

Elaboration d'une méthode de surveillance de la composition phytoplanctonique à grande échelle

Rapport final

Action 3 du projet « Indicateur de composition phytoplanctonique »

Anne GOFFART, Université de Liège

Février 2019

Document réalisé dans le cadre de la
Convention de subvention ONEMA – Université de Liège relative au
projet « Indicateur de composition phytoplanctonique »

- **AUTEUR**

Anne GOFFART, Université de Liège, A.Goffart@uliege.be

- **CONTRIBUTEUR**

Sylvain COUDRAY, IFREMER de La Seyne-sur-Mer, Sylvain.Coudray@ifremer.fr

- **CORRESPONDANT**

Agence française pour la biodiversité : Maïa AKOPIAN, Maia.Akopian@afbiodiversite.fr

Droits d'usage : [par ex. accès libre ou accès réservé à XXX]

Niveau géographique : national

Couverture géographique : Méditerranée

Niveau de lecture : Professionnels et experts

Elaboration d'une méthode de surveillance de la composition phytoplanctonique à grande échelle, Anne Goffart

- **RESUME**

Au cours de la dernière décennie, les mesures spectrales effectuées par les capteurs spatiaux de couleur de l'océan ont été corrélées à la présence des grands groupes phytoplanctoniques identifiés par leur composition pigmentaire. La méthodologie, appelée PHYSAT, permet de détecter les grands groupes phytoplanctoniques depuis l'espace et d'élaborer des cartes de distribution à grande échelle (Alvain et al. 2008). Récemment, l'algorithme PHYSAT a été adapté à la Méditerranée dans son ensemble (PHYSAT-MED; Navarro et al. 2014, Navarro et al. 2017).

La mise en commun des expertises de Sylvain Coudray (IFREMER, traitement des signaux satellitaire) et d'Anne Goffart (Université de Liège, dynamique du phytoplancton méditerranéen, données pigmentaires, chémotaxonomie) a permis d'adapter l'outil PHYSAT-MED à une échelle locale (downscaling), utile au suivi et à la caractérisation du phytoplancton des eaux côtières de la Méditerranée française. L'adaptation de l'outil PHYSAT-MED a conduit au développement du prototype OC5-PHYSAT.

OC5-PHYSAT a été testé et validé sur un premier jeu de données pigmentaires acquis au cours d'une année de référence (2015) en milieu oligotrophe (Baie de Calvi, Corse). L'algorithme a permis de reproduire de manière très satisfaisante les variations hebdomadaires de la biomasse phytoplanctonique totale (Tchl a) et des groupes phytoplanctoniques dominants (prymnesiophycées, cyanobactéries, diatomées et autres eucaryotes), identifiés par leur signature pigmentaire. Au terme de cette étude, il est nécessaire de compléter le travail engagé en validant OC5-PHYSAT sur des jeux de données pluriannuels et dans des masses d'eau côtières caractérisées par des propriétés optiques contrastées (turbidité, matière en suspension non algale, ...). Des cartes synthétiques de distribution des groupes phytoplanctoniques dominants pourront alors être fournies pour les masses d'eau DCE et les zones DCSMM.

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)**

Phytoplancton, pigments, OC5-PHYSAT, DCE, DCSMM, downscaling, validation *in situ*, Méditerranée, Corse, Baie de Calvi.

Elaboration d'une méthode de surveillance de la composition phytoplanctonique à grande échelle, Anne Goffart

SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

Au cours de la dernière décennie, les mesures spectrales effectuées par les capteurs spatiaux de couleur de l'océan ont été corrélées à la présence des grands groupes phytoplanctoniques identifiés par leur composition pigmentaire (Alvain et al. 2008, Demarcq et al. 2012). La méthodologie développée, appelée PHYSAT, permet de détecter les grands groupes phytoplanctoniques et d'élaborer des cartes de distribution à l'échelle du globe. Récemment, l'algorithme PHYSAT a été adapté à la Méditerranée (PHYSAT-MED; Navarro et al. 2014, Navarro et al. 2017). Les cartes produites fournissent la distribution mensuelle des principaux groupes phytoplanctoniques de surface à l'échelle du bassin méditerranéen.

Cette étude constitue un des trois volets du projet « Indicateur de composition phytoplanctonique » financé par une convention ONEMA - Université de Liège. Elle a pour objectif de tester l'outil PHYSAT-MED à une échelle plus locale (downscaling), et en particulier dans les eaux côtières de la Méditerranée française. Les travaux ont été menés à bien grâce à la mise en commun des expertises de Sylvain Coudray (IFREMER, traitement des signaux satellitaire) et d'Anne Goffart (Université de Liège, dynamique du phytoplancton méditerranéen, données pigmentaires, chémotaxonomie). Les travaux développés par Sylvain Coudray s'inscrivent dans le cadre de la convention MEDSAT - ONEMA de l'IFREMER et font l'objet d'un rapport séparé (Coudray 2019).

Le site de Calvi (côte occidentale Corse) a été retenu pour tester l'outil PHYSAT-MED en downscaling sur les eaux côtières en raison (i) de l'existence de données pigmentaires acquises à haute fréquence, (ii) du caractère oligotrophe de la baie, peu chargée en matière en suspension non algale, et (iii) de l'expertise qui permet d'y caractériser la dynamique des communautés phytoplanctoniques. L'année 2015 a été choisie comme année de référence en raison de l'existence de données pigmentaires acquises à haute fréquence (mesures hebdomadaires ou bi-hebdomadaires). L'adaptation de l'outil PHYSAT-MED aux eaux côtières de la Méditerranée française a conduit au développement du prototype OC5-PHYSAT. Dans la phase de test et de validation de l'algorithme, le traitement des images (25 images par jour pendant un an) prend beaucoup de temps puisque tous les critères d'identification doivent être affinés manuellement, image par image.

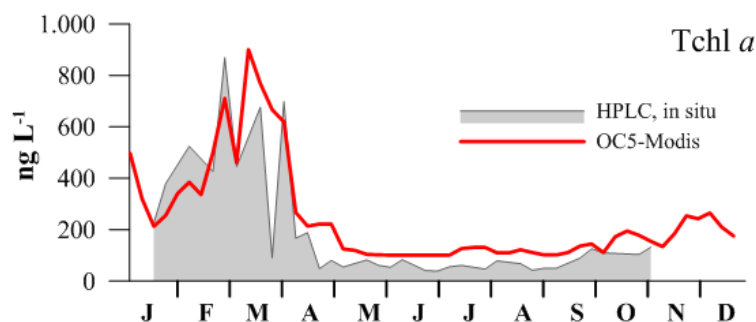
Les concentrations en chlorophylle *a* totale (Tchl *a*) mesurées *in situ* et par imagerie satellitaire montrent une très bonne correspondance (Figure SO.1). En particulier, l'aspect plurimodal du bloom de fin d'hiver, typique de la Baie de Calvi, est bien reproduit par l'imagerie satellitaire. En période stratifiée (mai - septembre), les concentrations *in situ* en Tchl *a* moyennées sur 7 jours sont de l'ordre de 50 ng Tchl *a* L⁻¹. Elles sont inférieures au seuil de détection du capteur MODIS, égal à 100 ng Tchl *a* L⁻¹.

Une très bonne correspondance est obtenue entre l'évolution saisonnière de la biomasse des deux groupes phytoplanctoniques principaux, les prymnesiophycées et les cyanobactéries, identifiés par leur pigment traceur respectif et détectés par les mesures *in situ* et le prototype OC5-PHYSAT (Figure SO.2). Les variations de pente croissante et décroissante observées en mars et avril sont bien reproduites par l'algorithme. Le caractère plurimodal des pics hivernaux de diatomées est mis en évidence par OC5-PHYSAT. Un décalage temporel d'environ une semaine est observé entre les pics détectés par OCS-PHYSAT et les mesures *in situ*, mais la variation de pente décroissante observée en mars et avril est bien reproduite par l'algorithme. Ce léger décalage peut s'expliquer par les différence d'échelle spatio-temporelle des deux méthodes (satellite : 25 mesures journalières dans

un carré de 25 km², données *in situ* : une mesure par semaine) et par l'absence de certaines données satellite en raison de la couverture nuageuse, particulièrement en hiver. En période de bloom (janvier - mars), les variations des autres eucaryotes sont reproduites de manière satisfaisante. De mai à octobre, la somme des concentrations en prasinoxanthine, alloxanthine, péridinine et butanoyloxyfucoxanthine est inférieure au seuil de 10 ng L⁻¹, nécessaire pour obtenir un signal satellitaire significatif.

Compte-tenu des incertitudes liées au traitement des données satellitaires (couverture nuageuse, échantillons rejetés par l'algorithme, calcul des concentrations en pigments, ...) et des différences d'échelles spatiale et temporelle propres aux deux méthodes (1 point par semaine pour les mesures *in situ*, 25 pixels par jour dans une grille de 25 km² pour les mesures satellitaires), les résultats obtenus montrent que l'algorithme OC5-PHYSAT est suffisamment performant pour quantifier les variations hebdomadaires de la Tchl *a* et des quatre groupes fonctionnels dominants (prymnesiophycées, cyanobactéries, diatomées et autres eucaryotes), identifiés par leur signature pigmentaire. Les concentrations en Tchl *a* et en pigments calculées par le prototype OC5-PHYSAT sur une grille 5 km x 5 km correspondent bien en amplitude et en saisonnalité à celles mesurées *in situ* pour l'année de référence 2015.

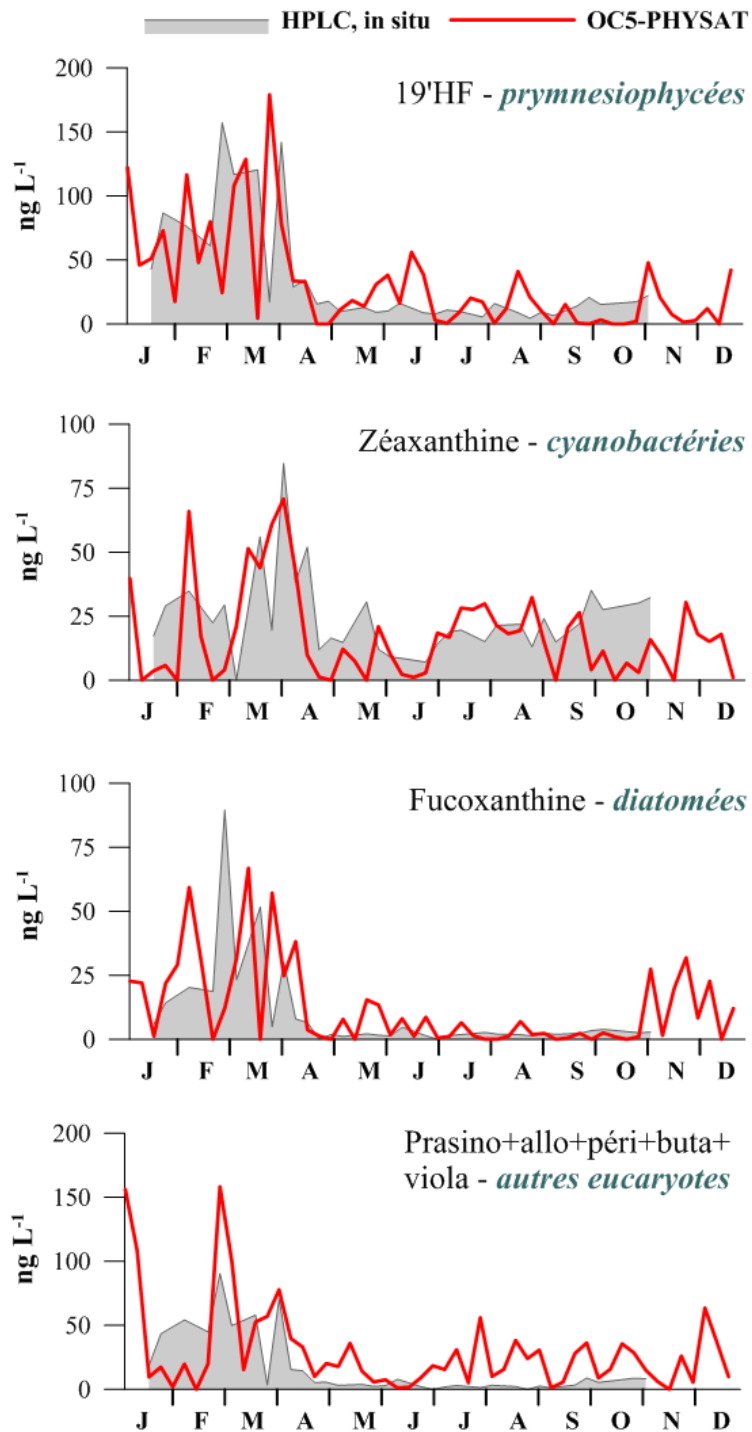
Figure SO.1. Variations annuelles (janvier - décembre 2015, moyennes sur 7 jours) des concentrations en Tchl *a* mesurées *in situ* en Baie de Calvi, Corse (point Tête de canyon, subsurface, mesures HPLC) et par satellite (OC5-MODIS). Données satellitaires acquises quotidiennement sur 25 points dans une grille de 25 km² incluant le point Tête de canyon. Données satellitaires traitées par Sylvain Coudray.



En raison de la complexité optique des eaux côtières méditerranéennes (diversité des assemblages phytoplanctoniques, variabilité de la charge en matière en suspension non algale, turbidité variable, ...), il est nécessaire de poursuivre l'étude et de confirmer la robustesse de l'algorithme OC5-PHYSAT par les actions suivantes :

- reproduire l'évolution interannuelle des communautés phytoplanctoniques du site atelier de Calvi où des séries de données pigmentaires acquises à haute fréquence existent (1 site, résolution de 1 km, 4 années : 2012 - 2015, données AQUA-MODIS);
- calibrer OC5-PHYSAT sur le site atelier de Calvi avec les données du nouveau capteur OLCI, plus performant que MODIS, tout en assurant la continuité des mesures pour l'avenir (1 site, une année, données SENTINEL3/OLCI, acquisition de nouvelles données en période de bloom);
- aborder la variabilité spatiale et adapter l'algorithme OC5-PHYSAT à d'autres zones côtières méditerranéennes où des données pigmentaires seront prochainement disponibles (élargissement à trois sites SOMLIT, une année, données SENTINEL2/SENTINEL3/OLCI).

Figure SO.2. Variations annuelles (janvier - décembre 2015, moyennes sur 7 jours) des concentrations en pigments mesurées *in situ* au point Tête de canyon (subsurface, mesures HPLC) et par satellite (OC5-MODIS) dans un carré de 5 x 5 km incluant le point Tête de canyon. Données satellitaires acquises quotidiennement avec une résolution de 1 km et traitées par Sylvain Coudray. 19'HF : hexanoyloxyfucoxanthine, prasino : prasinoxanthine, allo : alloxanthine, péri : périodine, buta : butanoyloxyfucoxanthine, viola : violaxanthine.



Ces actions ont été soumises à l'AFB par Anne Goffart (AMI 2018, expertise en dynamique des communautés phytoplanctoniques, séries de données pigmentaires) et Sylvain Coudray (AQUAREF 2018, traitement des signaux satellitaires, cartographie).

Pour chaque zone ou paysage de l'emprise DCSMM, il est nécessaire d'avoir un site calibré manuellement avec au minimum deux ans de séries pigmentaires acquises à haute fréquence. Dans un futur proche, le travail sur les autres zones pourra probablement être automatisé grâce à des logiciels intelligents (*e.g.* réseaux de neurones). En région PACA et en Occitanie, les données pigmentaires existent depuis peu grâce à l'effort d'échantillonnage et d'analyse réalisé dans le cadre des points de surveillance SOMLIT. Par contre, aucun point SOMLIT n'existe le long des mille kilomètres de côtes du littoral corse. Une attention particulière devra donc être portée à l'acquisition de nouvelles données pigmentaires mesurées par HPLC au niveau des deux sites où des moyens à la mer en place permettent des prélèvements fréquents : le point Sud Bastia en Mer Tyrrhénienne et le point Calvi en Mer Ligure.

- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Loisel, H., 2008. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles* 22 (3), GB3001.
- Coudray, S., 2019. Application croisée de méthodes analytiques et innovantes pour déterminer la composition phytoplanctonique à large échelle. Signature pigmentaire du phytoplancton et imagerie satellitaire. Rapport final de convention IFREMER et ONEMA, France.
- Demarcq, H., Reygondeau, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., 2012. Monitoring marine phytoplankton seasonality from space. *Remote Sensing of Environment* 117, 211-222.
- Navarro, G., Almaraz, P., Caballero, I., Vázquez, Á., Huertas, I.E., 2017. Reproduction of Spatio-Temporal Patterns of Major Mediterranean Phytoplankton Groups from Remote Sensing OC-CCI Data. *Frontiers in Marine Science* 4.
- Navarro, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., Huertas, I.E., 2014. Identification of dominant phytoplankton functional types in the Mediterranean Sea based on a regionalized remote sensing approach. *Remote Sensing of Environment* 152, 557-575.

- **SOMMAIRE**

Résumé	3
Mots clés.....	3
Synthèse pour l'action opérationnelle	4
1. Introduction	9
2. Contexte et objectifs	9
3. Adaptation de l'outil PHYSAT-MED aux besoins de l'étude : présentation succincte du prototype OC5-PHYSAT.....	11
4. Test de OC5-PHYSAT : choix du site atelier, description et traitements des données.....	11
5. Principales caractéristiques des communautés phytoplanctoniques de la Baie de Calvi	13
6. Evolution saisonnière des concentrations en Tchl <i>a</i> en 2015 : comparaison des mesures <i>in situ</i> et OC5-MODIS	14
7. Evolution saisonnière des pigments phytoplanctoniques en 2015 : comparaison des mesures <i>in situ</i> et des valeurs issues du traitement par OC5-PHYSAT	15
8. Suite à donner aux travaux	17
9. Vers un calcul de l'indice de composition phytoplanctonique ICPP Méditerranée soutenu par l'imagerie satellitaire	18
10. Conclusions	18
11. Bibliographie	18
12. Tables des illustrations	19
13. Remerciements	20

1. INTRODUCTION

La DCE exige que l'évaluation de l'état écologique des masses d'eau littorales passe par des indicateurs biologiques, dont certains ciblent spécifiquement le phytoplancton, avec trois paramètres : la biomasse, l'abondance et la composition. Un premier travail soutenu par l'ONEMA et réalisé par l'Université de Liège a montré que les pigments diagnostiques mesurés par HPLC constituent de bons outils pour détecter les changements de composition phytoplanctonique en réponse aux pressions rencontrées dans les eaux côtières corses (Goffart et Andral 2014). Les recherches ont abouti au développement d'un nouvel indice de composition phytoplanctonique (IC Médit), basé sur la signature pigmentaire des communautés phytoplanctoniques et adapté aux spécificités des eaux côtières corses.

Le projet « Indicateur de composition phytoplanctonique » vise à conforter le travail sur des sites ayant des pressions diverses et pour diverses catégories de masses d'eau, afin d'en faire un véritable indicateur DCE. Le projet comprend trois actions :

1. La première action vise à consolider le travail de définition de l'indice composition IC Médit sur des sites méditerranéens récemment échantillonnés et caractérisés par des pressions diverses. Cette action, qui se base sur une approche chémotaxonomique, a abouti à la définition de l'indice ICPP Médit (Goffart 2019a).
2. Le deuxième point a objectif d'adapter et d'appliquer les indices de composition développés en Méditerranée (ICPP Médit) et en Manche-Atlantique (ICBC) aux trois façades métropolitaines dans le but de comparer les résultats obtenus en terme de classification des sites évalués par les deux méthodes (Goffart 2019b). Cette partie du travail est réalisée en collaboration avec Luis Lampert (IFREMER de Brest).
3. Le travail comporte également une action pour la validation d'une méthode de **détermination de la composition phytoplanctonique des eaux côtières depuis l'espace**. Cette action est réalisée en collaboration avec Sylvain Coudray (IFREMER de La Seyne-sur-Mer). Dans le cadre de cette collaboration, les travaux menés par Anne Goffart font l'objet de ce rapport. Ceux développés par Sylvain Coudray s'inscrivent dans le cadre de la convention MEDSAT - ONEMA de l'IFREMER. Ils font l'objet d'un rapport séparé (Coudray 2019).

2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Au cours de la dernière décennie, les mesures spectrales effectuées par les capteurs spatiaux de couleur de l'océan ont été corrélées à la présence des grands groupes phytoplanctoniques identifiés par leur composition pigmentaire (Alvain et al. 2008, Demarcq et al. 2012). La méthodologie développée, appelée PHYSAT, permet de détecter les grands groupes phytoplanctoniques et d'élaborer des cartes de distribution à l'échelle du globe. Récemment, l'algorithme PHYSAT a été adapté à la Méditerranée (PHYSAT-MED; Navarro et al. 2014, Navarro et al. 2017). Les cartes produites fournissent la distribution mensuelle des principaux groupes phytoplanctoniques de surface à l'échelle du bassin méditerranéen (Figure 1). A l'heure actuelle, la méthode n'est pas validée en eaux côtières.

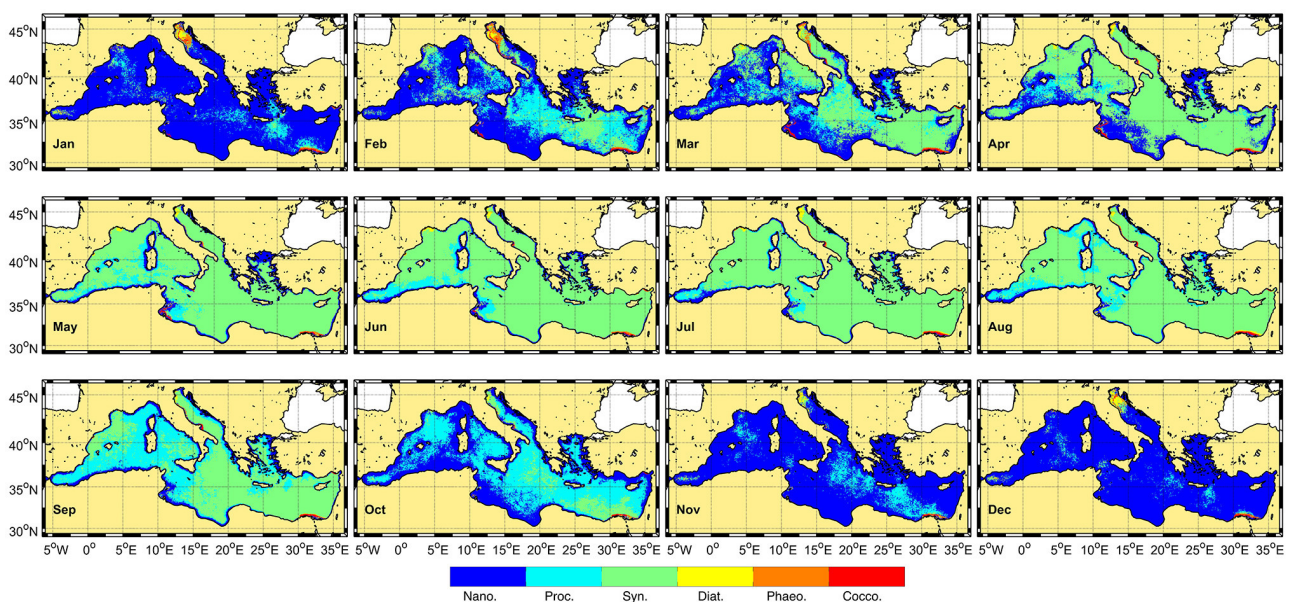
Cette étude a pour objectif de tester l'outil PHYSAT-MED à une échelle plus locale (**downscaling**), et en particulier dans les eaux côtières de la Méditerranée française. La réalisation du travail nécessite la **mise en commun d'expertise** en dynamique des communautés phytoplanctoniques, en traitement

des signaux satellitaires et en cartographie. L'étude menée conjointement par Anne Goffart (AG) et Sylvain Coudray (SC) vise à :

1. maîtriser l'utilisation des outils PHYSAT et PHYSAT-MED dans les versions publiées (SC);
2. sur base d'une connaissance approfondie de la dynamique des communautés phytoplanctoniques du bassin méditerranéen, sélectionner les groupes phytoplanctoniques à inclure dans l'étude et fournir les données pigmentaires permettant de valider les algorithmes dans la zone étudiée (AG);
3. adapter au mieux l'outil PHYSAT-MED aux besoins de l'étude et aux caractéristiques régionales (choix des échelles spatio-temporelles, sélection des groupes phytoplanctoniques) et le valider en fonction des données pigmentaires disponibles (SC);
4. cartographier la distribution spatiale et temporelle des groupes phytoplanctoniques retenus (SC);
5. identifier les manquements et les actions futures à entreprendre pour réaliser des cartes satellite de distribution des grands groupes phytoplanctoniques et calculer l'indice de composition ICPP Médit (AG et SC).

Plus spécifiquement, nous apportons notre expertise en dynamique des communautés phytoplanctoniques méditerranéennes et les données pigmentaires nécessaires à la validation du prototype PHYSAT-MED (tâche 2). Les données de terrain sont ensuite croisées avec les résultats obtenus par Sylvain Coudray, en charge des développements de l'outil numérique de traitement des signaux satellitaires et de la cartographie (tâches 1, 3 et 4). Nous contribuons également à fournir les informations nécessaires au calcul de l'indice de composition phytoplanctonique ICPP Médit à grande échelle (tâche 5).

Figure 1. Climatologie mensuelle des groupes phytoplanctoniques dominants détectés par PHYSAT-MED en Méditerranée (janvier 1998 - décembre 2015; d'après Navarro et al., 2017). Nano : nanoeucaryotes, Pro : *Prochlorococcus*, Syn : *Synechococcus*, Diat : diatomées, Phaeo : *Phaeocystis*-like, Cocco : coccolithophoridées.

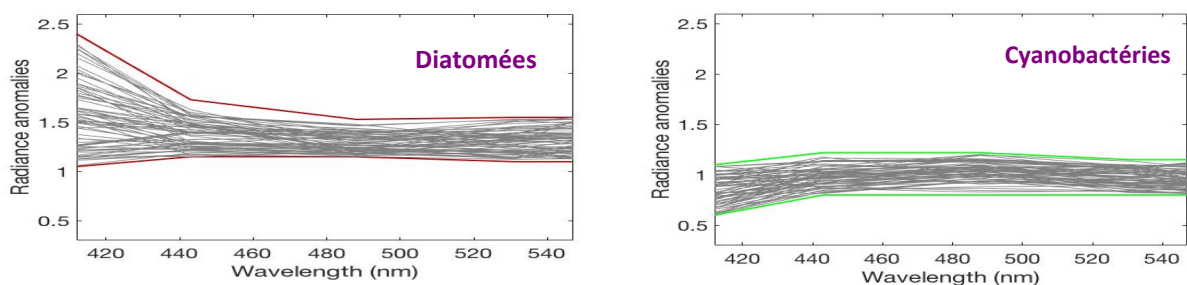


3. ADAPTATION DE L'OUTIL PHYSAT-MED AUX BESOINS DE L'ETUDE : PRESENTATION SUCCINCTE DU PROTOTYPE OC5-PHYSAT

L'adaptation de l'outil PHYSAT-MED a conduit à l'élaboration du prototype **OC5-PHYSAT** qui se base sur l'algorithme OC5-MED et sur la méthode PHYSAT-MED (Coudray 2019). L'algorithme OC5, développé par Gohin et al. (2008), a été adapté à la Méditerranée par l'Ifremer (OC5-MED). Il permet de calculer les concentrations en chlorophylle *a* totale (Tchl *a*) sur toute la zone Méditerranée DCSMM française à partir des images du capteur MODIS à la résolution de 1 km. Schématiquement, PHYSAT-MED relie une « couleur » détectée par le satellite à la présence d'un groupe phytoplanctonique dominant. Plus spécifiquement, la méthode PHYSAT-MED est une analyse de la réflectance normalisée. La réflectance est divisée par la Tchl *a* pour faire apparaître les anomalies dues aux pigments caractéristiques des groupes phytoplanctoniques dominants (phytoplankton functional types : PFT). Ces anomalies spectrales (positives ou négatives) sont caractérisées par des ruptures de pente observées aux longueurs d'onde mesurées par le satellite (Figure 2). Les anomalies spectrales sont associées empiriquement, et par niveaux de Tchl *a*, aux pigments traceurs des groupes phytoplanctoniques dominants grâce à une **matrice de coefficients charnières**. Une matrice globale a été proposée pour la Méditerranée par Navarro et al. (2014). En milieu côtier, en raison de la forte variabilité des assemblages phytoplanctoniques et des paramètres abiotiques (turbidité, présence de matière en suspension non phytoplanctonique), cette matrice **doit être définie à l'échelle de la masse d'eau** ou de la région hydrologique si elle est suffisamment homogène.

Parallèlement, le contenu pigmentaire des grands groupes fonctionnels varie dans l'océan mondial (Jeffrey et al. 1997, Roy et al. 2012). Le traitement des données pigmentaires ne peut donc pas se faire de manière automatique puisqu'un même pigment n'est pas systématiquement associé à un même groupe dans l'océan mondial. Il est donc **indispensable de connaître la composition phytoplanctonique** et la distribution des grands groupes fonctionnels d'une région ou d'une sous-région avant d'associer un pigment à un groupe, puis à un signal satellitaire.

Figure 2. Exemples d'anomalies de réflectance pour les diatomées (identifiées par la fucoxanthine) et les cyanobactéries (identifiées par la zéaxanthine), et intervalles minimum-maximum. D'après Coudray (2019).



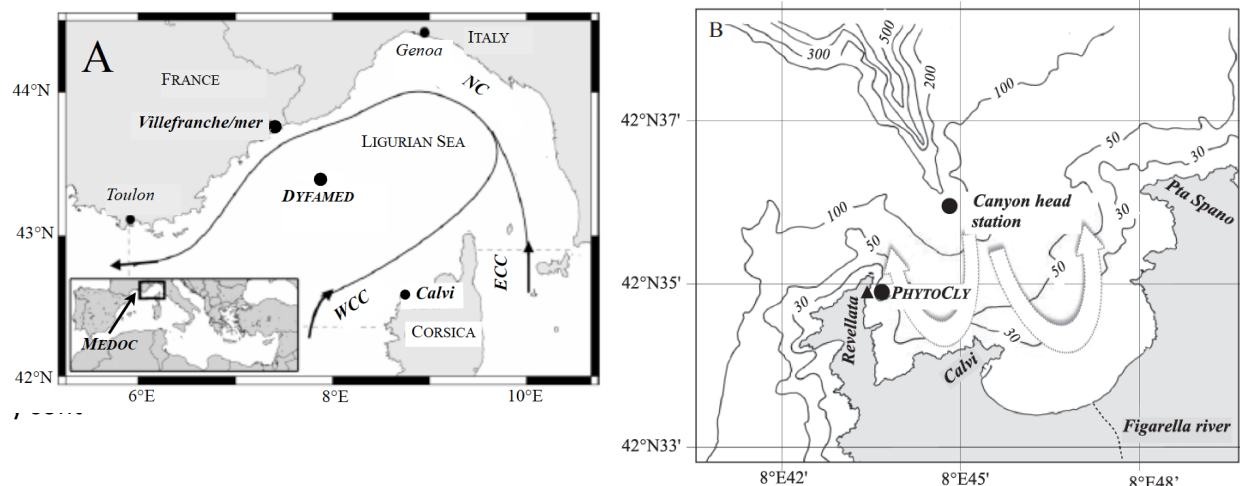
4. TEST DE OC5-PHYSAT : CHOIX DU SITE ATELIER, DESCRIPTION ET TRAITEMENTS DES DONNEES

Les travaux menés par l'Université de Liège en Baie de Calvi (Corse) ont permis d'acquérir une connaissance approfondie de la diversité de l'écosystème planctonique et des mécanismes qui contrôlent son fonctionnement (e.g. Skliris et al. 2001, Frangoulis et al. 2011, Collignon et al. 2014, Hecq et al. 2014, Goffart et al. 2015). Dans le cadre de cette étude, le site de **Calvi** a été retenu pour tester l'outil PHYSAT-MED en downscaling sur les eaux côtières en raison (i) de l'existence de données

pigmentaires acquises à haute fréquence, (ii) du caractère oligotrophe de la baie, peu chargée en matière en suspension non algale, et (iii) de l'expertise qui permet d'y caractériser les communautés phytoplanctoniques.

Le choix de l'année 2015 comme année de référence a été motivé par l'existence de données pigmentaires acquises à haute fréquence. Une première série temporelle (58 échantillons) a été réalisée à une station très côtière (point de suivi DCE, station PHYTOCLY, 42°34.85'N, 08°43.71'E, Figure 3) entre le 6 janvier et le 14 décembre 2015. Les échantillons de la seconde série temporelle (48 échantillons) ont été prélevés entre le 19 janvier et le 10 novembre à une station située plus au large, en sortie de baie (station Tête de canyon, 42°35.79'N, 08°44.77'E, Figure 3). L'échantillonnage a été réalisé en subsurface (-1m) par la station STARESO (Calvi, Corse) dans le cadre du suivi DCE Phytoplancton et du projet STARE-CAPMED. Les analyses pigmentaires par HPLC ont été réalisées à l'Université de Liège par Anne Goffart selon le protocole décrit par Zapata et al. (2000). Trente neuf analyses ont été financées par le suivi DCE Phytoplancton. Les autres analyses ont été financées par l'Université de Liège sur fonds propres.

Figure 3. Position de la Baie de Calvi en Mer Ligure (A) et des stations PHYTOCLY (point de suivi DCE) et Tête de canyon (B). D'après Goffart et al. (2015).



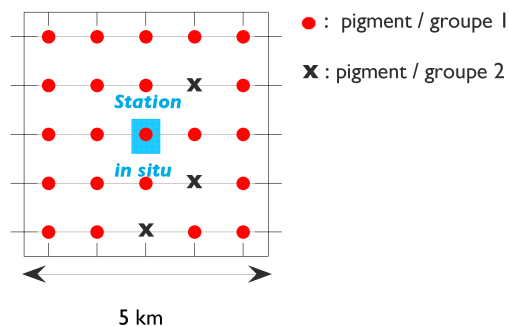
Les séries de ***Tchl a*** mesurées *in situ* au niveau des deux stations ont été comparées aux données satellitaires AQUA-MODIS.

Les ***données pigmentaires*** de l'année 2015 du point Tête de canyon ont été utilisées pour identifier les principaux groupes phytoplanctoniques présents, décrire leur évolution saisonnière et établir des correspondances avec les signaux satellitaires traités par le prototype OC5-PHYSAT.

Les ***données satellitaires*** ont été acquises quotidiennement dans une grille de 25 km² (5 x 5 km, 25 points) autour du point Tête de canyon. Elles ont été filtrées et classées manuellement en fonction des réflectances. Dans la phase de validation de l'algorithme, le traitement des images (25 images par jour pendant un an) a pris beaucoup de temps puisque tous les critères d'identifications ont été affinés manuellement, image par image. En chaque point de la grille, le pigment dominant a été identifié par analyse des réflectances et des anomalies spectrales (Coudray 2019). ***Un pigment dominant est associé à un point de mesure.*** Le pourcentage d'apparition des pigments dominants a ensuite été calculé dans le carré de 5 x 5 km. Dans l'exemple présenté à la Figure 4, 88% des points de mesure ont un spectre qui correspond au pattern (à la couleur) du groupe 1, identifié par son pigment traceur; les 12% restant ont un spectre qui correspond au pattern (à la couleur) du groupe 2, identifié par un autre pigment traceur. Les pourcentages hebdomadaires d'apparition des différents

groupes dans le carré de 5 x 5 km ont ensuite été calculés. Au final, la méthode donne une composition phytoplanctonique hebdomadaire exprimée en pourcentage des groupes dominants, identifiés leur signature pigmentaire. Ces groupes sont les diatomées (fucoxanthine), les cyanobactéries (zéaxanthine), les prymnesiophycées (19'HF) et les autres eucaryotes (somme de l'alloxanthine, la violaxanthine, la prasinoxanthine, la péricidine et la butanoyloxyfucoxanthine), qui regroupent les cryptophycées, les prasinophycées, les dinoflagellés et les pélagophycées. Les pourcentages hebdomadaires des groupes phytoplanctoniques dominants ont été multipliés par la *Tchl a* pour obtenir une estimation des concentrations en pigments détectées par le satellite (Coudray, 2019).

Figure 4. Représentation schématique du pourcentage d'apparition des pigments dominants calculé par OC5-PHYSAT dans une grille de 25 km².



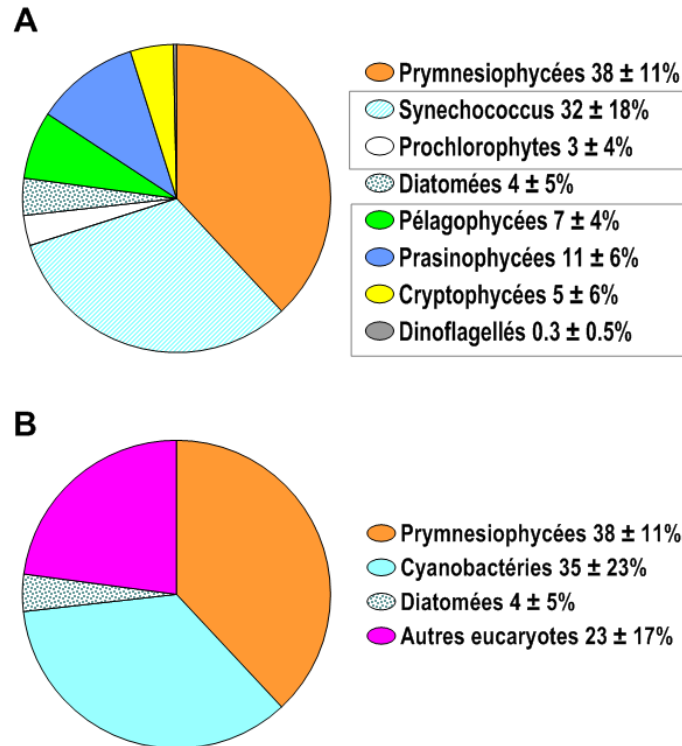
5. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES COMMUNAUTES PHYTOPLANCTONIQUES DE LA BAIE DE CALVI

Le phytoplancton de la Baie de Calvi fait l'objet de suivi à long terme depuis 1979. Les séries de données uniques mettent en évidence le caractère très préservé des communautés phytoplanctoniques, ainsi que leur sensibilité aux contraintes environnementales et aux variations climatiques (Goffart 1992, Goffart et al. 2002, Goffart et al. 2015).

Dans ce milieu faiblement impacté par l'activité anthropique, l'intensité de la rigueur hivernale contrôle le réapprovisionnement en sels nutritifs des couches de surface et le développement du bloom phytoplanctonique (Goffart et al. 2015). Lors des années caractérisées par un hiver froid et venteux, le bloom phytoplanctonique hivernal se développe à la fin de l'hiver et/ou au début du printemps (février-mars) pendant la période d'eau froide (eau de subsurface $\leq 13.5^{\circ}\text{C}$). Les biomasses maximales sont de l'ordre de $1.0 \mu\text{g Tchl a L}^{-1}$. Lorsque l'hiver est très doux, la disponibilité en sels nutritifs est réduite et le bloom ne se développe pas. De fin avril à fin octobre, la colonne d'eau comprise entre 0 et 40 m de profondeur est épuisée en sels nutritifs et en phytoplancton. Par contre, là où la profondeur est supérieure à 40 m, un maximum profond de chlorophylle (Deep Chlorophyll Maximum : DCM) se développe. Il s'enfonce progressivement dans la colonne d'eau et atteint 90 m en octobre. En surface, les prymnesiophycées et les *Synechococcus* dominent largement les communautés phytoplanctoniques (Goffart et al. submitted). Les contributions respectives des autres groupes sont variables et contrôlées par les facteurs environnementaux.

Les mesures *in situ* réalisées en 2015 au Point tête de canyon confirment que les prymnesiophycées et les *Synechococcus* dominent les communautés phytoplanctoniques (Figure 5). Au cours de l'année 2015, ces deux groupes constituent respectivement $38 \pm 11\%$ et $32 \pm 18\%$ de la biomasse phytoplanctonique totale. Les prasinophycées représentent le troisième groupe le plus abondant ($11 \pm 6\%$), et la contribution des diatomées ($4 \pm 5\%$) est modeste.

Figure 5. Contribution relative (%) des groupes phytoplanctoniques à la biomasse totale annuelle (moyennes annuelles et écarts-types) à la station Tête de canyon au cours de l'année 2015 (mesures de subsurface, n = 48). A : Composition détaillée obtenue après traitement des données pigmentaires par CHEMTAX (Mackey et al. 1996); B : Regroupement par groupes fonctionnels détectés par OC5-PHYSAT.

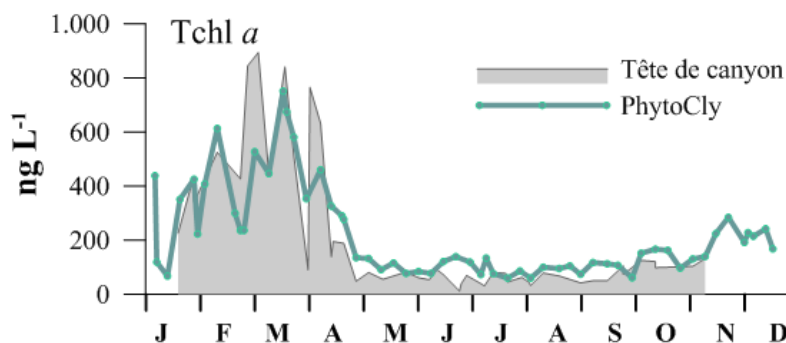


6. EVOLUTION SAISONNIERE DES CONCENTRATIONS EN Tchl α EN 2015 : COMPARAISON DES MESURES *IN SITU* ET OC5-MODIS

En 2015, les niveaux de concentrations et l'évolution saisonnière de la biomasse phytoplanctonique totale des points PHYTOCLY (point de suivi DCE) et Tête de canyon sont comparables (Figure 6). La biomasse phytoplanctonique totale (Tchl α = chlorophylle α + Divinyl-chl α) varie de 12 à 894 ng L⁻¹ au point Tête de canyon et de 60 à 751 ng L⁻¹ à la station PHYTOCLY.

Les biomasses augmentent progressivement de janvier à mars dans les deux sites. Les concentrations maximales en Tchl α , caractéristiques du bloom de fin d'hiver, sont observées début mars au point Tête de canyon et mi-mars à la station PHYTOCLY. Elles diminuent ensuite très rapidement pendant la seconde quinzaine d'avril. De fin avril à fin octobre, les deux sites sont caractérisés par des biomasses totales basses et typiques d'un milieu oligotrophe. A partir du mois de novembre, les concentrations en Tchl α augmentent légèrement à la station PHYTOCLY en relation avec l'érosion progressive de la thermocline saisonnière. En raison de la similitude entre les deux sites, il est probable que cette augmentation ait également lieu au point Tête de Canyon, mais les données sont manquantes (pas d'échantillonnage après le 10 novembre).

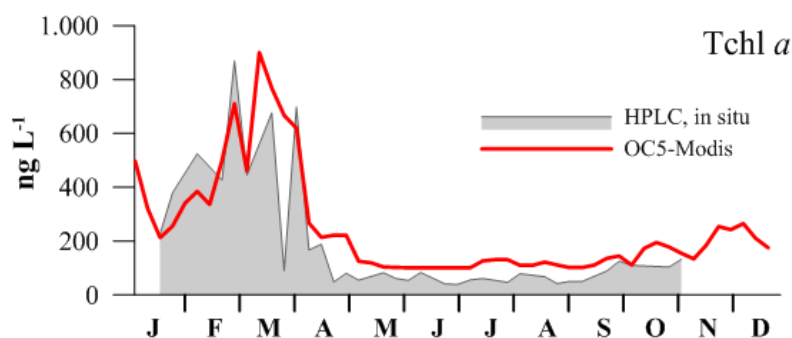
Figure 6. Variations annuelles (janvier - décembre 2015) de la Tchl *a* *in situ* (subsurface, mesures HPLC) à la station PHYTOCLY (point de suivi DCE, 58 échantillons) et au point Tête de canyon (48 échantillons) - Baie de Calvi, Corse.



La superposition des mesures HPLC de Tchl *a* du point Tête de canyon et des concentrations obtenues après traitement OC5-Modis est présentée à la Figure 7. Compte-tenu des incertitudes cumulées dans le traitement satellitaire (données manquantes en raison de la couverture nuageuse, zone observée par le satellite plus étendue que le seul point de mesure *in situ*, ...), les concentrations mesurées par les deux méthodes montrent une très bonne correspondance. En particulier, l'aspect plurimodal du bloom de fin d'hiver, typique de la zone étudiée, est bien reproduit par OC5-Modis.

L'augmentation modérée des biomasses totales observée en fin d'année (novembre - décembre) à la station PHYTOCLY est mise en évidence par le satellite au point Tête de canyon. En période stratifiée (mai - septembre), les concentrations *in situ* en Tchl *a* moyennées sur 7 jours sont de l'ordre de 50 ng Tchl *a* L⁻¹. Elles sont inférieures au seuil de détection du capteur MODIS, égal à 100 ng Tchl *a* L⁻¹.

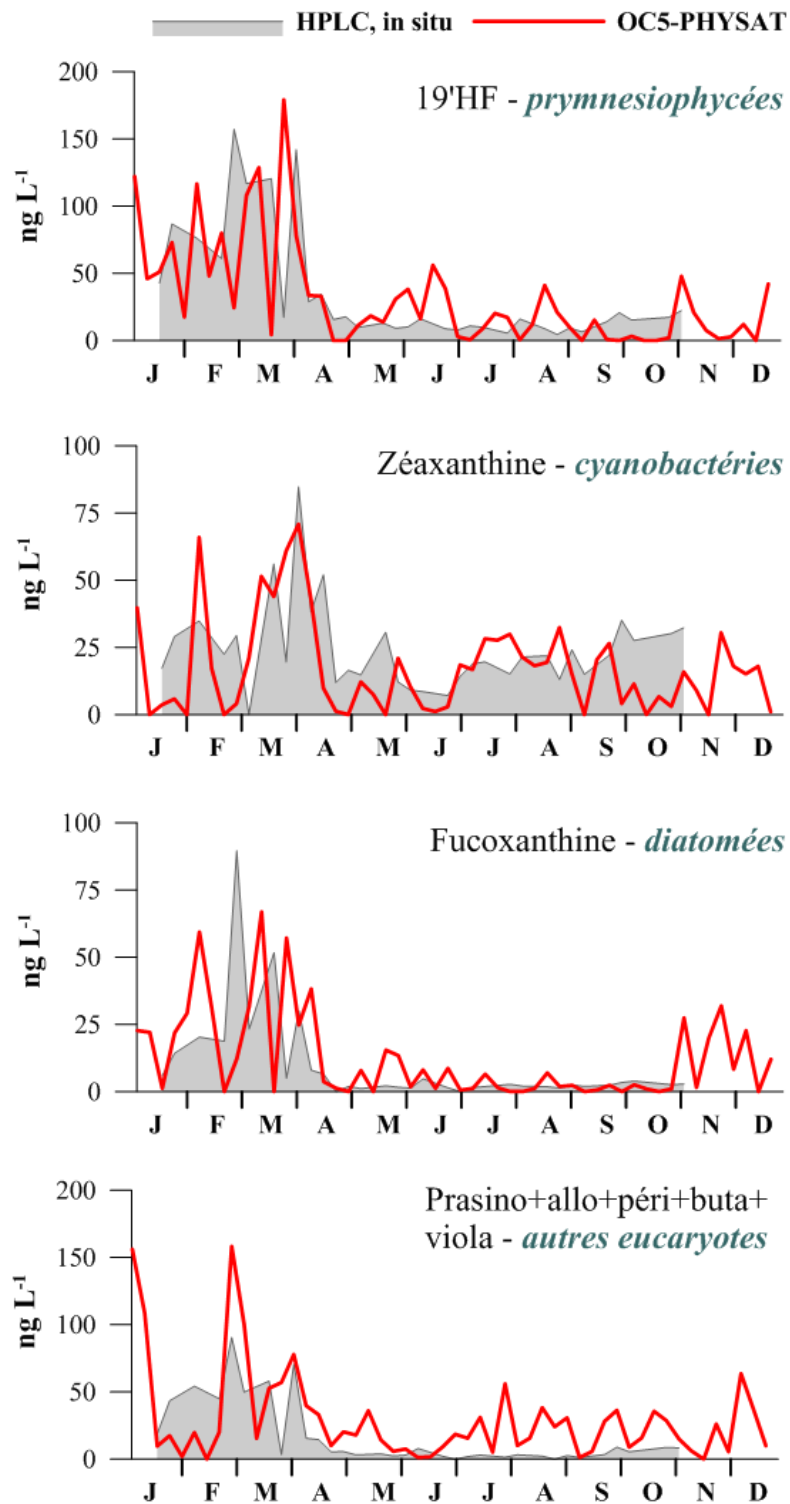
Figure 7. Variations annuelles (janvier - décembre 2015, moyennes sur 7 jours) des concentrations en Tchl *a* mesurées *in situ* au point Tête de canyon (subsurface, mesures HPLC) et par satellite (OC5-Modis). Données satellitaires acquises quotidiennement sur 25 points dans une grille de 25 km² incluant le point Tête de canyon. Données satellitaires traitées par Sylvain Coudray.



7. EVOLUTION SAISONNIERE DES PIGMENTS PHYTOPLANCTONIQUES EN 2015 : COMPARAISON DES MESURES *IN SITU* ET DES VALEURS ISSUES DU TRAITEMENT PAR OC5-PHYSAT

La comparaison des concentrations en pigments issues du traitement par OC5-PHYSAT et des mesures *in situ* de concentrations en pigments est présentée à la Figure 8. Une très bonne correspondance est obtenue entre l'évolution saisonnière de la biomasse des deux groupes phytoplanctoniques principaux, les prymnesiophycées et les cyanobactéries, identifiés par leur pigment traceur respectif et détectés par les deux méthodes. Les variations de pente croissante et décroissante observées en mars et avril sont bien reproduites par l'algorithme.

Figure 8. Variations annuelles (janvier - décembre 2015, moyennes sur 7 jours) des concentrations en pigments mesurées *in situ* au point Tête de canyon (subsurface, mesures HPLC) et par satellite (OC5-MODIS) dans un carré de 5 x 5 km incluant le point Tête de canyon. Données satellitaires acquises quotidiennement avec une résolution de 1 km et traitées par Sylvain Coudray. 19'HF : hexanoyloxyfucoxanthine, prasino : prasinoxanthine, allo : alloxanthine, péri : périidine, buta : butanoyloxyfucoxanthine, viola : violaxanthine.



Le caractère plurimodal des pics hivernaux de diatomées est mis en évidence par OC5-PHYSAT. Un décalage temporel d'environ une semaine est observé entre les pics détectés par OCS-PHYSAT et les mesures *in situ*, mais la variation de pente décroissante observée en mars et avril est bien reproduite par l'algorithme. Ce léger décalage peut s'expliquer par les différences d'échelle spatio-temporelle des deux méthodes (satellite : 25 mesures journalières dans un carré de 25 km², données *in situ* : une mesure par semaine) et par l'absence de certaines données satellite en raison de la couverture nuageuse, particulièrement en hiver.

En période de bloom (janvier - mars), les variations des autres eucaryotes sont reproduites de manière satisfaisante. De mai à octobre, la somme des concentrations en prasinoxanthine, alloxanthine, péridinine et butanoyloxyfucoxanthine est inférieure au seuil de 10 ng L⁻¹, nécessaire pour obtenir un signal satellitaire significatif.

Compte-tenu des incertitudes liées au traitement des données satellitaires (couverture nuageuse, échantillons rejetés par l'algorithme, calcul des concentrations en pigments, ...) et des différences d'échelles spatiale et temporelle propres aux deux méthodes (1 point par semaine pour les mesures *in situ*, 25 pixels par jour dans une grille de 25 km² pour les mesures satellitaires), les résultats obtenus montrent que l'algorithme OC5-PHYSAT est suffisamment performant pour reproduire l'évolution temporelle des communautés phytoplanctoniques du site atelier de Calvi au cours d'un cycle annuel.

8. SUITE A DONNER AUX TRAVAUX

En raison de la complexité optique des eaux côtières méditerranéennes (diversité des assemblages phytoplanctoniques, variabilité de la charge en matière en suspension non algale, turbidité variable, ...), il est nécessaire de poursuivre l'étude et de confirmer la robustesse de l'algorithme OC5-PHYSAT par les actions suivantes :

- reproduire l'évolution interannuelle des communautés phytoplanctoniques du site atelier de Calvi où des séries de données pigmentaires acquises à haute fréquence existent (1 site, résolution de 1 km, 4 années : 2012 - 2015, données AQUA-MODIS);
- calibrer OC5-PHYSAT sur le site atelier de Calvi avec les données du nouveau capteur OLCI, plus performant que MODIS, avec notamment une résolution de 300 m tout en assurant la continuité des mesures pour l'avenir (1 site, une année, données SENTINEL3/OLCI, acquisition de nouvelles données en période de bloom);
- aborder la variabilité spatiale et adapter l'algorithme OC5-PHYSAT à d'autres zones côtières méditerranéennes où des données pigmentaires seront prochainement disponibles (élargissement à trois sites SOMLIT, une année, données SENTINEL2/SENTINEL3/OLCI).

Ces actions ont été soumises à l'AFB par Anne Goffart (AMI 2018, expertise en dynamique des communautés phytoplanctoniques, séries de données pigmentaires) et Sylvain Coudray (AQUAREF 2018, traitement des signaux satellitaires, cartographie).

Pour chaque zone ou paysage de l'emprise DCSMM, il est nécessaire d'avoir un site calibré manuellement avec au moins deux ans de séries pigmentaires acquises à haute fréquence. Dans un futur proche, le travail sur les autres zones pourra probablement être automatisé grâce à des logiciels intelligents (*e.g.* réseaux de neurones). En région PACA et en Occitanie, les données pigmentaires existent depuis peu grâce à l'effort d'échantillonnage et d'analyse réalisé dans le cadre

des points de surveillance SOMLIT. Par contre, aucun point SOMLIT n'existe le long des mille kilomètres du littoral corse. Une attention particulière devra donc être portée à l'acquisition de nouvelles données pigmentaires mesurées par HPLC au niveau des deux sites où des moyens à la mer en place permettent des prélèvements fréquents : le point Sud Bastia en Mer Tyrrhénienne et le point Calvi en Mer Ligure.

9. VERS UN CALCUL DE L'INDICE DE COMPOSITION PHYTOPLANCTONIQUE ICCP MEDIT SOUTENU PAR L'IMAGERIE SATELLITAIRE

Le calcul de l'indice de composition phytoplanctonique ICCP Médit passe par la validation préalable du prototype OC5-PHYSAT à l'échelle de la Méditerranée française. Après validation de l'algorithme, la procédure de calcul de l'indice de composition phytoplanctonique ICCP Médit à partir de l'analyse de la réflectance marine devra être adaptée aux contraintes imposées par OC5-PHYSAT puisque les 4 groupes intégrés à l'indice de composition ICCP Médit (diatomées, prasinophycées, cryptophycées et dinoflagellés, Goffart 2019a) ne sont pas tous identifiés séparément par l'algorithme. L'indice ICCP PHYSAT ne serait plus composé que de deux sous-indices : un sous-indice « Diatomées » et un sous-indice mixte qui regroupe les « autres eucaryotes » détectés par OC5-PHYSAT, à savoir les prasinophycées, les cryptophycées, les dinoflagellés et les pélagophycées. Le poids relatif des deux sous-indices pourrait être pondéré selon une règle $\frac{1}{4}$ (diatomées) $\frac{3}{4}$ (autres eucaryotes). Dans une perspective opérationnelle, il sera nécessaire d'automatiser les procédures de calcul de l'indice (courbes de référence, fréquence et importance des dépassements, IC scores et EQR).

10. CONCLUSIONS

Le travail de validation du prototype OC5-PHYSAT réalisé à l'échelle locale est novateur et très satisfaisant. La mise en commun d'expertise en dynamique du phytoplancton méditerranéen, de jeux de données pigmentaires acquises à haute fréquence et de compétence en traitement des signaux satellitaire a permis d'adapter et de valider prototype OC5-PHYSAT à une échelle locale. En milieu oligotrophe, l'algorithme a permis de quantifier les variations hebdomadaires de la Tchl a et des quatre groupes fonctionnels dominants identifiés par leur signature pigmentaire (prymnesiophycées, cyanobactéries, diatomées et autres eucaryotes) au niveau du point de référence de Calvi. Lors d'un cycle annuel (2015), les concentrations en Tchl a et en pigments calculées par le prototype OC5-PHYSAT sur une grille 5 km x 5 km correspondent bien en amplitude et en saisonnalité à celles mesurées *in situ*.

En raison de la complexité optique des eaux côtières méditerranéennes (diversité des assemblages phytoplanctoniques, variabilité de la charge en matière en suspension non algale, turbidité variable, ...), il est nécessaire de poursuivre l'étude et de confirmer la robustesse de l'algorithme OC5-PHYSAT sur des jeux des données pluriannuels et dans des masses d'eau caractérisées par des propriétés optiques contrastées.

11. BIBLIOGRAPHIE

Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Loisel, H., 2008. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochemical Cycles* 22 (3), GB3001.

- Collignon, A., Hecq, J.-H., Galgani, F., Collard, F., Goffart, A., 2014. Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica). *Mar Pollut Bull* 79, 293-298.
- Coudray, S., 2019. Application croisée de méthodes analytiques et innovantes pour déterminer la composition phytoplanctonique à large échelle. Signature pigmentaire du phytoplancton et imagerie satellitaire. Rapport final de convention IFREMER et ONEMA, France.
- Demarcq, H., Reygondeau, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., 2012. Monitoring marine phytoplankton seasonality from space. *Remote Sensing of Environment* 117, 211-222.
- Frangoulis, C., Skliris, N., Lepoint, G., Elkalay, K., Goffart, A., Pinnegar, J.K., Hecq, J.-H., 2011. Importance of copepod carcasses versus faecal pellets in the upper water column of an oligotrophic area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92, 456-463.
- Goffart, A., 1992. Influence des contraintes hydrodynamiques sur la structure des communautés phytoplanctoniques du bassin Liguro-Provençal (secteur Corse). PhD Thesis, University of Liege, Belgium, 163 pp.
- Goffart, A., 2019a. Consolidation de l'indice composition IC Médit pour les eaux côtières de Méditerranée. Rapport final de l'action 1 du projet « Indicateur de composition phytoplanctonique ». Convention de subvention ONEMA - Université de Liège, 38 pp.
- Goffart, A., 2019b. Evaluation croisée de la composition phytoplanctonique des eaux côtières métropolitaines par les indices ICPP et ICBC. Rapport final de l'action 2 du projet « Indicateur de composition phytoplanctonique ». Convention de subvention ONEMA - Université de Liège, 25 pp.
- Goffart, A., Andral, B., 2014. Validation de l'indice composition IC Médit dans des masses d'eau côtières méditerranéennes caractérisées par un gradient croissant d'eutrophisation. Rapport final de convention, action Indice de composition. IFREMER et ONEMA, France, 33 pp.
- 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., Abadie, A., Gobert, S., Michel, L.N., Richir, J., Lejeune, P., submitted. Response of phytoplankton functional groups to recreational boating activities in the Calvi Bay (Corsica, NW Mediterranean)
- Gohin, F., Saulquin, B., Oger-Jeanneret, H., Lozac'h, L., Lampert, L., Lefebvre, A., Riou, P., Bruchon, F., 2008. Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentrations. *Remote Sensing of Environment* 112, 3329-3340.
- Hecq, J.-H., Collignon, A., Goffart, A., 2014. Atlas du zooplankton des eaux côtières corses. Travail de synthèse réalisé à la demande de l'Agence de l'Eau RMC, France, 166 pp.
- Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C., Wright, S.W., 1997. Phytoplankton pigments in oceanography : guidelines to modern methods. UNESCO Publishing, 661 pp.

- Mackey, M.D., J., M.D., Higgins, H.W., Wright, S.W., 1996. CHEMTAX - A program for estimating class abundances from chemical markers : Application to HPLC measurements of phytoplankton. Marine Ecology Progress Series 144, 265– 283.
- Navarro, G., Almaraz, P., Caballero, I., Vázquez, Á., Huertas, I.E., 2017. Reproduction of Spatio-Temporal Patterns of Major Mediterranean Phytoplankton Groups from Remote Sensing OC-CCI Data. Frontiers in Marine Science 4.
- Navarro, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., Huertas, I.E., 2014. Identification of dominant phytoplankton functional types in the Mediterranean Sea based on a regionalized remote sensing approach. Remote Sensing of Environment 152, 557-575.
- Roy, S., Llewellyn, C.A., Egeland, E.S., Johnsen, G.E., 2012. Phytoplankton Pigments: Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 845pp.
- Skliris, N., Elkalay, K., Goffart, A., Frangoulis, C., Hecq, J.-H., 2001. One-dimensional modelling of the plankton ecosystem of the north-western Corsican coastal area in relation to meteorological constraints. Journal of Marine Systems 27 337–362.
- Zapata, M., Rodríguez, F., Garrido, J.L., 2000. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine containing mobile phases. Marine Ecology Progress Series 195, 29-45.

12. TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1. Climatologie mensuelle des groupes phytoplanctoniques dominants détectés par PHYSAT-MED en Méditerranée (janvier 1998 – décembre 2015; d'après Navarro et al., 2017). Nano : nanoeucaryotes, Pro : Prochlorococcus, Syn : Synechococcus, Diat : diatomées, Phaeo : *Phaeocystis*-like, Cocco : coccolithophoridées..... 10
- Figure 2. Exemples d'anomalies de réflectance pour les diatomées (identifiées par la fucoxanthine) et les cyanobactéries (identifiées par la zéaxanthine), et intervalles minimum-maximum. D'après Coudray (2019). 11
- Figure 3. Position de la Baie de Calvi en Mer Ligure (A) et des stations PHYTOCLY (point de suivi DCE) et Tête de canyon (B). D'après Goffart et al. (2015). 12
- Figure 4. Représentation schématique du pourcentage d'apparition des pigments dominants calculé par OC5-PHYSAT dans une grille de 25 km². 13
- Figure 5. Contribution relative (%) des groupes phytoplanctoniques à la biomasse totale annuelle (moyennes annuelles et écarts-types) à la station Tête de canyon au cours de l'année 2015 (mesures de subsurface, n = 48). A : Composition détaillée obtenue après traitement des données pigmentaires par CHEMTAX (Mackey et al. 1996); B : Regroupement par groupes fonctionnels détectés par OC5-PHYSAT..... 14
- Figure 6. Variations annuelles (janvier - décembre 2015) de la Tchl *a* *in situ* (subsurface, mesures HPLC) à la station PHYTOCLY (point de suivi DCE, 58 échantillons) et au point Tête de canyon (48 échantillons) - Baie de Calvi, Corse. 15
- Figure 7. Variations annuelles (janvier - décembre 2015, moyennes sur 7 jours) des concentrations en Tchl *a* mesurées *in situ* au point Tête de canyon (subsurface, mesures HPLC) et par satellite (OC5-MODIS) au cours de l'année 2015. Données satellitaires acquises quotidiennement sur 25

points dans une grille de 25 km² incluant le point Tête de canyon. Données satellitaires traitées par Sylvain Coudray. 15

Figure 8. Variations annuelles (janvier - décembre 2015, moyennes sur 7 jours) des concentrations en pigments mesurées *in situ* au point Tête de canyon (subsurface, mesures HPLC) et par satellite (OC5-MODIS) dans un carré de 5 x 5 km incluant le point Tête de canyon. Données satellitaires acquises quotidiennement avec une résolution de 1 km et traitées par Sylvain Coudray. 19'HF : hexanoyloxyfucoxanthine, prasino : prasinoxanthine, allo : alloxanthine, péri : périidine, buta : butanoyloxyfucoxanthine, viola : violaxanthine. 16

13. REMERCIEMENTS

L'échantillonnage a été réalisé par la station STARESO (Calvi, Corse) dans le cadre du suivi DCE Phytoplancton 2015, financé par l'Ifremer, et du projet STARE-CAPMED, financé par l'Agence de l'Eau RMC et la Collectivité territoriale de Corse.

Avec le soutien financier de

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

www.agence-francaise-biodiversite.fr



www.uliege.be