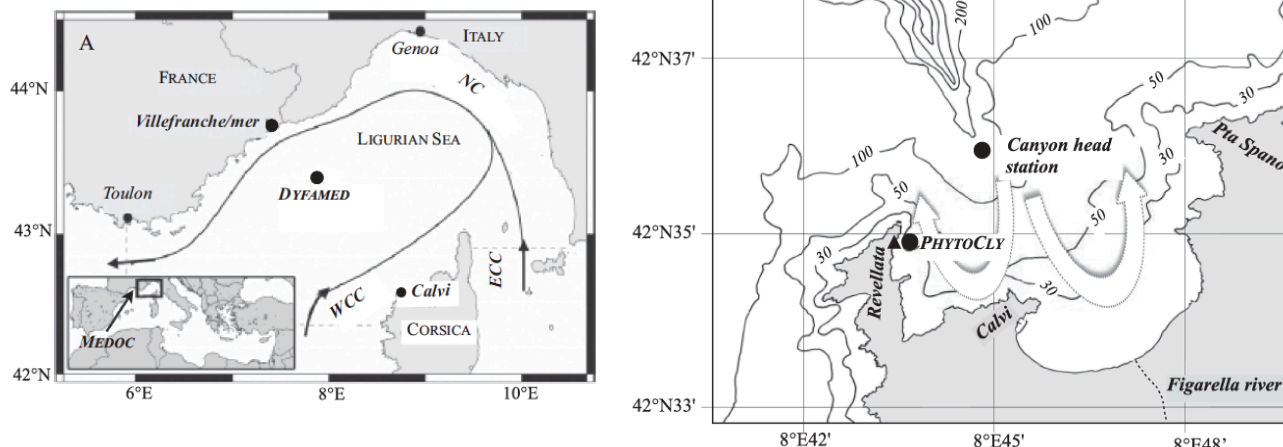
Le choix de Calvi est justifié par :

- l'existence de séries temporelles phytoplanctoniques menées à la station PHYTOCLY depuis 1979 à l'initiative de l'Université de Liège (**Figure 1**),
- l'existence de profils verticaux de pigments phytoplanctoniques réalisés en Baie de Calvi et dans les eaux du Courant Ouest Corse (station Tête de canyon au large de Calvi) (**Figure 1**),
- l'expertise « Phytoplancton » développée dans les eaux côtières corses depuis 4 décennies par l'Université de Liège et par la bonne connaissance des mécanismes qui y contrôlent la dynamique phytoplanctonique.

Parallèlement aux études menées par l'Université de Liège, le phytoplancton de surface de la station PHYTOCLY fait l'objet de suivis REPHY/DCE depuis 2006⁴.

⁴ L'identifiant IFREMER de la station PHYTOCLY est 122-P-083.

Figure 1. Position de Calvi en Mer Ligure (A) et des stations PHYTOCLY et Tête de canyon (B) (d'après Goffart et al. 2015).



2. PRECISION SUR LES TERMES « Tchl a » ET « chl a »

La chlorophylle *a* (*chl a*) est présente dans tous les groupes phytoplanctoniques, à l'exception des prochlorophytes (*Prochlorococcus* sp.) où elle est remplacée par la divinyl-chlorophylle *a* (DV-*chl a*). La somme de ces deux chlorophylles ($Tchl a = chl a + DV-chl a$) permet donc de déterminer la biomasse phytoplanctonique totale.

Les données de biomasse phytoplanctonique utilisées dans ce travail ont été acquises *in situ* ou sont dérivées des images satellite ou de la modélisation couplée hydrodynamique/biogéochimie. Les données *in situ* ont été analysées par fluorimétrie ou par HPLC (High Pressure Liquid Chromatography). Dans la suite de cette note, la variable « total chlorophylle *a* » (*Tchl a*) sera considérée pour les données acquises par HPLC. Nous conserverons l'appellation « *chl a* » quand il s'agit de données obtenues par fluorimétrie, par télédétection et par modélisation numérique.

3. DISTRIBUTION VERTICALE DE LA CHL A EN ZONE COTIERE

3.1 Site de référence de Calvi (station PHYTOCLY) et choix des périodes

A la station PHYTOCLY, caractérisée par une profondeur de 40 m, la biomasse phytoplanctonique commence à augmenter vers la mi-février. En surface, on observe successivement (i) une augmentation progressive de la *Tchl a* de mi-février à fin mars, (ii) une diminution rapide des concentrations en *Tchl a* en avril, dès que les couches de surface se réchauffent, et (iii) des biomasses estivales très basses dans toute la colonne d'eau. Le bloom de fin d'hiver est plurimodal, en réponse aux forçages liés au vent (Skirris et al. 2001 ; Goffart et al. 2002 ; Goffart et al. 2015).

Les profils verticaux hebdomadaires réalisés en 1999 présentent un exemple type de l'évolution saisonnière de la distribution verticale de la *Tchl a*. L'année 1999 a été retenue en raison de la fréquence

élevée des prélèvements en période de bloom et du nombre de données mobilisables. Les mesures *in situ* montrent que le bloom se développe dans toute la colonne d'eau et que la Tchl *a* est répartie de manière homogène, de la surface jusqu'au fond (Figure 2). Il en résulte que les concentrations en Tchl *a* intégrées sur la colonne d'eau et les concentrations de surface sont fortement corrélées (Figure 3 ; $R = 0,96$).

Figure 2. Evolution saisonnière de la Tchl *a* (mesures HPLC) à la station PHYTOCLY entre janvier et juin 1999. Mesures de surface (5-6 prélèvements par semaine) et distribution verticale de la surface au fond (40 m, profils hebdomadaires, 4-5 profondeurs) (adapté de Goffart et al. 2015).

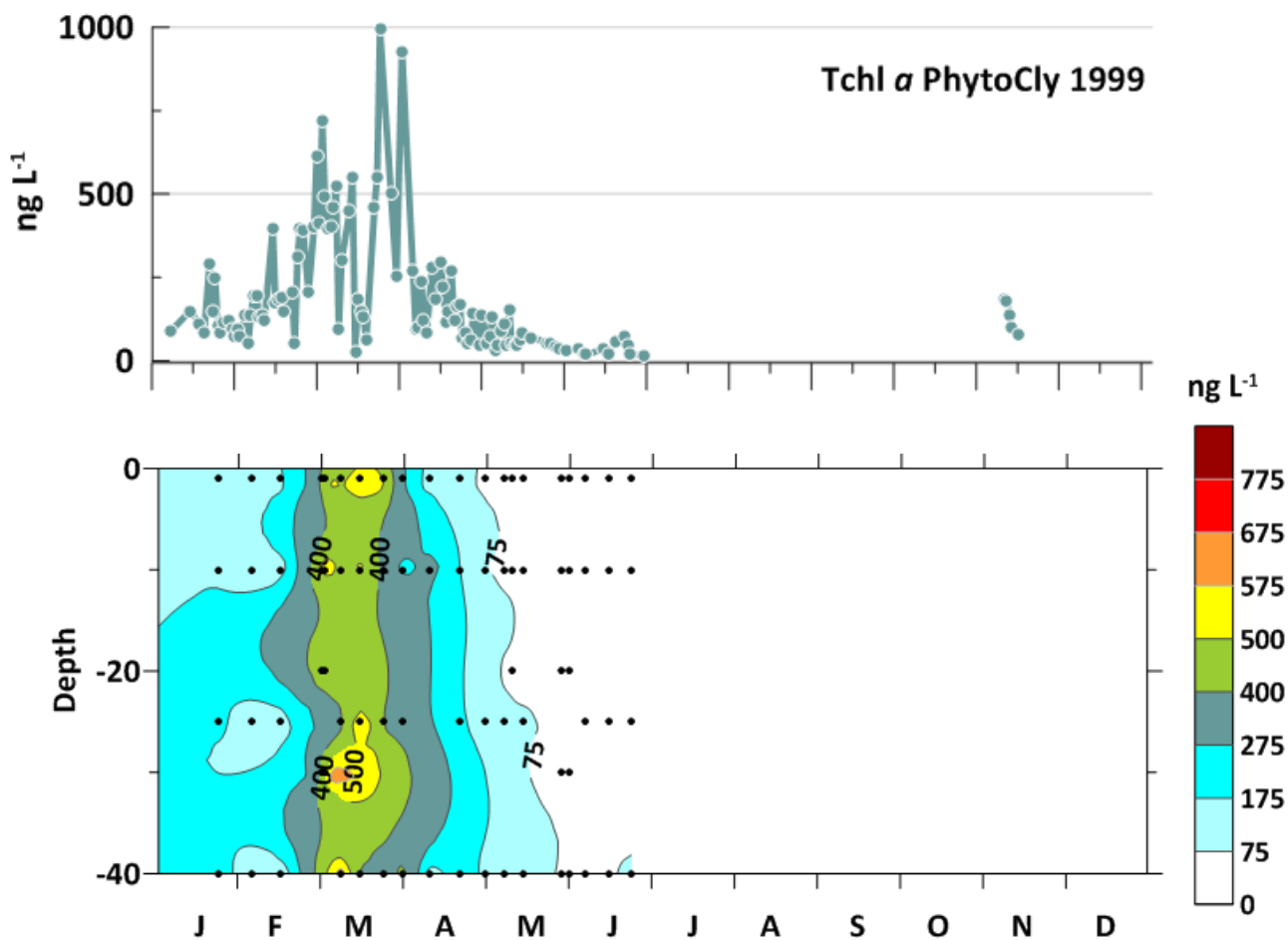
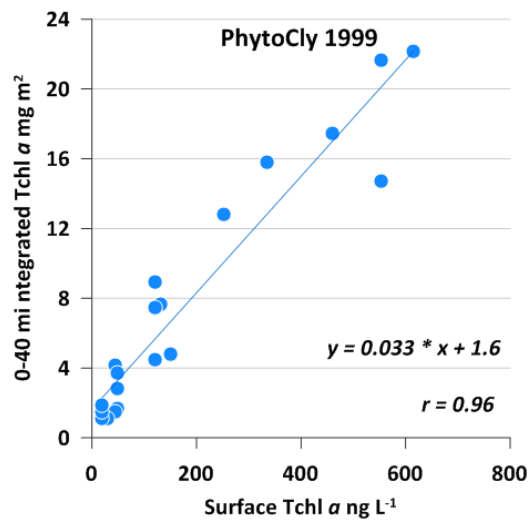


Figure 3. Relation entre la Tchl α intégrée sur la colonne d'eau (0-40 m) et la Tchl α mesurée en surface à



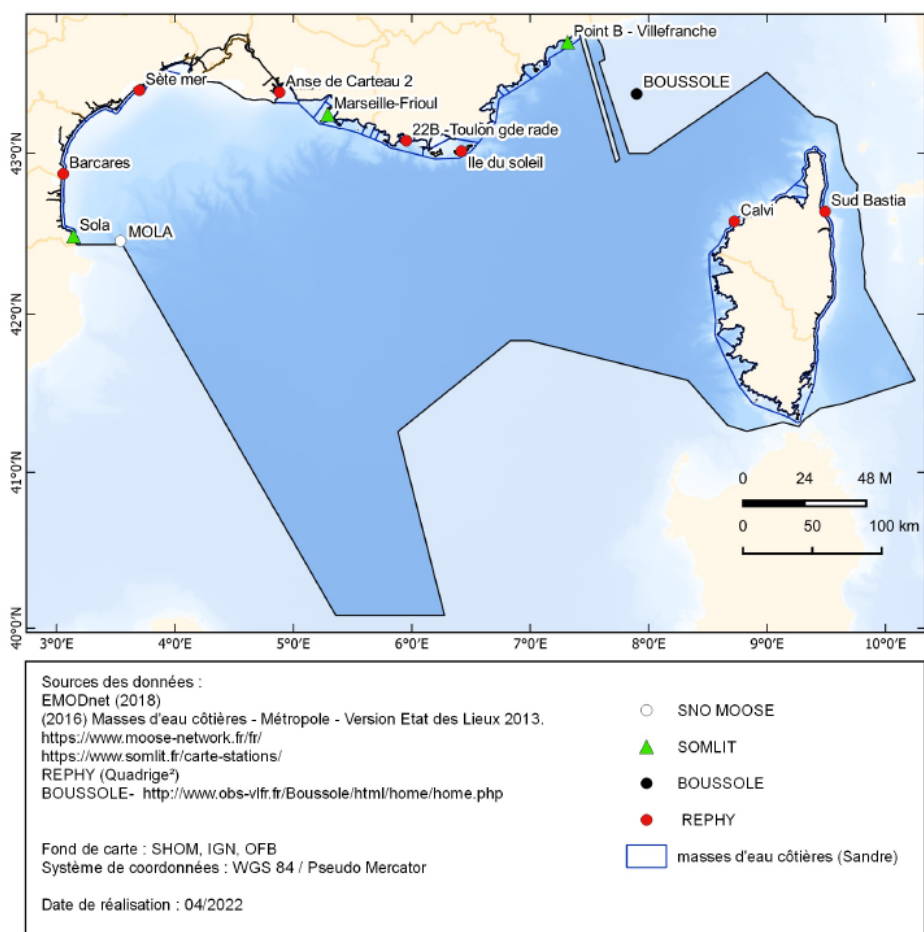
la station PHYTOCLY de la Baie de Calvi en 1999 (n = 20).

L'exemple présenté permet de considérer que la Tchl α de surface est un bon proxy de la distribution verticale de la biomasse phytoplanctonique à la station de référence PHYTOCLY.

3.2 Données côtières issues du chantier collecte DCSMM

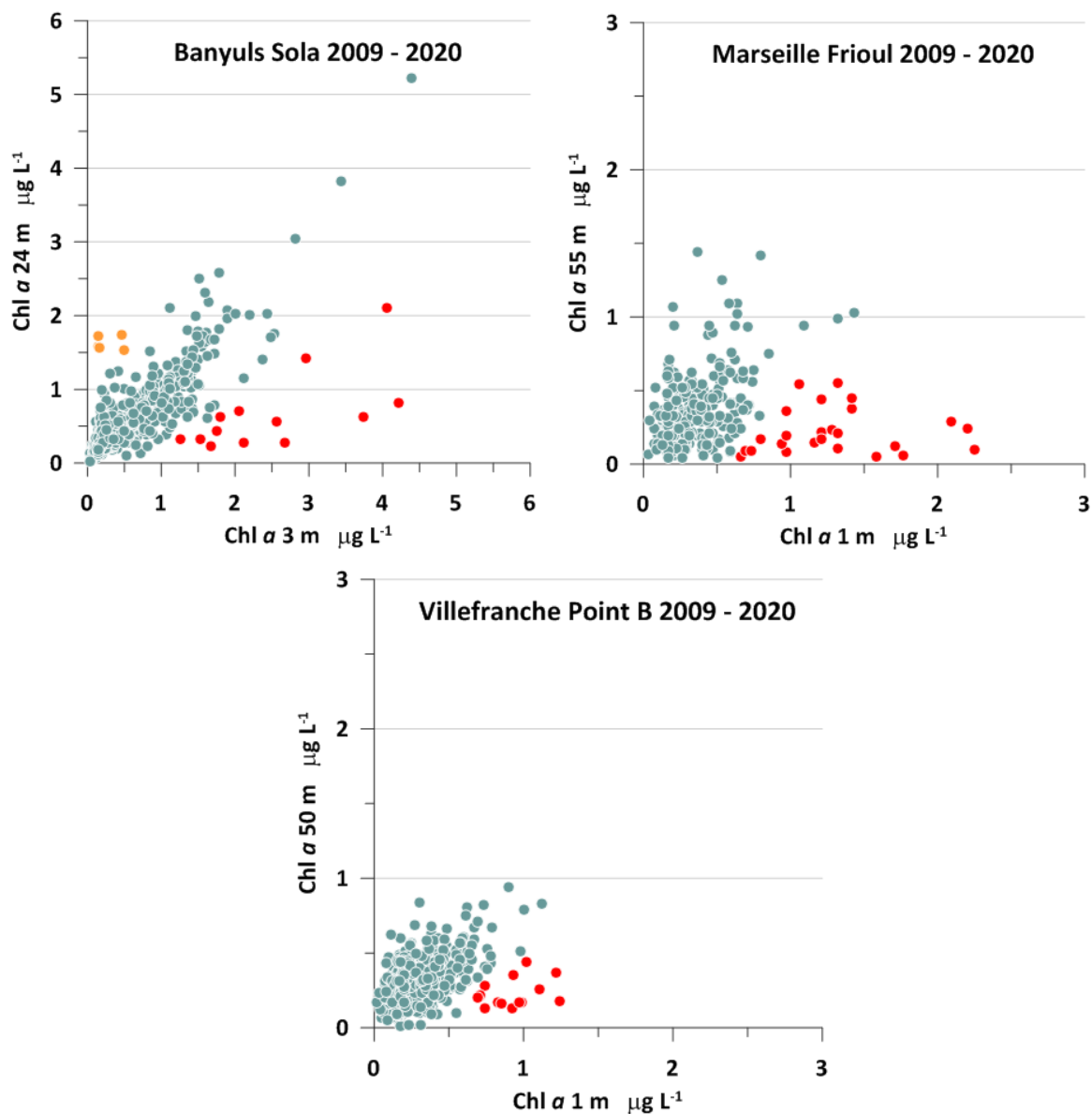
En zone côtière, il n'y a pas de profils verticaux de chl α mesurée par fluorimétrie ou par HPLC. Les données SOMLIT des stations Banyuls Sola, Marseille Frioul et du Point B de Villefranche (Figure 4) permettent néanmoins de comparer les données de chl α de (sub)surface et celles mesurées à proximité du fond ou dans la colonne d'eau. Banyuls Sola et Marseille Frioul sont des stations soumises à des apports continentaux d'intensité variable. Elles sont caractérisées par des profondeurs respectives de 27 et 60 m. Le Point B de Villefranche, d'une profondeur de 80 m, est situé en zone très urbanisée. Il est soumis à de fortes pressions anthropiques saisonnières.

Figure 4. Position des stations retenues pour le calcul de l'indicateur PH2 - Phytoplancton dans la sous-région marine Méditerranée Occidentale



Au cours de la période 2009 - 2020, les chl *a* de surface de chacune des 3 stations sont globalement du même ordre de grandeur que celles mesurées en profondeur (Figure 5). Dans seulement 2 à 9 % des cas, la réponse du phytoplancton aux pressions anthropiques et aux apports continentaux se traduit par des chl *a* de surface nettement plus élevées que celles mesurées en profondeur.

Figure 5. Relations entre les chl a ($\mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$) mesurées en profondeur et en (sub)surface entre 2009 et 2020 aux stations Banyuls Sola (562 mesures à 3 et 24 m), Marseille Frioul (284 mesures à 1 et 55 m) et Villefranche Point B (558 mesures à 3 et 50 m)⁵. Les points rouges identifient les chl a de surface qui se démarquent fortement des mesures en profondeur (Banyuls Sola : $n = 13$; Marseille Frioul : $n = 25$; Villefranche Point B : $n = 16$). Données SOMLIT⁶.



Les données *in situ* mises à disposition pour la DCSMM montrent, en milieu côtier, que la chl a de surface est un proxy qui :

- permet de caractériser les niveaux de biomasse observés en profondeur de manière satisfaisante,
- répond aux apports continentaux intermittents et aux pressions anthropiques saisonnières.

⁵ Pour mémo, $1\,000 \text{ ng chl } a \text{ L}^{-1} = 1 \mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1} = 1 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-3}$.

⁶ Producteur de données : Nicolas Savoye (Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers (OASU) - Université de Bordeaux).

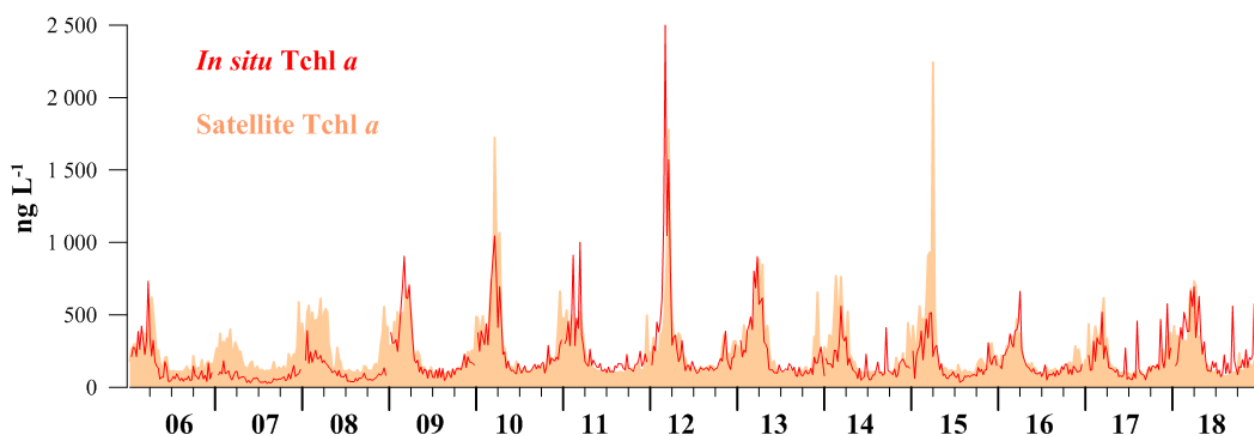
3.3 Comparaison des chl *a* mesurées *in situ* et dérivées des images satellite

Les produits dérivés des images satellite utilisés dans cette note résultent de l'application de l'algorithme OC5-Med, une version d'OC5 (Gohin 2002, 2014) dont le seuil de détection de la chl *a* a été abaissé à $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ ($= 100 \text{ ng L}^{-1}$). A Calvi, OC5-Med a été appliqué à la réflectance des capteurs MODIS et MERIS de 2003 à 2012 et MODIS, MERIS et VIIRS à partir de 2012. A la station Sud Bastia, OC5-Med a été appliqué à la réflectance du capteur MODIS de 2015 à 2018.

Les séries temporelles de Calvi montrent une excellente correspondance entre les mesures *in situ* des concentrations en Tchl *a* de surface (mesures HPLC hebdomadaires ou bihebdomadaires) et les produits OC5-Med⁷ (Figure 6). Les travaux réalisés par Gohin et al. (2020), menés entre autres sur les sites de Calvi, Marseille Frioul et Banyuls Sola, ont confirmé cette correspondance, aussi bien en termes de saisonnalité que d'intensité des efflorescences.

Dans les eaux qui font l'objet de suivis *in situ* mensuels, les images satellite permettent de capturer des événements importants - mais de courte durée - qui échappent à l'observation de terrain. C'est, par exemple, le cas du bloom de mars 2015 à la station Sud Bastia, où un événement intense n'a pas été détecté par l'unique prélèvement réalisé à cette période (Figure 7). Les mesures satellitaires de chl *a* sont donc complémentaires des mesures de terrain basse fréquence.

Figure 6. Séries temporelles de Tchl *a* mesurées *in situ* et par satellite à Calvi de 2006 à 2018 (moyennes hebdomadaires). Mesures *in situ* : mesures HPLC ; mesures satellitaires : traitement par OC5 des signaux (d'après Goffart et al. 2019).



Dans les eaux très oligotrophes comme celles de la Mer Tyrrhénienne, le seuil de détection relativement élevé de l'algorithme OC5-Med peut entraîner une surestimation des biomasses déduites depuis les observations satellite quand la couche de surface est pratiquement épuisée en phytoplancton et que les concentrations mesurées *in situ* sont inférieures au seuil d'OC5-Med ($100 \text{ ng chl } a \text{ L}^{-1}$). C'est, par exemple,

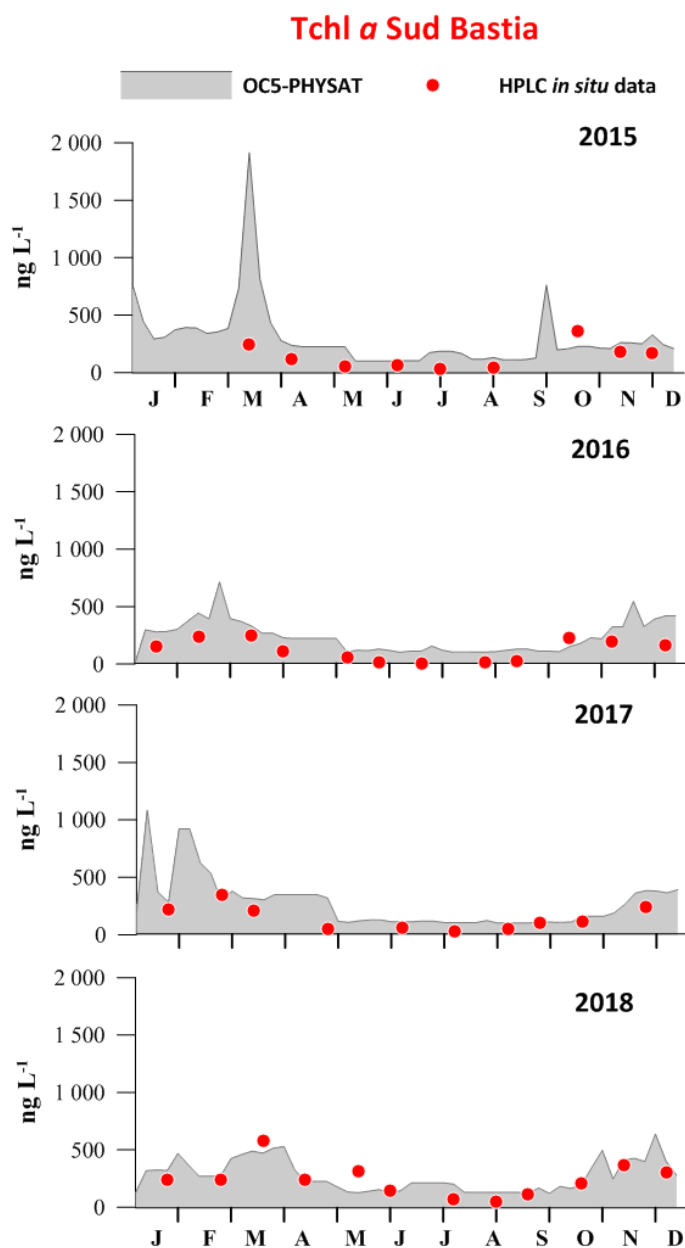
⁷ Producteur des données : Francis Gohin (IFREMER), juin 2019.

le cas du point Sud Bastia où les mesures HPLC réalisées lors des étés 2016 et 2017 montrent des concentrations estivales en Tchl $a < 60 \text{ ng L}^{-1}$ (Figure 7).

En zone côtière, une bonne correspondance est observée entre les données de chl a mesurées *in situ* et celles dérivées des images satellite. Cette correspondance concerne aussi bien la saisonnalité que l'intensité des efflorescences de surface. **Les mesures satellitaires de chl a s'avèrent donc adaptées à l'acquisition des données de surface en Méditerranée.** Elles sont complémentaires des mesures *in situ* couvertes par les suivis stationnels, en particulier lorsque ceux-ci sont discontinus ou réalisés à basse fréquence⁸. Les mesures satellitaires apportent aussi des informations sur les masses d'eau qui ne font pas l'objet de suivi stationnel. Néanmoins, le seuil de détection relativement élevé des mesures satellite ($100 \text{ ng chl } a \text{ L}^{-1}$ en Méditerranée) peut entraîner une surestimation des biomasses quand la couche de surface est pratiquement épuisée en phytoplancton et que les concentrations mesurées *in situ* sont inférieures au seuil d'OC5-Med. Les produits mis à disposition dans le chantier collecte DCSMM par Argans France ont permis d'abaisser les seuils à 50 ng L^{-1} . Il conviendra de mutualiser les produits pour les développements futurs de PHYSAT-Med »

⁸ Les données « basse fréquence » se réfèrent à des mesures réalisées à une échelle mensuelle, bimensuelle ou hebdomadaire. Les données « haute fréquence » se réfèrent à des données acquises à une échelle temporelle journalière ou horaire.

Figure 7. Séries temporelles de Tchl α mesurées *in situ* et par satellite au point Sud Bastia de 2015 à 2018. Mesures *in situ* : mesures HPLC, prélèvements mensuels ; mesures satellitaires : traitement par OC5 des signaux, moyennes hebdomadaires (d'après Coudray & Goffart en préparation).



4. DISTRIBUTION VERTICALE DE LA CHL A AU LARGE

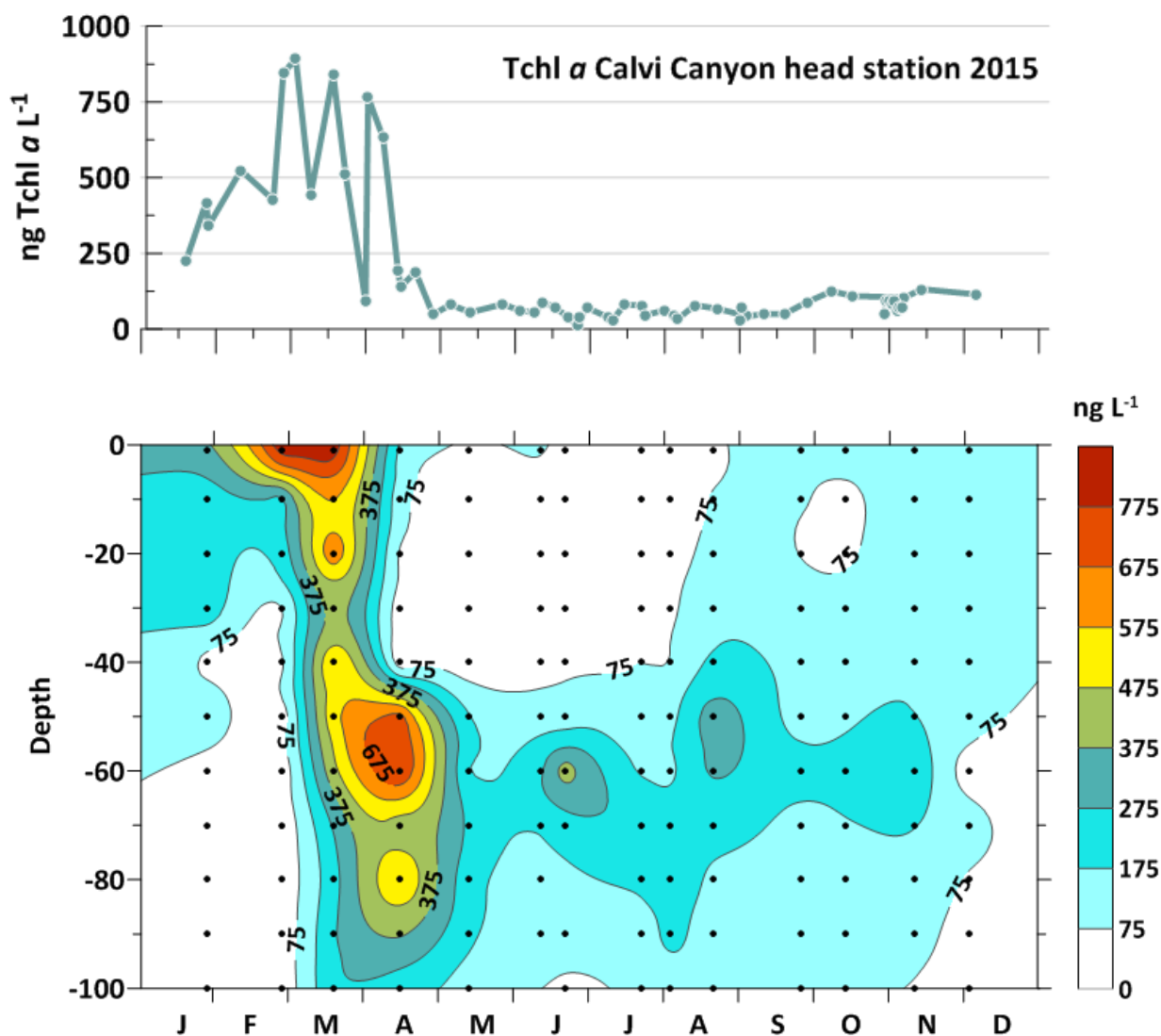
4.1 Site de référence au large de Calvi (station Tête de canyon)

La station Tête de canyon est située dans les eaux du Courant Ouest Corse au large de Calvi sur un fond de 155 m (Figure 1). L'évolution saisonnière de la biomasse phytoplanctonique y est contrôlée par les forçages hydrologiques et météorologiques. Les profils verticaux hebdomadaires réalisés en 2015 présentent un exemple type de l'évolution saisonnière de la distribution verticale de la Tchl α .

En surface et dans les 40 premiers mètres de la colonne d'eau, l'évolution temporelle de la biomasse phytoplanctonique présente les mêmes caractéristiques (phénologie, intensité et caractère plurimodal du bloom) que celles observées en milieu côtier, à la station PHYTOCLY (Figures 2 et 8). Les éléments marquants de la dynamique phytoplanctonique sont :

1. la distribution verticale relativement homogène de la Tchl a entre la surface et 40 m pendant toute l'année ;
2. la présence d'une « plume » de Tchl a qui s'enfonce dans la colonne d'eau en mars ;
3. l'épuisement en phytoplancton dans les 40 premiers mètres de la colonne d'eau dès la fin avril et pendant toute la période estivale ;
4. la redistribution progressive de la biomasse chlorophyllienne dans la colonne d'eau à la fin de l'été ;
5. le retour à une situation de bloom dès janvier.

Figure 8. Evolution temporelle de la Tchl a au point Tête de canyon au large de Calvi en 2015 (mesures HPLC). Mesures de sub-surface (suivi hebdomadaire, $n = 47$) et distribution verticale (prélèvements tous les 10 m entre 1 et 100 m ; profils verticaux \approx mensuels, $n = 14$). Données Anne Goffart.

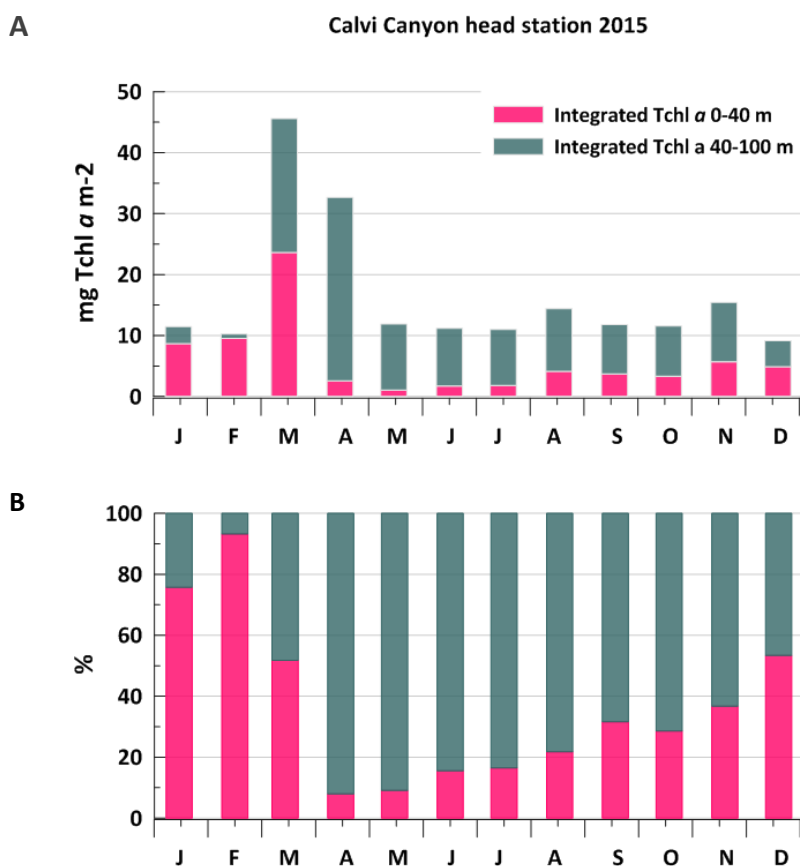


Entre 40 et 100 m :

1. En mars, la biomasse phytoplanctonique présente une extension verticale importante et la Tchl α est observée en quantité significative jusqu'à au moins 100 m.
2. D'avril à novembre, un maximum profond de Tchl α est observé entre 50 et 80 m de profondeur. Le DCM est situé à proximité de la nitracline, 20 à 40 m sous la thermocline.
3. En décembre, le mélange vertical hivernal de la colonne d'eau entraîne la disparition du DCM et une homogénéisation des concentrations dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau.

A la station Tête de canyon en 2015, 63 à 92 % de Tchl α intégrée⁹ entre la sub-surface et 100 m se trouvent sous 40 m d'avril à novembre (8 mois sur 12) (Figure 9).

Figure 9. Evolution temporelle de la Tchl α intégrée sur la colonne d'eau (1-40 m et 40-100 m) au point Tête de canyon au large de Calvi en 2015. A : mg Tchl α m⁻² ; B : concentrations relatives (en % du total). Données Anne Goffart.

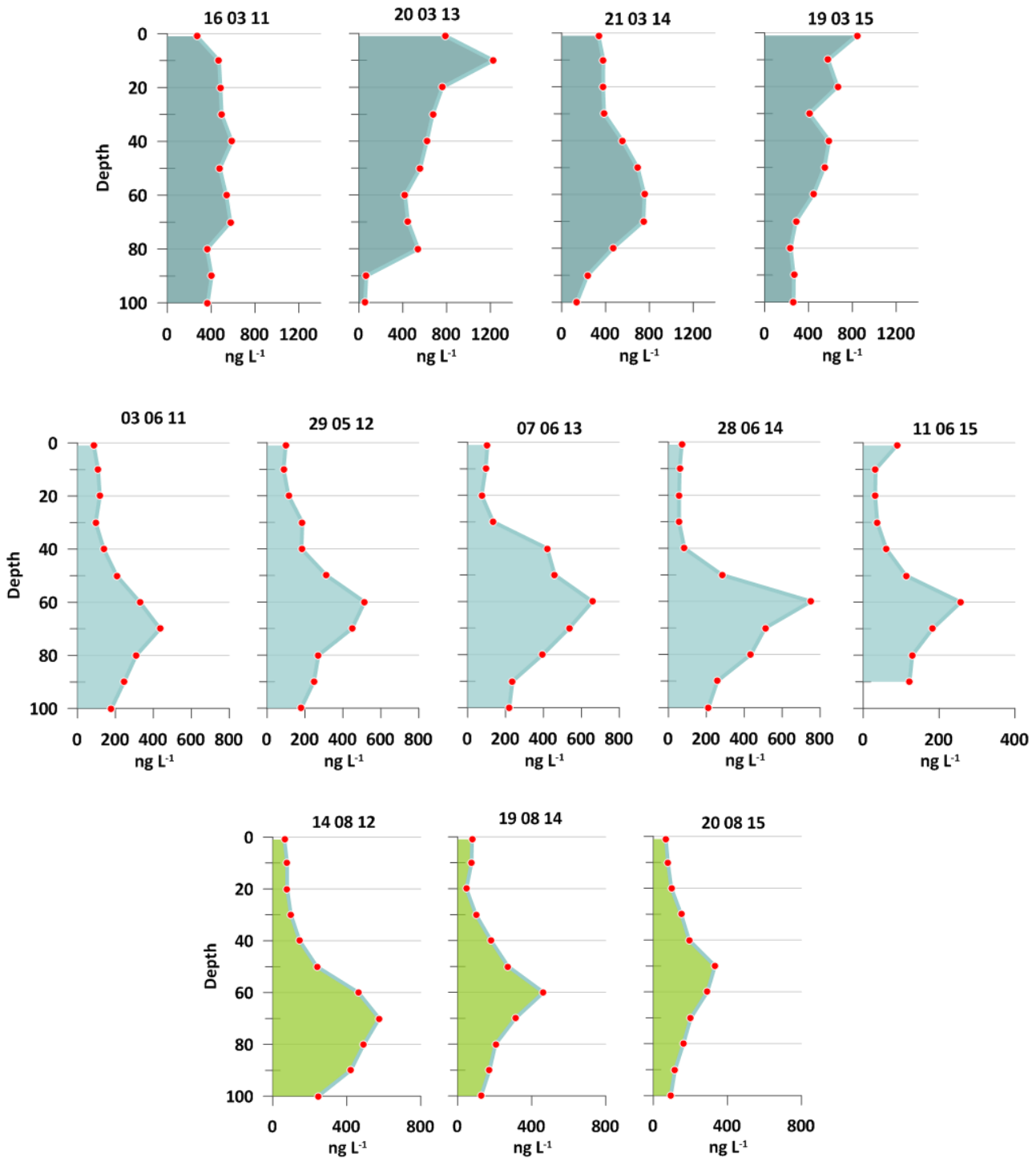


Malgré la variabilité interannuelle des conditions environnementales (*e.g.* vent, profondeur de la couche de mélange, ...), les patrons de distribution verticale de la Tchl α sont relativement stables au cours des saisons. Chaque année, (i) la distribution verticale « en plume » de la Tchl α est bien marquée en mars,

⁹ La méthode d'intégration utilisée dans cette note est la méthode du point milieu (<https://www.bibmath.net/dico/index.php?action=affiche&quoi=.i/intnum.html>).

pendant le bloom, et (ii) le DCM - qui s'installe à partir du mois d'avril quand la couche de surface se réchauffe et s'épuise en nutriments - est observé pendant toute la période stratifiée (Figure 10).

Figure 10. Variabilité interannuelle de la distribution verticale de la Tchl α (1-100 m) au point Tête de canyon au large de Calvi en mars (bleu foncé), mai - juin (bleu clair) et août (vert). Mesures HPLC, données Anne Goffart.



Au large, en raison de l'existence du DCM, la Tchl α de surface n'est pas représentative de la distribution verticale de la biomasse phytoplanctonique dans la colonne d'eau. Il est donc

nécessaire d'intégrer les données de biomasse sur la verticale au moins jusque 100 m pour ne pas sous-estimer les stocks phytoplanctoniques du large.

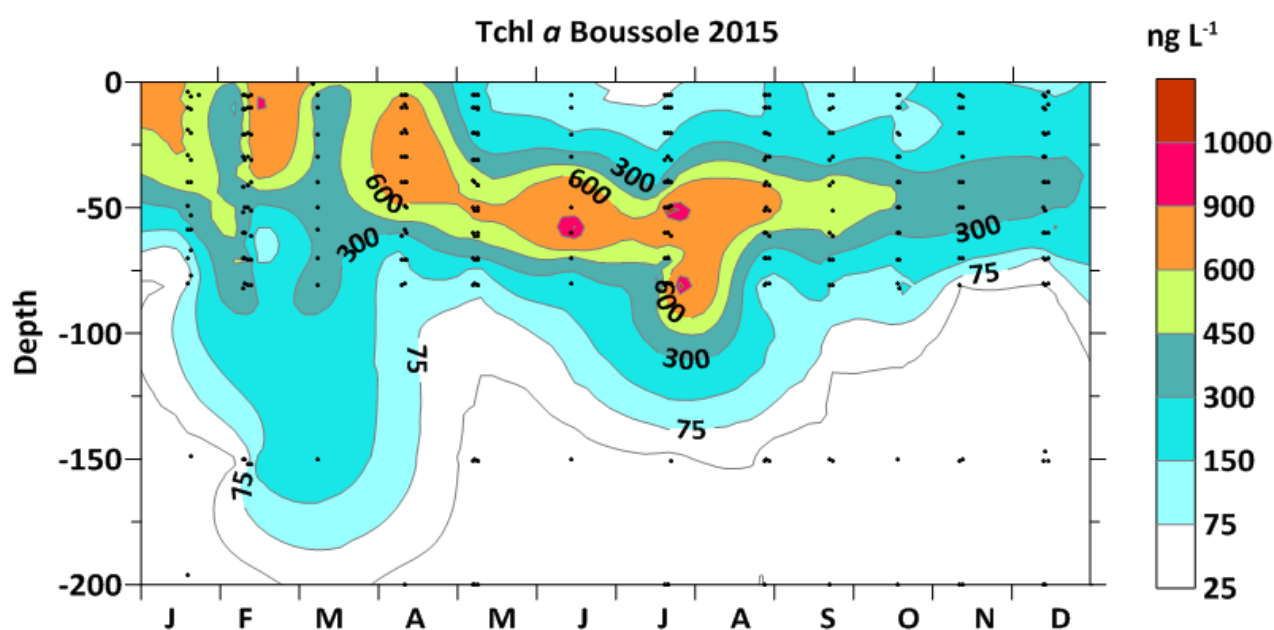
4.2 Données du large issues du chantier collecte DCSMM

Au large, des mesures *in situ* de distribution verticale de chlorophylle *a* mesurée par HPLC ou spectrofluorimétrie sont disponibles aux stations Boussole et Mola, respectivement (Figure 4).

4.2.1 Boussole

A la station Boussole, l'évolution de la distribution verticale de la biomasse phytoplanctonique est le résultat du contraste marqué entre les conditions hivernales de mélange vertical et les conditions estivales de stratification (*e.g.* Marty et al. 2002 ; Marty et al. 2008 ; Heimbürger et al. 2013 ; Margirier et al. 2020¹⁰). Tout au long de l'année, l'essentiel de la biomasse phytoplanctonique se situe dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau (Figure 11). Le bloom de fin d'hiver - début du printemps se déroule essentiellement entre la sub-surface et 30 m de profondeur. A partir d'avril, le DCM se forme et s'enfonce progressivement dans la colonne d'eau. De mai à décembre, il se situe entre 50 et 80 m. Il est associé à la nitracline, relativement peu profonde dans la région (Marty et al. 2002 ; Marty et al. 2008). Ce schéma de distribution se répète annuellement. Il est illustré pour l'année 2015 afin de permettre une comparaison avec les données acquises la même année au point Tête de canyon de Calvi.

Figure 11. Evolution temporelle de la distribution verticale (5-200 m) de la Tchl *a* (ng L⁻¹) à la station Boussole en 2015 (mesures HPLC). Données Boussole¹¹.



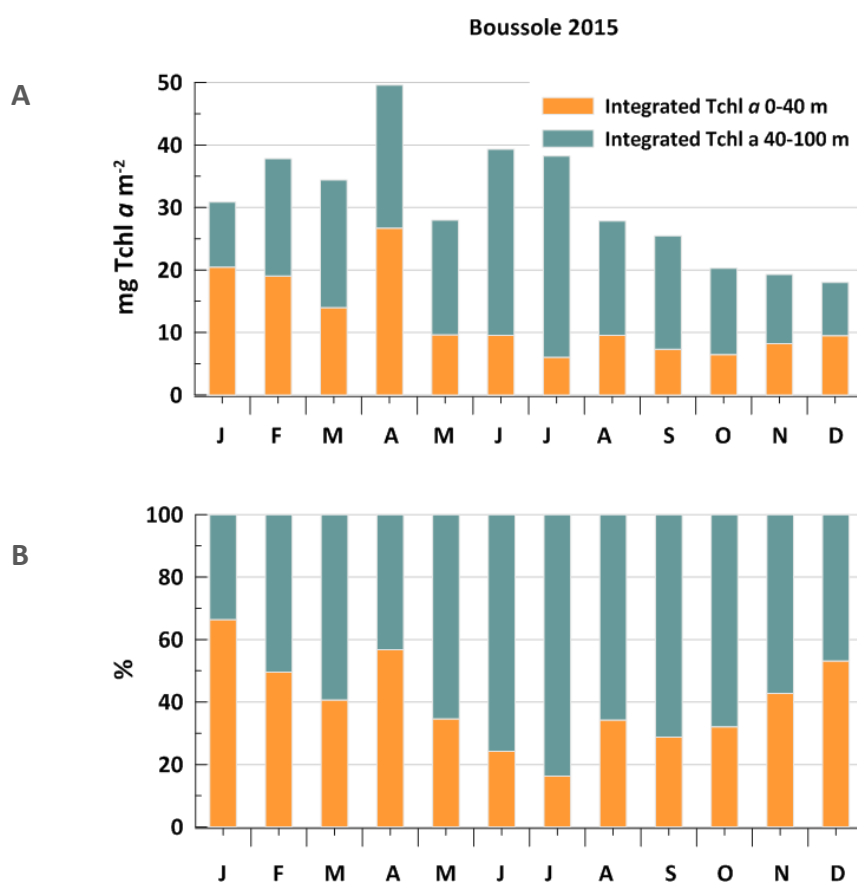
¹⁰ Ces références concernent le site Dyfamed, très proche de la station Boussole. Les 2 sites présentent des caractéristiques hydrologiques et trophiques comparables.

¹¹ Golbol et al. (2000) BOUSSOLE, <https://doi.org/10.18142/1>

En 2015, à la station Boussole :

- les concentrations en Tchl α intégrées entre la sub-surface et 100 m sont supérieures à celles observées au point Tête de canyon la même année ;
- 57 à 84 % de Tchl α intégrée sur la colonne d'eau (5-100 m) se trouvent sous 40 m en mars et de mai à novembre (Figure 12). Ce pourcentage est très proche de celui observé à Calvi (63 à 92 % d'avril à novembre).

Figure 12. Evolution temporelle de la Tchl α intégrée sur la colonne d'eau (5-40 m et 40-100 m) à la station Boussole en 2015. A : mg Tchl α m⁻² ; B : concentrations relatives (en % du total). Données du projet Boussole¹².



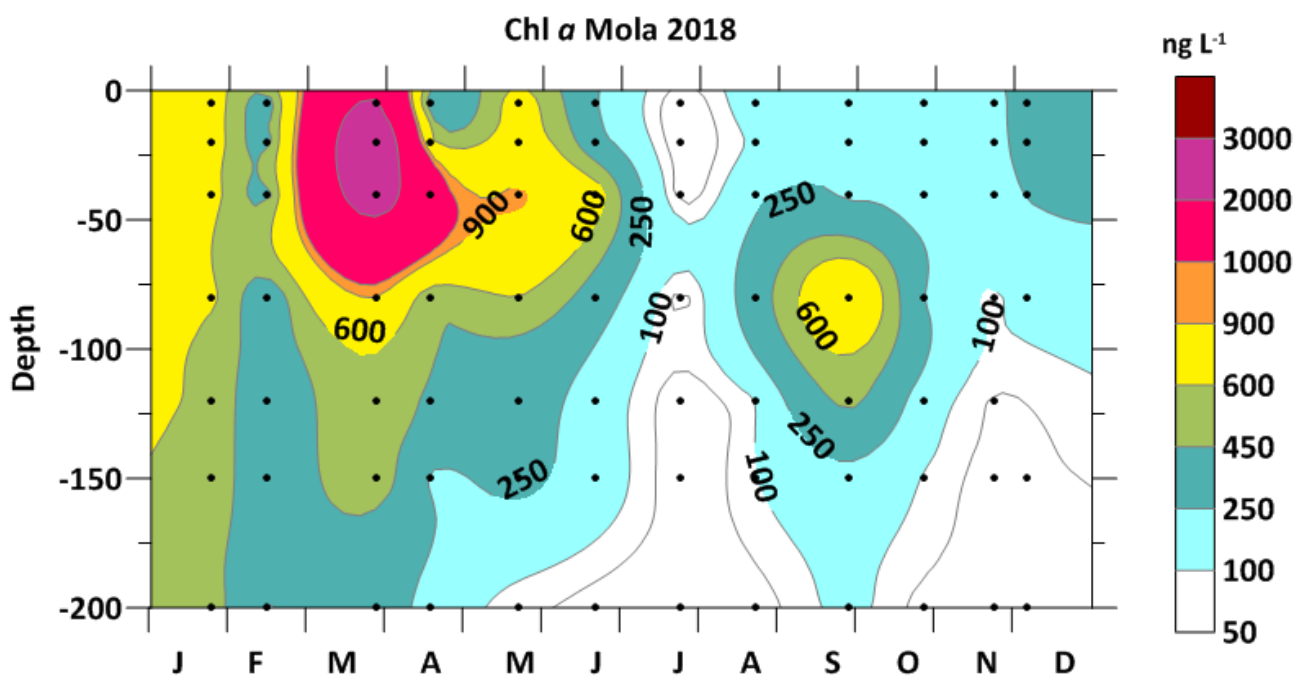
4.2.2 Mola

A Mola (Figure 4), l'influence du Rhône se traduit au printemps par des intrusions d'eau peu salée riche en nutriments (Gonzalès et al. 2019). Ces apports permettent le développement de concentrations en chl α élevées pour la Méditerranée (Figure 13). Tout au long de l'année, les maxima de concentration sont observés dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau et des concentrations en phytoplancton encore élevées sont détectées entre 100 et 200 m. Comme aux stations Tête de canyon - au large de Calvi - et Boussole - en Mer Ligure -, un maximum profond de chlorophylle se développe pendant la période

¹² Golbol et al. (2000) BOUSSOLE, <https://doi.org/10.18142/1>

stratifiée. Cependant, le petit nombre de mesures discrètes dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau (4 profondeurs de prélèvement¹³ contre 11 à la station Tête de Canyon) limite la résolution d'analyse et d'interprétation des caractéristiques du DCM. Il n'est pas exclu que, dans certains cas, le DCM échappe à l'observation en l'absence de mesures entre 40 et 80 m.

Figure 13. Evolution temporelle de la distribution verticale (5-200 m) de la chl a (ng L⁻¹) à la station Mola en 2018. Données issues du SNO MOOSE¹⁴.



Les 3 stations pour lesquelles des profils verticaux de chl a sont disponibles sont caractérisées par des conditions hydrologiques contrastées qui impactent la biomasse phytoplanctonique totale et la saisonnalité des efflorescences. Un maximum profond de chlorophylle est observé au niveau des 3 stations, ce qui confirme le caractère ubiquiste de ces structures dans la sous-région marine Méditerranée Occidentale. Aux stations Calvi, Tête de canyon et Boussole, où la résolution verticale des prélèvements est suffisante pour caractériser le DCM, 57 à 92 % de la Tchl a intégrée sur la colonne d'eau (0-100 m) se trouvent sous 40 m, et ceci pendant 8 mois par an. Compte tenu de ces spécificités, caractéristiques du phytoplancton méditerranéen (voir Goffart et al. 2022a), il est proposé d'intégrer les données de chlorophylle a sur la verticale par la méthode d'intégration du point milieu en considérant une profondeur d'intégration de 100 m.

¹³ A Mola, dans les 100 premiers mètres de la colonne d'eau, des prélèvements sont réalisés à 5, 20, 40 et 80 m. A la station Tête de Canyon, ils sont réalisés en subsurface puis tous les 10 m jusque 100 m.

¹⁴ Gueux (2010) MOOSE (MOLA), <https://doi.org/10.18142/234>

4.3 Comparaison des chl *a* mesurées *in situ* et des données du système de modèles MedBFM3¹⁵

Dans une perspective d'évaluation spatiale à plus large échelle, il pourrait être envisagé d'utiliser les données de chl *a* calculées par le modèle MedBFM3 du CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service ; Cossarini et al. 2021). En préambule, la concordance entre les données de distribution verticale de la chl *a* issues du modèle et celles mesurées *in situ* doit être vérifiée.

Une première approche consiste à comparer les chl *a* mensuelles intégrées sur les 100 premiers mètres de la colonne d'eau dérivées du modèle aux mesures *in situ* des stations Boussole et Mola. A la station Boussole (1 campagne par mois, 1 à 4 profils par campagne), l'exercice est réalisé pour 2 années contrastées : 2015 (Figure 11) et 2016, caractérisées respectivement par un bloom et un DCM d'intensité modérée, et un bloom et un DCM très prononcés (4,05 $\mu\text{g Tchl } a \text{ L}^{-1}$ à 30 m le 07/06/2016). Sur Mola (1 profil par mois), la comparaison est réalisée pour l'année 2018, caractérisée par des concentrations élevées en chl *a* (Figure 13).

A l'exception de juillet 2018 à Mola, les données mensuelles du modèle sous-estiment systématiquement les concentrations *in situ*, particulièrement lorsque celles-ci sont $> 20 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-2}$ (Figure 14). Sur Boussole, la sous-estimation atteint 80 à 85 % en janvier et février 2016. A Mola, elle est $> 95\%$ en mars 2018. Le modèle ne reproduit pas non plus la saisonnalité des mesures de terrain et semble lisser considérablement la variabilité saisonnière. Ces sous-estimations associées au système de modèle MedBFM3 sont connues des opérateurs du CMEMS¹⁶ qui les expliquent comme suit :

- Les valeurs maximales simulées par le modèle sont contraintes par les données de validation et de calibration. Dans le cas du modèle MedBFM3, les concentrations en chl *a* sont validées par les données issues des images satellite (produit OC TAC du CMEMS ; valeur maximale = $0,82 \mu\text{g L}^{-1}$) et du réseau de bouées instrumentées *in situ* BGC-Argo¹⁷ (valeur maximale $< 1 \mu\text{g L}^{-1}$) qui n'atteignent pas les maxima observés *in situ* en surface (e.g. $> 3 \mu\text{g L}^{-1}$ pour Mola ; Figure 13).
- Les valeurs issues de la modélisation sont estimées sur des zones géographiques de grande taille (voir Annexe). Bien que présentant des écarts quadratiques moyens¹⁸ tout à fait acceptables à large échelle ($0,18 \mu\text{g L}^{-1}$ pour les concentrations en Chl *a* en surface ; $0,10 \mu\text{g L}^{-1}$ au large), ce paramètre correspond à une performance moyenne du modèle à large échelle et n'est pas représentatif de ce qui peut être observé en mesure stationnelle.

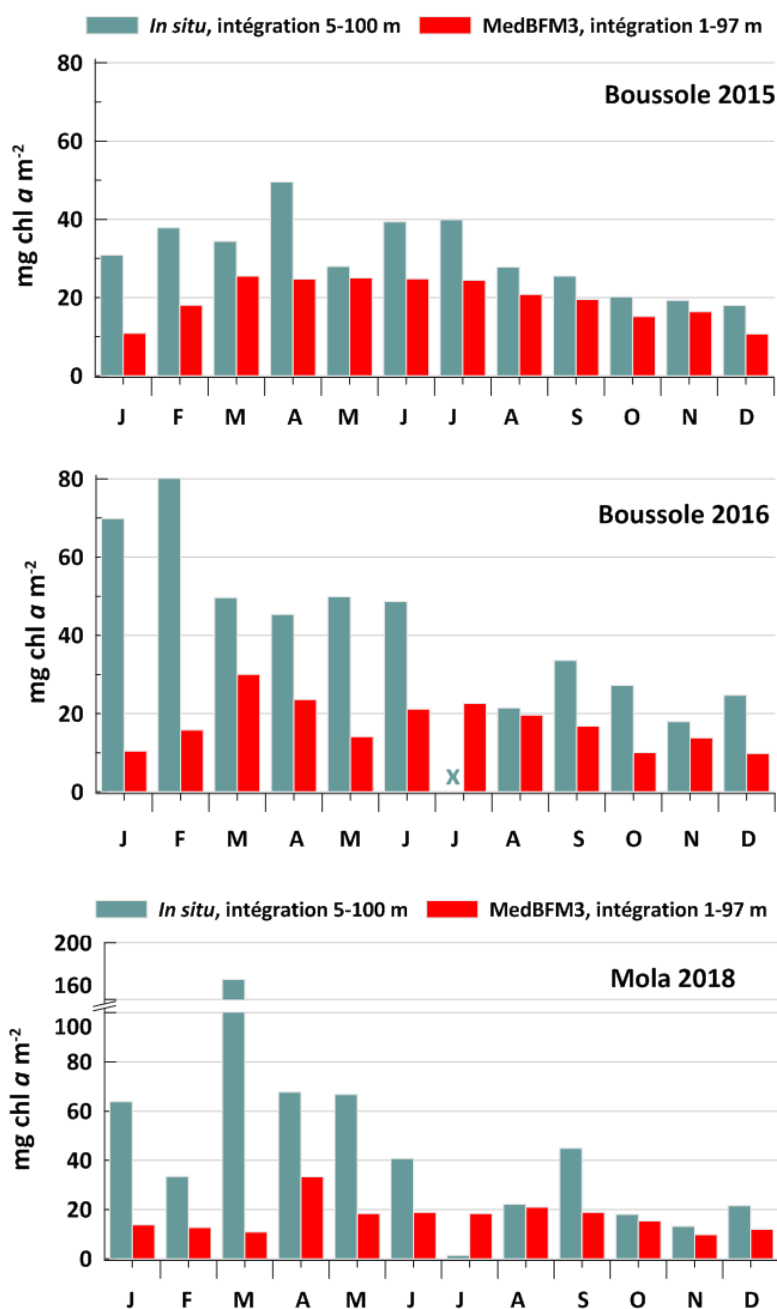
¹⁵ https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/MEDSEA_MULTIYEAR_BGC_006_008/INFORMATION

¹⁶ En juillet 2022, l'équipe HPEL DCSMM a fait remonter au 'desk-user' du CMEMS ces problèmes de sous-estimation et de lissage saisonnier afin d'obtenir des informations sur (i) les origines des différences observées et (ii) les améliorations à apporter pour une utilisation future dans le cadre de la DCSMM.

¹⁷ <https://biogeochemical-argo.org/>

¹⁸ L'écart quadratique moyen est une mesure fréquemment utilisée pour rendre compte d'écarts entre la valeur mesurée (*in situ*) et la valeur simulée par le modèle. Plus elle est proche de 0 et meilleure est l'estimation numérique issue du modèle.

Figure 14. Distributions temporelles des chl *a* intégrées mesurées *in situ* (données Boussole 2015 et 2016 ; données Mola 2018) et issues du système de modèles MedBFM3 ; moyennes mensuelles. Pas de données *in situ* sur Boussole en juillet 2016 (x).



Aujourd'hui, et aux échelles spatiales (stationnelles) et temporelles considérées (comparaison d'un profil *in situ* mensuel *versus* une moyenne mensuelle calculée par le modèle), le modèle MedBFM3 ne reproduit ni la saisonnalité ni les niveaux de concentrations en chl *a* intégrées entre la subsurface et 100 m aux stations Boussole et Mola. Des améliorations des estimations issues du modèle sont nécessaires pour pouvoir envisager son utilisation dans le futur, en particulier dans la partie ouest de la sous-région marine. Une nouvelle version du modèle (MedBFM4) est en cours

d'élaboration (production finale et diffusion à l'automne 2024) et s'appuiera sur une formulation des composantes couleurs de l'eau et biogéochimie d'après Alvarez et al. (2022). Des projets de recherche nationaux (e.g. ANR PPR RIOMAR¹⁹) s'intéressant au développement de jumeaux numériques de l'océan devraient permettre de disposer d'estimations issues de la modélisation sur certains sites ateliers méditerranéens. L'analyse de leur pertinence et de leur valeur ajoutée pour répondre aux besoins du programme thématique Habitats pélagiques de la DCSMM sera envisagée.

5. PROPOSITIONS POUR LES TRAVAUX D'ÉVALUATION DCSMM

Lors du cycle 2 de l'évaluation du Bon Etat Ecologique de la DCSMM, Duflos et al. (2018) ont utilisé des métriques différentes pour l'indicateur PH2 à la côte (concentrations moyennes mensuelles en chl *a* de surface) et au large (P₉₀ des concentrations mensuelles en chl *a* de surface). Nous proposons d'intégrer les spécificités du phytoplancton méditerranéen et d'uniformiser les métriques comme suit (**Tableau 1**) :

- Masses d'eau côtière : moyennes mensuelles des concentrations en chl *a* de surface ($\mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$) ;
- Large : moyennes mensuelles des concentrations en chl *a* intégrées sur la verticale (0-100m) par la méthode du point milieu divisées par la profondeur d'intégration ($\mu\text{g chl } a \text{ L}^{-1}$).

En zone côtière, nous proposons d'utiliser les données stationnelles de surface et les produits dérivés des images satellite sur toutes les masses d'eau côtières. Ce choix est justifié par la bonne correspondance et par la complémentarité de deux sources de données. Au large, en l'absence de correspondance entre les données *in situ* et celles du modèle MedBFM3M, nous nous limiterons aux suivis stationnels disponibles. Par ailleurs, les travaux en Méditerranée bénéficieront des avancées réalisées sur les biorégions (Vilain et al. 2022) en Manche-Atlantique.

¹⁹ RIOMAR, Observer et anticiper l'évolution des zones côtières françaises sous influence des fleuves au 21e siècle, PIA3-PPR "Un océan de solutions". Porteur : C. Rabouille (LSCE)

Tableau 1. Synthèse des données utilisées et des métriques proposées pour le calcul du PH2 phytoplancton en SRM MO (PH2 MEDIT - Phytoplancton). *Les propositions d'adaptation des méthodes de calcul pour l'indicateur PH2 - Phytoplancton sont présentées dans la note de Goberville et al. (2022). Les propositions de métriques et les données utilisées dans les autres SRM sont présentées dans la feuille de route Habitats pélagiques DCSMM (avril 2022).*

PH2 DUFLOS phytoplancton (Duflos et al. 2018)		
Données utilisées	A la côte : données stationnelles de surface (REPHY) et séries temporelles ne présentant pas plus de 4 mois consécutifs sans données Au large : produits dérivés des images satellite	
Métriques	A la côte : moyenne mensuelle des concentrations en chl a ($\mu\text{g L}^{-1}$) Au large : P_{90} des concentrations en chl a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	
PH2 MEDIT - Phytoplancton (Goffart et al. 2022a, cette note)		Evolution & justifications des choix proposés
Données utilisées	A la côte : données stationnelles de surface (REPHY, SOMLIT) et produits dérivés des images satellite (en tenant compte des incertitudes associées dans les eaux oligotrophes) Au large : données intégrées sur 100 m de profondeur issues des suivis stationnels et divisées par la profondeur d'intégration (MOLA et BOUSSOLE)	Mobilisation de données complémentaires à la côte (SOMLIT, satellite) Prise en compte des spécificités du fonctionnement de l'écosystème planctonique méditerranéen et de la variabilité spatio-temporelle du phytoplancton
Métriques	Côte et large : moyenne mensuelle des concentrations en chlorophylle a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Utilisation d'une métrique unique de la côte au large

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les éléments développés ci-dessus ont permis de :

- proposer des métriques adaptées aux particularités des communautés phytoplanctoniques méditerranéennes des zones côtières et du large. Une attention particulière a été portée à l'uniformisation de ces métriques.
- mettre en évidence un usage croisé et complémentaire des données de chl *a* mesurées *in situ* et dérivées des images satellite dans les eaux côtières. Pour le large, il est actuellement indispensable de disposer de données intégrées sur la profondeur pour reproduire de manière pertinente le fonctionnement de l'écosystème phytoplanctonique méditerranéen. Les travaux développés par le CMEMS et dans le cadre de projets nationaux (*e.g.* PPR Océan et Climat RIOMAR) permettront d'analyser la pertinence/plus-value d'autres modèles pour disposer de données au large.
- confirmer le caractère ubiquiste des DCMs dans la sous-région marine Méditerranée Occidentale, et mis en évidence le besoin d'acquérir de la donnée et des connaissances pour affiner la description de leurs principales caractéristiques (profondeur, intensité, saisonnalité), en relation avec les contraintes environnementales qui contrôlent leur développement. Ces premiers travaux sur les données disponibles en sous-région marine Méditerranée Occidentale mettent en évidence la nécessité de discuter de la surveillance des Habitats pélagiques avec les acteurs de façades afin d'envisager de manière concertée, une programmation et priorisation des actions dans les années à venir.

7. LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

- Figure 1. Position de Calvi en Mer Ligure (A) et des stations PHYTOCLY et Tête de canyon (B) (d'après Goffart et al. 2015). 6
- Figure 2. Evolution saisonnière de la Tchl *a* (mesures HPLC) à la station PHYTOCLY entre janvier et juin 1999. Mesures de surface (5-6 prélèvements par semaine) et distribution verticale de la surface au fond (40 m, profils hebdomadaires, 4-5 profondeurs) (adapté de Goffart et al. 2015). 7
- Figure 3. Relation entre la Tchl *a* intégrée sur la colonne d'eau (0-40 m) et la Tchl *a* mesurée en surface à la station PHYTOCLY de la Baie de Calvi en 1999 (n = 20)..... 8
- Figure 4. Position des stations retenues pour le calcul de l'indicateur PH2 - Phytoplancton dans la sous-région marine Méditerranée Occidentale 9
- Figure 5. Relations entre les chl *a* (mg chl *a* L⁻¹) mesurées en profondeur et en (sub)surface entre 2009 et 2020 aux stations Banyuls Sola (562 mesures à 3 et 24 m), Marseille Frioul (284 mesures à 1 et 55 m) et Villefranche Point B (558 mesures à 3 et 50 m). Les points rouges identifient les chl *a* de surface qui se démarquent fortement des mesures en profondeur (Banyuls Sola : n = 13 ; Marseille Frioul : n = 25 ; Villefranche Point B : n = 16). Données Somlit. 10
- Figure 6. Séries temporelles de Tchl *a* mesurées *in situ* et par satellite à Calvi de 2006 à 2018 (moyennes hebdomadaires). Mesures *in situ* : mesures HPLC ; mesures satellitaires : traitement par OC5 des signaux (d'après Goffart et al. 2019). 11

Figure 7. Séries temporelles de Tchl <i>a</i> mesurées <i>in situ</i> et par satellite au point Sud Bastia de 2015 à 2018. Mesures <i>in situ</i> : mesures HPLC, prélèvements mensuels ; mesures satellitaires : traitement par OC5 des signaux, moyennes hebdomadaires (d'après Coudray & Goffart en préparation).....	13
Figure 8. Evolution temporelle de la Tchl <i>a</i> au point Tête de canyon au large de Calvi en 2015 (mesures HPLC). Mesures de sub-surface (suivi hebdomadaire, n = 47) et distribution verticale (prélèvements tous les 10 m entre 1 et 100 m ; profils verticaux ≈ mensuels, n = 14). Données Anne Goffart.	14
Figure 9. Evolution temporelle de la Tchl <i>a</i> intégrée sur la colonne d'eau (1-40 m et 40-100 m) au point Tête de canyon au large de Calvi en 2015. A : mg Tchl <i>a</i> m ⁻² ; B : concentrations relatives (en % du total). Données Anne Goffart.	15
Figure 10. Variabilité interannuelle de la distribution verticale de la Tchl <i>a</i> (1-100 m) au point Tête de canyon au large de Calvi en mars (bleu foncé), mai - juin (bleu clair) et août (vert). Mesures HPLC, données Anne Goffart.	16
Figure 11. Evolution temporelle de la distribution verticale (5-200 m) de la Tchl <i>a</i> (ng L ⁻¹) à la station Boussole en 2015 (mesures HPLC). Données Boussole.	17
Figure 12. Evolution temporelle de la Tchl <i>a</i> intégrée sur la colonne d'eau (5-40 m et 40-100 m) à la station Boussole en 2015. A : mg Tchl <i>a</i> m ⁻² ; B : concentrations relatives (en % du total). Données du projet Boussole.....	18
Figure 13. Evolution temporelle de la distribution verticale (5-200 m) de la chl <i>a</i> (ng L ⁻¹) à la station Mola en 2018. Données issues du SNO MOOSE.	19
Figure 14. Distributions temporelles des chl <i>a</i> intégrées mesurées <i>in situ</i> (données Boussole 2015 et 2016 ; données Mola 2018) et issues du système de modèles MedBFM3 ; moyennes mensuelles. Pas de données <i>in situ</i> sur Boussole en juillet 2016 (x).	21
Tableau 1. Synthèse des données utilisées et des métriques proposées pour le calcul du PH2 phytoplancton en SRM MO (PH2 Médit - Phytoplancton). <i>Les propositions d'adaptation des méthodes de calcul pour l'indicateur PH2 - Phytoplancton sont présentées dans la note de Goberville et al. (2022). Les propositions de métriques et les données utilisées dans les autres SRM sont présentées dans la feuille de route Habitats pélagiques DCSMM (avril 2022).</i>	22

8. REFERENCES

- Alvarez E, Lazzari P, Cossarini G (2022) Phytoplankton diversity emerging from chromatic adaptation and competition for light. *Progress in Oceanography*, 204, 102789
- Bedford J, Ostle C, Johns DG, Budria A, McQuatters-Gollop A (2020) The influence of temporal scale selection on pelagic habitat biodiversity indicators. *Ecological Indicators* 114
- Cornec M (2020) La dynamique des maxima profonds de phytoplancton : une approche globale avec les flotteurs BGC-Argo. Thèse de doctorat, Géophysique, Sorbonne Université, 321pp
- Cossarini G, Feudale L, Teruzzi A, Bolzon G, Coidessa G, Solidoro C, Di Biagio V, Amadio C, Lazzari P, Brosich A, Salon S (2021) High-Resolution Reanalysis of the Mediterranean Sea Biogeochemistry (1999–2019). *Frontiers in Marine Science* 8
- Duflos M, Wacquet G, Aubert A, Rombouts I, Mialet B, Devreker D, Lefebvre A, Artigas LF (2018). Évaluation de l'état écologique des habitats pélagiques en France métropolitaine. Rapport scientifique pour l'évaluation 2018 au titre du descripteur 1 de la DCSMM, 333 pp.
- Goberville E., Vincent D. Vilain M., Goffart A. (2022) Opérationnalisation de l'indicateur PH2-Phytoplancton au titre des habitats pélagiques : étude de cas en Méditerranée Occidentale. En préparation

- Goffart A, Hecq J-H, Legendre L (2002) Changes in the development of the winter–spring phytoplankton bloom in the Bay of Calvi (NW Mediterranean) over the last two decades : a response to changing climate? *Marine Ecology Progress Series* 236 : 45-60
- Goffart A, Hecq J-H, Legendre L (2015) Drivers of the winter–spring phytoplankton bloom in a pristine NW Mediterranean site, the Bay of Calvi (Corsica) : A long-term study (1979–2011). *Progress in Oceanography* 137 : 121-139
- Goffart A, Lejeune P, Gohin F, Coudray S (2019) Response of phytoplankton to climate-driven changes in a Mediterranean coastal area : results from 4 decades of observations (1979 - 2018). Poster presented at IMBeR Future Oceans2 - Open Science Conference, Brest, France
- Goffart A, Vincent D, Vilain M, Goberville E (2022a) Adaptation méthodologique de l'indicateur PH2 - Phytoplankton en Méditerranée : 1^{ère} partie. Synthèse des spécificités de la Méditerranée : paramètres abiotiques et biomasse phytoplanctonique totale (chl *a*). Note réalisée dans le cadre de la convention OFB.21.01750 (DCSMM - Habitats pélagiques) entre l'OFB et l'Université de Liège, 32pp
- Goffart A & Coudray S (in preparation) Downscaling of PHYSAT-Med to monitor temporal variation of dominant phytoplankton groups in the Mediterranean Sea : application to the oligotrophic Corsican coastal waters.
- Gohin F, Druon JN, Lampert L (2002) A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by Seadas in coastal waters. *Int. J. Remote Sens.* 23 : 1639-1661
- Gohin F, Bryère P, Perrot L (2014) A new procedure for interpolating satellite-derived suspended particulate matters within the Previmer context. *Mercator Newsletter – Quartely Newsletter* 49 : 25-28
- Gohin F, Bryère P, Lefebvre A, Sauriau P-G, Savoye N, Vantrepotte V, Bozec Y, Cariou T, Conan P, Coudray S, Courtay G, Françoise S, Goffart A, Hernández Fariñas T, Lemoine M, Piraud A, Raimbault P, Rétho M (2020) Satellite and In Situ Monitoring of Chl-a, Turbidity, and Total Suspended Matter in Coastal Waters: Experience of the Year 2017 along the French Coasts. *Journal of Marine Science and Engineering* 8
- Gonzalez M-L, Blain S, Obernosterer I (2019) Seasonal freshening of NW Mediterranean surface water impacts microbial heterotrophic activity and dissolved organic matter. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 230
- Margirier F, Testor P, Heslop E, Mallil K, Bosse A, Houpert L, Mortier L, Bouin MN, Coppola L, D'Ortenzio F, Durrieu de Madron X, Mourre B, Prieur L, Raimbault P, Taillandier V (2020) Abrupt warming and salinification of intermediate waters interplays with decline of deep convection in the Northwestern Mediterranean Sea. *Sci Rep* 10 : 20923
- Marty J-C, Chiavérini J, Pizay M-D, Avril B (2002) Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991-1999). *Deep-Sea Research* 49 : 1965-1985
- Marty J-C, Garcia N, Raimbault P (2008) Phytoplankton dynamics and primary production under late summer conditions in the NW Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers* 55:1131-1149
- Shephard S, Greenstreet SPR, Piet GJ, Rindorf A, Dickey-Collas M (2015) Surveillance indicators and their use in implementation of the Marine Strategy Framework Directive. *ICES Journal of Marine Science* 72:2269-2277
- Skiris N, Elkalay K, Goffart A, Frangoulis C, Hecq J-H (2001) One-dimensional modelling of the plankton ecosystem of the northwestern Corsican coastal area in relation to meteorological constraints. *Journal of Marine Systems* 27 : 337-362

Vilain M, Goberville E, Vincent D, Goffart A. (2022) Approche de biorégionalisation pour alimenter les échelles d'évaluation du programme thématique « Habitats pélagiques » de la DCSMM ». Note scientifique et technique Sorbonne Université / MNHN - BOREA / OFB / Univ. Liège, 25 pp.

9. ANNEXE

Subdivision géographique du système de modèle MedBFM3 pour la validation et qualification des simulations numériques. Les lignes grises correspondent aux isobathes de 200 m. Les points rouges correspondent aux principaux exutoires des fleuves (e.g. 19 : Aude, 4 : Rhône pour la façade méditerranéenne française).

