

SENVISAT

Etude de faisabilité d'un Suivi ENVironnemental par SATellite
dans le Parc naturel marin du golfe du Lion

Phase 3 et 5 : Suivi des panaches turbides post-événement de
crue ; Suivi de l'évolution de la chlorophylle a et de la
production primaire

15 novembre 2019

EID & CEFREM, 2019



Référence à utiliser pour toute citation du document :

Gervais, M., Paris, M., Harbonnier, M., Richard, B., Heurtefeux, H., Robin, N., Aleman, N., Raynal, O., Certain, R., 2019. Suivi des panaches turbides post-événement de crue et de l'évolution de la chlorophylle a et de la production primaire. Rapport phase 3&5 - SENVISAT.

CONTACTS

Mathieu Gervais
mgervais@eid-med.org
04.30.63.67.82

Hugues Heurtefeux
hheurtefeux@eid-med.org
04.67.63.72.99

Nicolas Aleman
nicolas.aleman@univ-perp.fr
04.68.66.20.57

Nicolas Robin
nicolas.robin@univ-perp.fr
04.30.19.23.00

EID Méditerranée
Pôle Littoral
165 avenue Paul Rimbaud
34 184 Montpellier Cedex 4

Laboratoire CEFREM
Université de Perpignan Via
Domitia, Bat U
52, av. Paul Alduy
66860 Perpignan Cedex

Le pôle Littoral de l'EID Méditerranée s'investit dans la protection et la restauration des cordons dunaires et des plages. Les connaissances scientifiques et techniques accumulées sur cet espace constituent aujourd'hui un capital mis à disposition des collectivités territoriales et des établissements publics. Ainsi nous concevons et proposons aux collectivités des actions de protection et de réhabilitation des plages et des dunes, ainsi que des modalités de gestion de la fréquentation adaptées à ces sites.

Le laboratoire CEFREM (Centre de Formation et de Recherche sur les environnements Méditerranéens) de l'Université de Perpignan Via Domitia est spécialisé notamment dans l'étude détaillée des données sédimentaires et morphologiques pour la compréhension de la dynamique littorale. Son activité de recherche est focalisée sur le thème des transferts de matière et d'énergie aux interfaces du système côtier.

Suivi des panaches turbides post-évènement de crue et suivi de l'évolution de la chlorophylle-a et de la production primaire dans les eaux du parc

PHASE 3&5 – Contrat de recherche SENVISAT

Mathieu Gervais

Marine Paris

Mai Harbonnier

Bertrand Richard

Hugues Heurtefeux

Nicolas Aleman

Nicolas Robin

Olivier Raynal

Raphaël Certain

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE.....	8
ABREVIATIONS	10
1. INTRODUCTION	12
1.1. La problématique des eaux côtières du parc	12
Qu'est-ce que la turbidité ?	12
1.2. La télédétection.....	13
1.3 Les objectifs de l'étude	14
2) LE SITE D'ETUDE ET SON CONTEXTE.....	14
2.1. Présentation de la zone d'étude	14
2.2. Climatologie	15
2.3. Courantologie sur le plateau	16
2.4 Les rivières et leurs embouchures, et les graus des étangs	18
3) LES SOURCES DE DONNEES SATELLITES EXISTANTES ET LES NOUVELLES POSSIBILITES	23
3.1. Les différents capteurs satellites utiles pour la colorimétrie des océans – le choix des images source Sentinel 2	23
3.2. Les données satellites de turbidité/chl-a déjà disponibles sur internet	26
La Plateforme Marine-Copernicus (marine.copernicus.eu).....	26
Plateforme MARC (marc.ifremer.fr)	29
3.3. Extraction des images Sentinel 2	31
4) LES DONNEES METEO-MARINES EN LIEN AVEC L'ETUDE DES PANACHES.....	34
4.1. Les données hydrographiques	34
Débits des fleuves	34
Les bouées de mesure en mer (sondes multi-paramètres).....	35
4.2. Les données météo marines (modélisations).....	37
Données de courant utilisées et téléchargées :.....	38

5) TRAITEMENT DES DONNEES - METHODOLOGIE.....	39
5.1. Le choix de l'indice utilisé pour la turbidité	39
5.2. L'impossibilité de discriminer la production primaire des MES sur les images S-2 avec un indice simple. 45	
5.3. Les étapes de traitement des images Sentinel-2.....	47
Acquisition des données Sentinel-2.....	47
Nettoyage de la terre, des nuages.....	48
Détection de de l'influence du fond sableux	49
Le problème des bandes sur les images et de la variation spatio-temporelle des éclairages.....	49
Calcul de l'indice de Froidefond (voir méthode en annexe 5).....	51
Lissage de l'indice	52
Croisement des images avec les champs de courant des modèles (méthodologie en annexe 6 fournie hors de ce document).....	53
6) RESULTATS GENERAUX DES PHENOMENES TURBIDES DANS LE GOLFE DU LION	55
.....	
6.1. Les crues et les épisodes de pluie méditerranéen.....	55
6.2. La saisonnalité du signal de turbidité et de chlorophylle-a	56
Une [chl a] régulière et une turbidité plus instable d'après les mesures	56
6.3. Une validation des capacités d'observation de Copernicus	58
6.4. La chlorophylle-a est-elle seulement dépendante de la turbidité générale comme indiqué par Copernicus ?	61
Des efflorescences phytoplanctoniques visibles aux embouchures des fleuves.....	62
6.5. Maintien de la turbidité proche des côtes	64
L'Adg443, plus spécifique aux particules jaunes ?.....	66
6.6. Une réponse non linéaire entre turbidité et intensité des débits	67
6.5. Amélioration de la résolution des informations de turbidité grâce aux images Sentinel-2	68
Des détails mis en évidence grâce à la haute résolution des images Sentinel-2.....	70
7) RESULTATS SUR LES FACTEURS DE DISPERSION DES PANACHES AVEC LA DYNAMIQUE MARINE	72
7.1. Etude de cas 1 –Blooms phytoplanctoniques du 05 octobre 2018	73
7.2. Etude de cas 2 - Evènement de turbidité forte le 25 octobre 2018.....	82

Enquête sur la mise en place de l'évènement (avant observation ; Figure 68).....	82
Résultats	83
7.3. Etude de cas 3 - Evènement de turbidité du 24 novembre 2018	89
II.1.4 – Bilan sur les évènements turbides d'octobre à novembre 2018	95
CONCLUSION ET DISCUSSION	96
Conclusion générale	96
Perspectives.....	98
Applications pour le PNM	99
Le lien entre la turbidité et la vie.....	99
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	102
ANNEXE B : IMAGES S2 DISPONIBLES ET SELECTIONNEES	110

PREAMBULE

Ce rapport traite des phases 3 et 5 du contrat de recherche " Suivi ENVironnemental par SATellite" (SENVISAT) entre le Parc Naturel Marin du Golfe du Lion (PNMGL) et l'Entente Interdépartementale pour la Démoustication (EID- méditerranée), impliquant aussi l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD, CEFREM UMR5110, groupe de recherche Littoral Multi-Scale Analysis -LMUSCA) et son unité affiliée au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), ainsi que l'Observatoire de la côte sableuse catalane (OBSCAT).

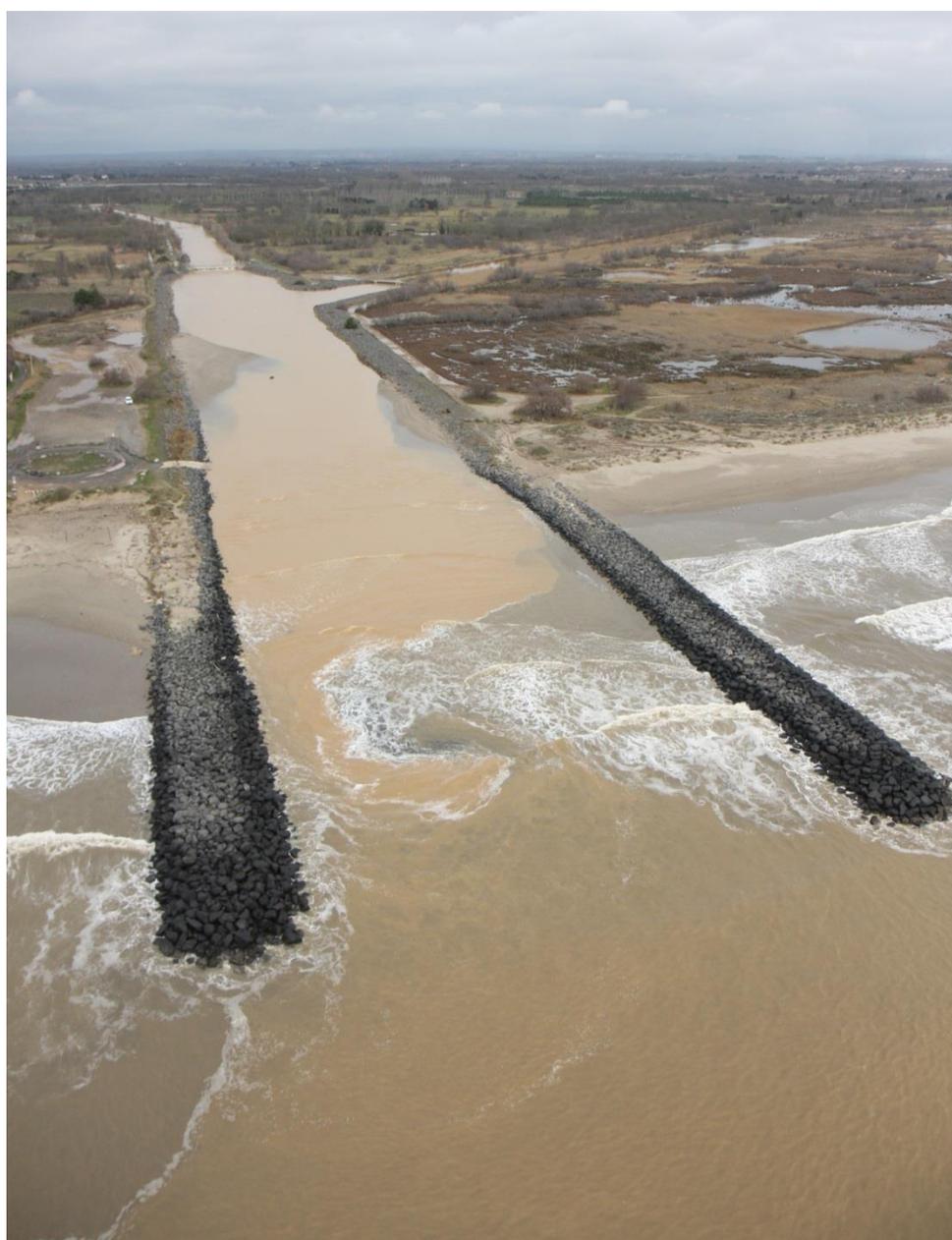


Figure 1 : Illustration d'un apport d'eau turbides en mer suite à de fortes pluies sur la plaine littorale (cas du canal de l'Ardillon entre Vias et Agde ; © photo DREAL-Occitanie, survol après tempête daté du 07 mars 2013)

Ces travaux s'inscrivent dans les objectifs du parc « d'une zone de référence pour la connaissance et le suivi du milieu marin, de ses écosystèmes » et de « préserver et améliorer la qualité des eaux du parc naturel marin ».

Ce document traite à la fois des résultats des phases 3 et 5 du projet SENVISAT. La phase 3 porte sur l'étude de la turbidité des eaux côtières et de l'impact des panaches apportés par les rivières, tandis que la phase 5 porte sur le suivi de la chlorophylle a (chl a) et de la production primaire. Ces deux sujets sont traités ensemble car le suivi de la turbidité liée aux matières en suspension se fait de manière similaire à un suivi des épisodes de blooms phytoplanctoniques qui troublent également l'eau et se produisent dans certaines conditions météo-marines particulières.



Figure 2 : Exemple de turbidité nouvelle générée par l'apport des embouchures/graus proche du littoral, et d'une turbidité plus ancienne (rémanente), au large, liée à des épisodes turbides produits antérieurement.

Abréviations

- + **AEE** : Agence Européenne pour l'Environnement
- + **AFB** : Agence Française pour la Biodiversité
- + **BAO** : Bottom-of-the-Atmosphere (niveau de traitement réflectance du sol corrigée des effets de l'atmosphère depuis une vision spatiale satellite)
- + **CEFREM** : Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Marins
- + **Chl a** : Chlorophylle a (pigment assimilateur de l'énergie de la lumière des végétaux)
- + **CN** : Compte Numérique
- + **CNES** : Centre National d'Etudes Spatiales
- + **CNM** : Courant Nord Méditerranéen
- + **CNRS** : Centre National pour la Recherche Scientifique
- + **DCE** : Directive Cadre sur l'Eau
- + **Effet de support** : en statistiques, désigne la variation entre deux mesures d'une même variable mais dans deux volumes différents. Par exemple, la mesure de [chl a] dans un petit volume sera plus variable que dans un grand.
- + **EID-Med** : Entente Interdépartementale pour la Démoustication du littoral méditerranéen
- + **ESA** : European Space Agency : Agence Spatiale Européenne
- + **FR** : Full Resolution : Pleine résolution
- + **GDL** : Golfe du Lion
- + **GMES** : Global Monitoring for Environment and Security : Observation et surveillance de la Terre pour l'Environnement et la Sécurité
- + **Hs** : Hauteur significative
- + **HR** : images haute résolution (pixel entre 10 et 20 m)
- + **IR** : Infrarouge
- + **LIR** : Lointain Infrarouge
- + **MAJA** : Multi-Sensor Atmospheric Correction and Cloud Screening (MAACS) and Atmospheric and Topographic CORrection (ATCOR) Joint Algorithm
- + **MES** : Matières en Suspension (concentration de matière solide non-dissoute dans l'eau)
- + **MERIS** : Medium Resolution Imaging Spectrometer : Spectromètre d'image à moyenne résolution
- + **MIR** : Moyen InfraRouge
- + **MODIS** : MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer : Spectroradiomètre d'images à résolution modérée
- + **NASA** : National Aeronautics and Space Administration : Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace

- ✚ **NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index : Indice de végétation Normalisé : Indice de Tucker révélant la présence et l'activité de la végétation grâce aux couleurs rouges et proche infra-rouge
= $(PIR-R)/PIR+R$ (Tucker, 1979)
- ✚ **OLI** : Operational Land Imager
- ✚ **PEPS** : Plateforme d'Exploitation des Produits Sentinel
- ✚ **PIR** : Proche InfraRouge (ou near-infrared –NIR en anglais)
- ✚ **PNMGL ; PNM du GdL ; ou simplement PNM** : Parc Naturel Marin du Golfe du Lion
- ✚ **POEM-L2R** : Plateforme d'Observation de l'Environnement Méditerranéen – Littoral Languedoc-Roussillon (Université de Perpignan – CEFREM, et laboratoire d'océanologie de Banyuls)
- ✚ **RR** : Raw Resolution : Résolution brute
- ✚ **RVB** : « Rouge Vert Bleu » bandes spectrales de base permettant de constituer une image en couleur
- ✚ **S2 ou S-2** : Satellite Sentinel-2, satellite à images hautes résolutions utilisées dans ce travail (S2A ou S2B car il y a deux satellites S-2)
- ✚ **SAD** : Satellite d'Acquisition à la Demande
- ✚ **SAS** : Satellite d'Acquisition Systématique
- ✚ **SENVISAT** : Suivi Environnemental par Satellite, nom du projet de cette étude.
- ✚ **Sentinel-Hub** : plateforme d'exploitation et visualisation des produits Sentinel
- ✚ **SI/SIG** : Système d'Information/Système d'Information Géographique
- ✚ **TCI** : True Colour Image ; équivalent à **RVB** : Rouge Vert Bleu
- ✚ **THRS** : Très Haute Résolution Spatiale
- ✚ **TOA** : Top-of-the-Atmospher
- ✚ **WV** : Water Vapour map

1. INTRODUCTION

1.1. La problématique des eaux côtières du parc

Le PNM du GdL se situe entre le Cap Leucate et la frontière espagnole et comprend 35 km de côte rocheuse et 65 km de côte sableuses. Il abrite plusieurs écosystèmes particuliers reconnus dont 4 zones Natura 2000, une réserve naturelle marine au Cap Cerbère, plusieurs sites du Conservatoire du Littoral, mais aussi 3 canyons sous-marins au large connus pour leur richesse en poissons et cétacés du fait des courants. Les écosystèmes littoraux sont soumis à des pressions anthropiques avec de nombreux ports de plaisance, des stations balnéaires et des afflux touristiques particulièrement importants lors de la période estivale. Les eaux du parc sont également soumises à des pressions physiques fortes lors des périodes de crues des petits fleuves côtiers que sont le Tech, la Têt, et l'Agly (et plus anecdotiquement le Bourdigou), ou bien parfois lors des phases d'agitation avec de fortes vagues (tempêtes). Les phases de travaux et construction du littoral ont aussi un impact sur la turbidité et la qualité des eaux côtières, mais ce point est traité dans le rapport de phase 4 du projet SENVISAT (impacts anthropiques, et détection des posidonies / bois flottés).

Le développement de certaines pratiques agricoles ou de gestion des espaces boisés sur les bassins versants, les activités touristiques littorales et la sur-fréquentation engendrent des problèmes de pollution diffuse qui affecte la qualité des eaux et la santé des écosystèmes marins. Si une bonne qualité des eaux côtières et donc de baignade est primordiale pour l'activité touristique, elle l'est d'autant plus pour l'environnement. La gestion du PNM du GdL doit donc se faire en prenant en compte l'apport des eaux depuis le continent. L'imagerie satellite permet à ce titre de répondre à la demande de suivi des phénomènes de turbidité dans une exigence d'observation à large échelle, et ceci de manière fréquente.

Le but du projet SENVISAT est à ce propos de définir des indicateurs de suivi du littoral et des masses d'eaux côtières du PNM, ainsi que de proposer une méthodologie fiable pour évaluer régulièrement l'état de ces indicateurs.

Qu'est-ce que la turbidité ?

On entend par « panaches turbides », tout mélange de matières en suspension minérales et organiques se développant en mer. **Il s'agit d'eau troublée par des apports terrigènes** au niveau des embouchures/graus, apports constitués de particules résiduelles de végétaux, de divers matières organiques, et surtout de poussière et de sédiments fins, dont la couleur et la forme se distinguent à la surface de l'eau de par son opacité et sa différence avec l'eau de mer limpide environnante. Les panaches restent très visibles car ils flottent en surface puisqu'ils sont constitués d'eau douce, moins dense. Malgré certains phénomènes de mélange, on retrouve les panaches au large ou à plusieurs dizaines de kilomètres des embouchures, dispersés par les courants. La turbidité est un paramètre essentiel dans le développement et la répartition de la faune et de la flore côtière et marine, notamment

dans la répartition de la lumière dans la colonne d'eau, et conditionne énormément la présence de nutriment nécessaire à la vie sur le plateau continental. La turbidité, si elle est trop forte et répétée, a un impact sur les herbiers de posidonies de la côte rocheuse du parc marin et plusieurs autres organismes benthiques, dont le développement dépend de la disponibilité en lumière. **Les panaches turbides engendrent** la majorité du temps la vie, et favorisent l'apparition des blooms phytoplanctoniques, autrement dit des **efflorescences algales**, car ceux-ci charrient énormément de nutriments favorables au développement du phytoplancton (nitrates, phosphates, minéraux). Le phytoplancton désigne « l'ensemble des organismes végétaux qui demeurent en suspension dans l'eau, sans pouvoir opposer de résistance effective aux courants, et qui trouvent dans ce milieu leurs conditions normales d'existence ». La proximité des étangs (lagunes) communiquant avec le littoral marin par de nombreux graus naturels induit également un apport plus ou moins continu de nutriments, favorables à des efflorescences phytoplanctoniques.

Plusieurs études ont été menées récemment sur les panaches turbides, il existe beaucoup de travaux et thèses sur la turbidité du Rhône (récemment Gangloff et al., 2017) mais la littérature est beaucoup moins riche concernant la zone du parc naturel marin (citons par ex. la thèse de Bourrin, 2007 ; et le projet CHIFFRE en cours au CEFREM-UPVD). Néanmoins, la majorité des recherches actuelles sur la zone ne permettent pas de répondre encore aux besoins de données actualisées et produites en continu sur la zone côtière. D'où la création dans le contexte du projet SENVISAT d'une phase importante dédiée aux panaches turbides. Connaître les dynamiques saisonnières des masses d'eaux côtières et du PNM ainsi que leurs réponses aux paramètres météorologiques permet également d'anticiper leur capacité de renouvellement et donc de sensibilité aux contaminations physique ou chimique (Ganzin et al., 2010).

Dans certains cas, une aura turbide peut se développer sur les eaux de surface d'une large étendue marine (plusieurs kilomètres) **uniquement du fait du développement de phytoplanctons, ceci en l'absence totale de crues**. Dans ce cas, ce sont les courants (souvent générés par les vents) qui vont favoriser la remontée d'eaux de fond (upwellings) plus riches en nutriments, ce qui favorise rapidement le développement de la vie dans la couche euphotique.

1.2. La télédétection

L'imagerie satellitaire apporte une vue synoptique de la turbidité et permet de qualifier les eaux côtières à l'échelle du PNM qui sont en connexion avec celles de tout le plateau du Golfe du Lion. L'apport massif ponctuel des fleuves de l'Hérault, ou même du Rhône va parfois, sous le jeu des courants, impacter le périmètre du PNM. Indépendamment des crues, les populations phytoplanctoniques suivent des variations spatiales et saisonnières régulières et peuvent constituer un indicateur de l'état du PNM (Kutser, 2009; Miller and McKee, 2004). **La chl-a est une molécule biogénique dont la concentration est**

représentative de la biomasse des populations phytoplanctoniques. La chl-a est régulièrement étudiée et cartographiée par imagerie satellite, même au sein du GdL (D'Ortenzio and Ribera d'Alcalà, 2009; Siokou-Frangou et al., 2010). La chlorophylle possède sa propre signature spectrale (spectre d'absorption de certaines longueurs d'onde lié à la photosynthèse) qui permet de la détecter sur les images multispectrales enregistrés par les satellites, mais nous verrons qu'il est dans la réalité difficile d'isoler la contribution du phytoplancton à la turbidité des eaux face aux autres composés.

1.3 Les objectifs de l'étude

Le but de cette étude peut se décliner en quatre objectifs principaux : (i) effectuer une étude scientifique et technique autour de la cartographie quasi- « temps réel » la turbidité dans le GdL *via* l'imagerie satellite ; (ii) choisir une méthodologie et un indice ou un proxy de la turbidité et de la chl *a* capable d'identifier la répartition spatiale de ces variables d'intérêt ; (iii) évaluer la dynamique saisonnière des panaches turbides et des efflorescences phytoplanctoniques, ainsi que l'aire d'influence des panaches au-delà des embouchures des fleuves situés à proximité ; et enfin (iv) comprendre comment se dispersent les panaches avec les vents et courants, et comprendre si il est possible de prévoir le trajet d'un panache, qui pourrait en cas de crise contenir certains polluants.

2) Le site d'étude et son contexte

2.1. Présentation de la zone d'étude

Cette étude ne peut se limiter simplement au périmètre du parc marin qui s'étend de la frontière espagnole au cap Leucate. Les premiers résultats et les études bibliographiques ont montré qu'il est important de **considérer l'ensemble du Golfe du Lion** (Figure 3), et d'étudier la dynamique des panaches en mer, en considérant aussi la contribution des fleuves plus au nord que sont l'Aude, l'Orb et l'Hérault, mais aussi le Rhône.

L'Occitanie est la deuxième région agricole de France (16% des exploitations françaises et près de 70 000 exploitants). La forte production de fruits et légumes en Occitanie place la région en 2^{ème} position à l'échelle française dans cette catégorie. C'est aussi la première région viticole de France. Elle représente 34% des surfaces du territoire national dédiées à la production de vin. Les vignes sont en particulier très présentes sur les plaines littorales et connaître l'occupation et les usages du sol permet de comprendre quels sont les risques de pollutions diffuses des cours d'eau, de ruissellement et donc de charges sédimentaires qui débouchent ensuite dans le Golfe du Lion et peuvent être à l'origine de panaches turbides et de blooms phytoplanctoniques. En Occitanie, la plaine littorale concentre aussi l'essentiel

des urbanisations, et l'essentiel des rejets urbains et industriels dans les fleuves ou dans les lagunes, ce qui a pour conséquence de favoriser l'eutrophisation des eaux.



Figure 3 : Carte de localisation du Golfe du Lion (aire d'étude des panaches et blooms phytoplanctoniques)

2.2. Climatologie

Le climat méditerranéen se caractérise par des écarts de température et de précipitation très importants tout au long de l'année (Figure 4). Le printemps est généralement sec et peu nuageux mais certains jours peuvent s'abattre spontanément des pluies torrentielles en dehors des périodes sèches de Tramontane (vent d'ouest à nord-ouest) et de Mistral (vent de nord). L'été est chaud et sec avec néanmoins quelques épisodes de Tramontane/Mistral. L'automne est en comparaison généralement agité avec de nombreuses tempêtes, des forts vents marins et des épisodes « cévenols » comprenant des pluies torrentielles, des crues et des inondations sur le littoral se produisant fréquemment autour du mois d'octobre-novembre. L'hiver est en moyenne légèrement moins chargé en pluie, mais c'est aussi la période des plus forts vents, et des fortes instabilités créant les tempêtes marines de « Levante » sur la Catalogne accompagnées de très fortes pluies sur les versants des Corbières et les contreforts des Pyrénées (Gervais et Trmal, à paraître).

Climatogramme de Gruissan (station de référence : Perpignan)



Figure 4 : diagramme ombrothermique de Gruissan (station de référence : Perpignan) d'après les données de Météo-France

D'une manière générale l'agitation des masses d'eaux est particulièrement forte entre l'automne et l'hiver, et la hauteur significative (H_s) des vagues atteint plus de 3 m lors des tempêtes, même si la majorité du temps elle est < à 0,8 m (Gervais et al., 2012).

En Méditerranée, le niveau de la mer est davantage lié aux phénomènes météorologiques qu'aux ondes de marée. Des phénomènes de décote poussée par la Tramontane et le Mistral et des hautes pressions, ou à l'inverse des surcotes provoquées par les vents marins et des basses pressions, dépassent en amplitude largement le marnage. L'amplitude de la marée ne dépasse pas 0,3 m tandis que les variations liées aux surcotes météorologiques peuvent atteindre presque 1 m (Gervais, 2012).

2.3. Courantologie sur le plateau

Les courants de surface sur le plateau du golfe du Lion sont liés aux vents et sont responsables du renouvellement des eaux côtières du Golfe du Lion et également de la dispersion au large des sédiments ou des blooms en suspension sur la côte. En général, la courantologie du domaine du plateau est relativement déconnectée des grands courants du large. Le courant majeur du large est ici le courant Liguro-Provençal-Catalan, ou « Courant Nord Méditerranée » (CNM) qui entraîne les eaux de surface de la Corse à l'Espagne, en longeant le talus continental du Golfe du Lion, et en terminant sa course au sud de la péninsule ibérique, comme le montre la Figure 5 le 15/01/2018 d'après un modèle de prévision numérique.

Les courants qui agissent dans cette étude sont essentiellement liés aux vents et à l'influence rare du CNM. Les vagues n'agissent que sur le domaine de la plage et sont un phénomène plus marginal dans le déplacement des panaches.

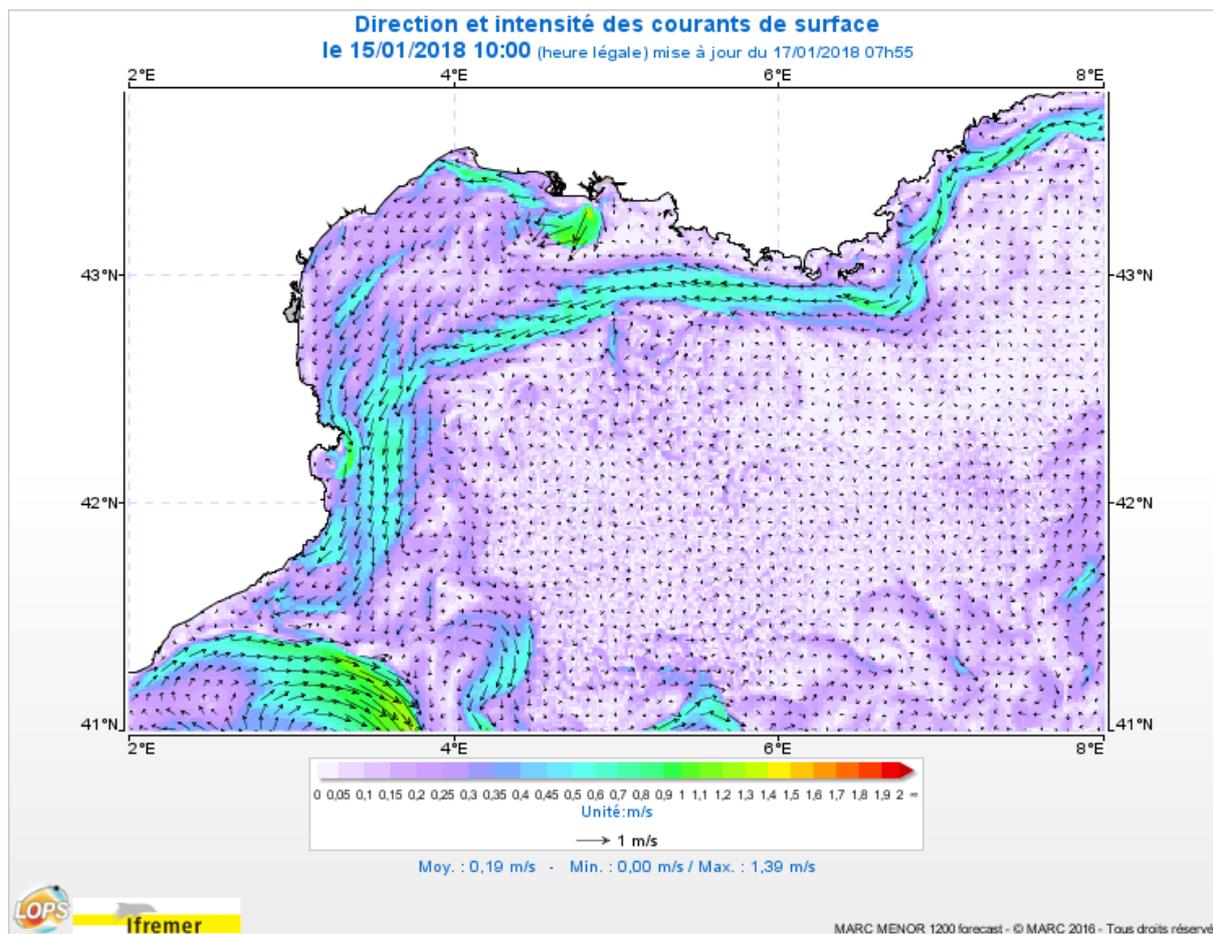


Figure 5 : Illustration du Courant Nord-Méditerranéen très marqué en hiver, comme le 15 janvier 2018, d'après le modèle MARS-3D développé par l'IFREMER.

Source : http://marc.ifremer.fr/resultats/courants/modele_mars3d_mediterranee#result_infos0

A certaines occasions le CNM pénètre sur le plateau en créant des branches et déviations en marge de son trajet principal. Mais les principales cellules de courant sont liées initialement aux vents locaux, mais avec une certaine inertie des phénomènes et une forte complexité, peu intuitive, du lien entre courant tridimensionnels et champs de vent.

On observe une importante variabilité saisonnière de la circulation océanique du Golfe d'après les diverses modélisations et notamment celle d'A. Doglioli (2014). En hiver, la formation d'eau dense avec les vents de terre est flagrante et le CNM est plus intense. Les structures tourbillonnaires sont aussi bien visibles. En revanche, la période estivale marque une accalmie. En effet, en été les vents dominants faiblissent donc les eaux résident plus longtemps et ne se densifient pas. Le CNM est alors moins marqué.



*Dynamiques et évolution du littoral
Synthèse des connaissances*

Circulation générale de surface dans la mer Méditerranée

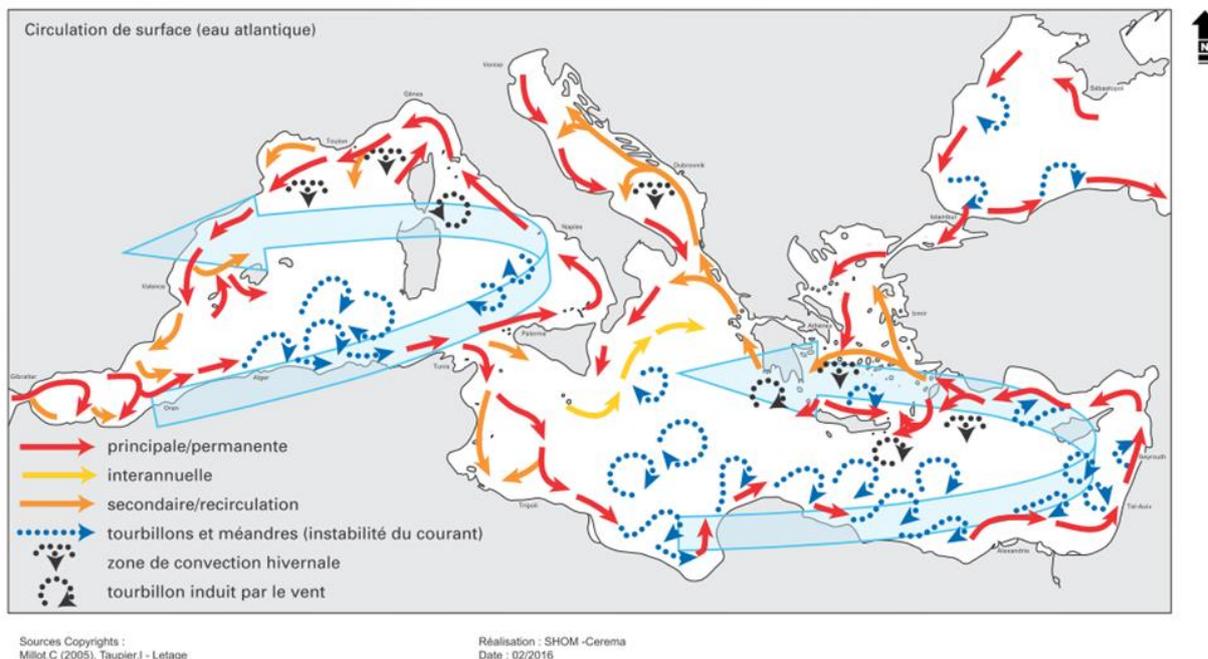


Figure 6 : circulation générale des masses d'eau de surface en Méditerranée d'après Millot (2005)

Les intrusions des courants du large provoque des forts tourbillons sur le plateau : dites aussi « cellules de courant / instabilités méso-échelles », et parfois une circulation inverse à la circulation moyenne. **Habituellement, et en particulier lors des tempêtes de vents/houles d'est qui génèrent des fortes crues et des panaches, le courant est dirigé vers le sud, mais dans certains cas, les courants remontent vers le nord** sur une bande de plusieurs dizaines de kilomètres depuis les côtes, du fait justement des tourbillons de courant.

2.4 Les rivières et leurs embouchures, et les graus des étangs

Tableau 1 : Caractéristiques principales des fleuves du PNM, des fleuves héraultais et du Rhône (source Hydro-France)

	Tech	Têt	Agly	Aude	Orb	Hérault	Rhône
Bassin versant (km ²)	729	1 300	1 053	5 200	1 330	2 550	95 590
Débit atteint 80% du temps (m ³ /s)	1,4	2,1	0,4	4,8	6,5	3,4	839,2
Débit atteint 10% du temps (m ³ /s)	11,2	16,4	9,4	66,6	45,5	63,2	3019,0
Débit atteint une fois tous les 365 jours (m ³ /s)	143	160	185	403	430	625	5617

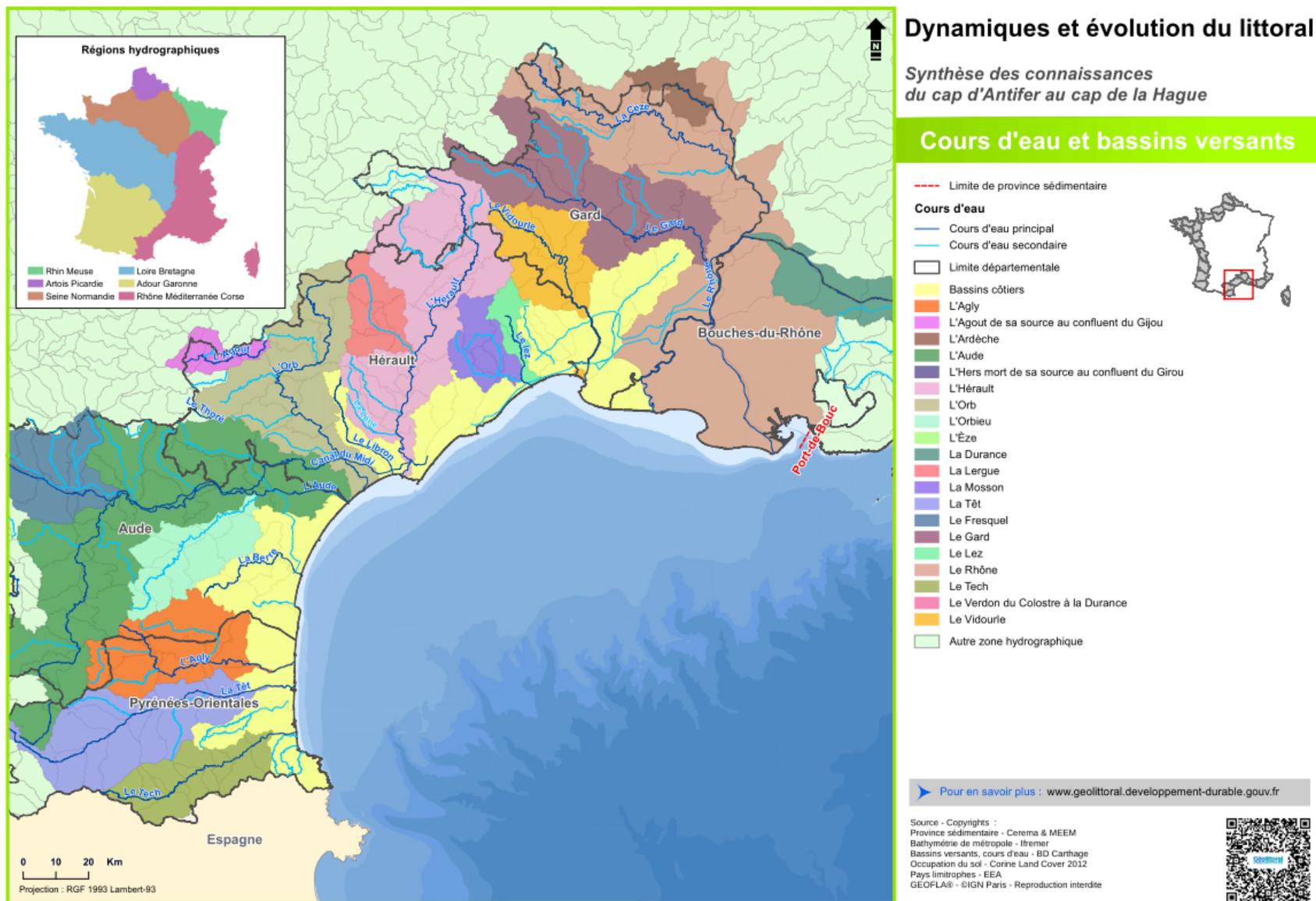


Figure 7 : carte des principaux bassins versants des fleuves côtiers qui influencent la qualité des eaux du PNM et de l'ouest du Golfe du Lion

Les débits annuels des trois fleuves du PNM et des 3 fleuves cités suivent une dynamique saisonnière à mettre en parallèle avec la pluviométrie (cf. Figure 4 et Figure 8). Les débits sont en moyenne plus importants pour les fleuves au nord du PNM, mais dans tous les cas, des épisodes de crues exceptionnels peuvent dépasser les 300 m³/s. Ces crues font suite très rapidement aux épisodes de pluies torrentielles, comme cela a pu être le cas en 1940 avec l'Aiguat meurtrier tombé le Roussillon, où les débits instantanés maximum des petits cours d'eau littoraux ont atteint des sommets : 2 800 m³/s pour le Tech, 3 600 m³/s pour la Têt et 2000 m³/s pour l'Agly (Durand, 1999 d'après Pardé, 1941). Parmi les trois fleuves côtiers du PNM, l'Agly a le plus haut débit de crue avec certains records de plus de 600 m³/s. Le Rhône domine largement les autres petits fleuves côtiers, avec un débit journalier qui atteint plus de 5000 m³/s en période de crue et descend rarement en-dessous de 1000 m³/s en période d'étiage (Banque Hydro Eau de France, 2018).

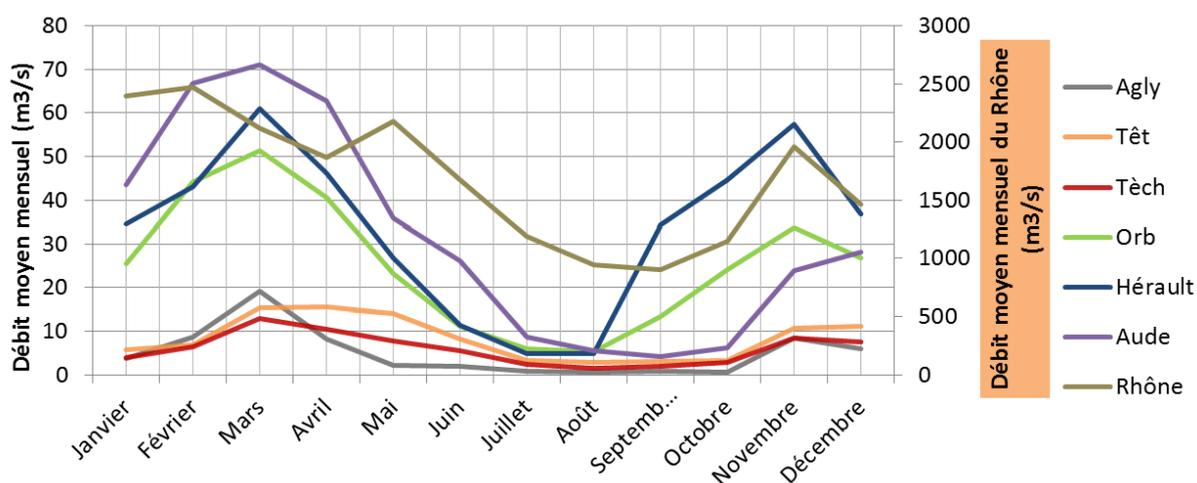


Figure 8 : Profils saisonniers des débits moyens mensuels des trois fleuves du PNM (Tèch, Têt, Agly), des trois fleuves du Narbonnais / Ouest-Hérault (Orb, Hérault, Aude) et du Rhône (échelle adaptée sur l'axe vertical de droite).
Source : Banque Hydro Eau France

Les fleuves côtiers apportent des MES en mer et des sédiments plus grossiers qui constituent les cordons littoraux et les plages. Si aujourd'hui l'apport de sables et graviers est presque nul en raison de la construction des barrages et seuils sur les cours d'eau, on distingue encore en mer certains « pro-deltas » qui sont des accumulations de vases et de sylts entre 10 et 60 m de profondeur devant les embouchures de chacun des petits fleuves côtiers (cf. Figure 9). **Ces prodeltas sont la preuve de l'influence des panaches turbides, soit des épisodes de crues passés, sur la nature des fonds et des habitats benthiques.**

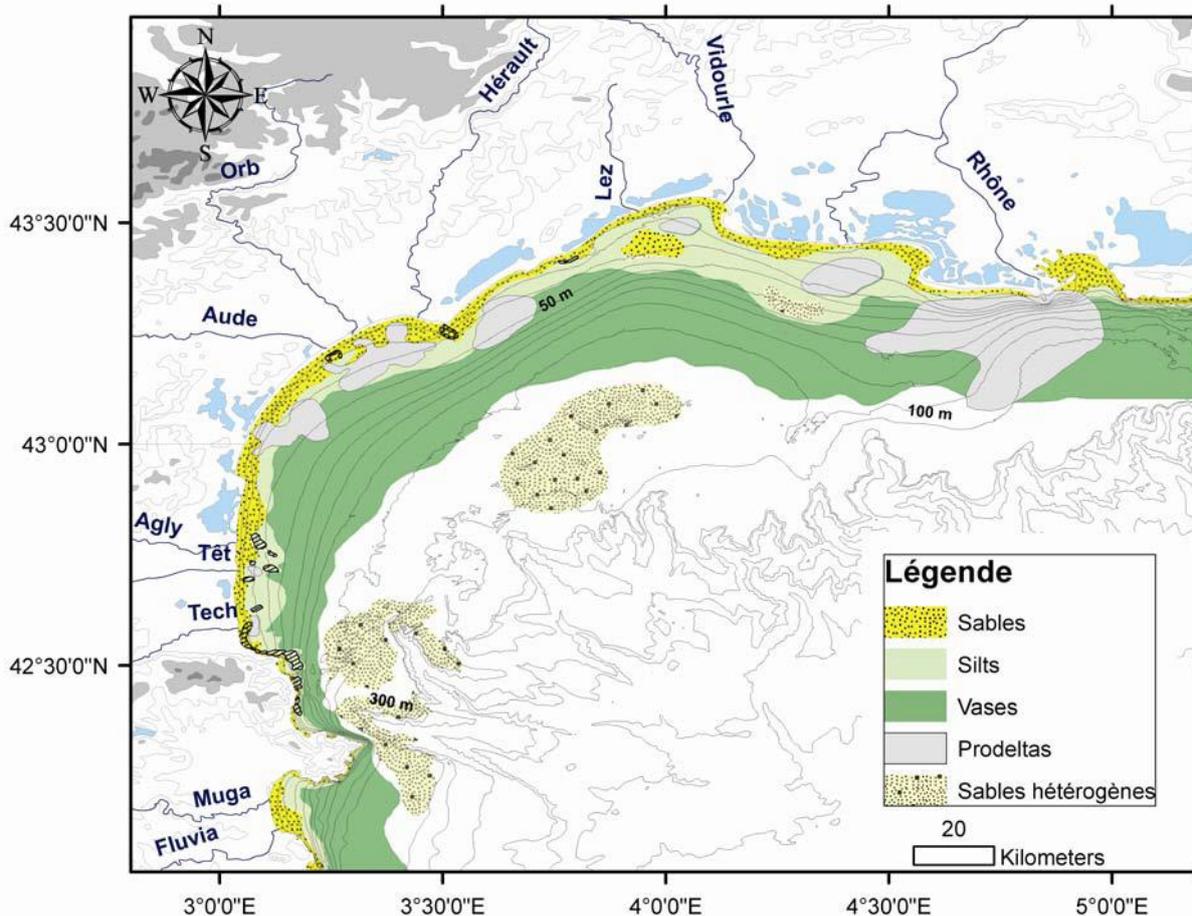


Figure 9 : Répartition des sédiments du Golfe du Lion (Source : Bourrin, 2007)

Parmi les fleuves côtiers les plus longs, il est possible de distinguer deux sources différentes : ceux prenant leurs sources dans les Pyrénées (par exemple le Tech, la Têt et l'Aude) et ceux situés entre les précédents et le Rhône, prenant leurs sources dans les parapets montagneux méridionaux de la montagne Noire aux Cévennes (par exemple l'Hérault, l'Orb). Dans la partie centrale de la province, d'autres petits cours d'eau prennent leurs sources dans des massifs proches de la mer, comme par exemple l'Agly qui prend sa source dans le massif calcaire des Corbières. L'Aude traverse de nombreuses terres agricoles en plaine, terres constituées de marnes, et il est fréquent que malgré de faibles débits un orage sur la plaine provoque une eau très trouble à son embouchure.

Le Tableau 2 suivant montre que l'Aude a une part importante dans l'apport de MES, de même que l'Agly pour les 3 fleuves du sud qui débouchent directement dans le PNM.

Des modélisations couplées à des mesures *in situ* ont montré que la charge sédimentaire des différents fleuves côtiers, dont le Rhône, suit une dynamique exponentielle : elle diminue de moitié dès la fin des tempêtes mais la concentration en MES résiduelle reste ensuite haute pendant plusieurs jours (Ulses, 2005; Ulses et al., 2008).

Tableau 2: Apports fluviaux des principaux cours d'eau de la province

Cours d'eau	Nature du terrain du bassin versant	Débit solide annuelle (MES)	Débit solide annuelle (fraction grossière) ou charge de fond
Le Tech	Roches cristallines et métamorphiques	32 000 t/an ⁽⁵⁾	entre 1000 et 18 000 m ³ /an ⁽⁶⁾
La Têt	Roches cristallines et métamorphiques	61 000 t/an ⁽⁵⁾	55 500 m ³ /an à Vinça (42 km de la mer, galets, graviers) ⁽¹⁾ entre 18 500 et 34 000 m ³ /an ⁽⁶⁾
L'Agly	Roches cristallines et métamorphiques en faible proportion, calcaires et marnes	98 000 t/an ⁽⁵⁾	41 500 t/an à Caramany (41,5 km de la mer, galets, graviers) ⁽¹⁾ entre 1000 et 5200 m ³ /an ⁽⁶⁾
L'Aude	Roches cristallines et métamorphiques en faible proportion, calcaires, marnes et molasses	194 000 t/an ⁽⁵⁾	80 000 à 100 000 m ³ /an ⁽²⁾
L'Orb	Roches cristallines et métamorphiques en faible proportion, calcaires, marnes et molasses	110 000 t/an ⁽⁵⁾	80 000 à 100 000 m ³ /an ⁽²⁾
L'Hérault	Roches cristallines et métamorphiques en faible proportion, calcaires, marnes et molasses	88 000 t/an ⁽⁵⁾	Pas de données
Le Rhône	Roches cristallines et métamorphiques	7 390 000 t/an ⁽⁴⁾ 10 147 000 t/an ⁽⁵⁾ 6 à 14 000 000 t/an ⁽⁷⁾	11 000 à 16 000 m ³ /an ⁽³⁾ 230 000 à 4 120 000 m ³ /an ⁽⁷⁾

Sources :

(1) D.D.A.F. des Pyrénées-Orientales : extrapolations à partir de mesures par traceurs radioactifs)

(2) (BCEOM, 1997) : pas d'éléments sur la méthode d'estimation

(3) (IRS, 2000 ; Suanez, 1997 ; Sabatier, 2001)

(4) (Pont et al., 2002)

(5) (Bourrin, 2007) : calcul entre 1977 et 2004

(6) (Aleman, 2013) : pas d'indication sur la provenance des chiffres

(7) Synthèse bibliographique réalisée par (Maillet et al., 2007)

En termes de contribution plus anecdotiques la majorité du temps, mais parfois notable, il peut être souligné l'importance des apports en turbidité dans le Golfe d'Aigues-Mortes des fleuves du complexe Lez-Mosson et l'apport du Vidourle. Plus proche du périmètre du PNM, il est fréquent que le grau de l'étang de Canet, ou le grau de la vieille Nouvelle (étang d'Ayrolle, qui est l'exutoire du complexe lagunaire du Narbonnais dans lequel se jette la rivière la Berre) expulsent des quantités importantes de MES en mer.

3) Les sources de données satellites existantes et les nouvelles possibilités

3.1. Les différents capteurs satellites utiles pour la colorimétrie des océans – le choix des images source Sentinel 2

Une dizaine de satellites est actuellement en orbite autour de la terre et configurée pour la mesure des paramètres de la couleur de l'océan (Tableau 3) mais peu regroupent les caractéristiques optimales pour cette étude. Les capteurs MODIS/Terra ou MODIS/Aqua, et MERIS/EnviSat, respectivement de l'Administration Nationale américaine de l'Aéronautique et de l'Espace (NASA) et de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), seraient adaptés pour une étude rétrospective. Cependant, la présente étude mise sur **un suivi environnemental du domaine côtier qui implique des résolutions spatiales plus élevées**, résolutions si possibles inférieures ou égales à 10 m. Les données des satellites cités précédemment sont utilisées dans les modèles et produits fournis par de nombreux sites dont, en France, les consortiums Copernicus et MARC qui traitent et rendent disponibles au grand public des cartes journalières de la turbidité et de la chlorophylle-a dans le Golfe du Lion. La résolution spatiale desdits produits avoisine 1 km, c'est pourquoi l'utilisation et le traitement d'images d'autres SAS a été envisagé (SAS : satellites d'acquisition systématique ; leur accès quasi-libre est un atout financier). Ces plateformes fournissent toutefois rapidement une vision synoptique des phénomènes qui permet de cibler ensuite les zones d'intérêt sur lequel il faut porter une analyse plus fine.

Pour cette étude, les satellites de la **constellation Sentinel-2 (S2)** semblent les plus adaptés : la résolution spatiale des images est fine (HR = 10 m) et permet d'apprécier la forme des panaches turbides et le gradient de concentration sur la côte. **Le point essentiel est que cette donnée permet d'étudier en détail le lien des panaches avec le domaine littoral (0 à -20 m) et le continent** : en particulier avec les embouchures ou les graus, voir les brèches qui s'ouvrent lors des tempêtes dans les dunes et qui relie la mer à une zone humide, ce qui provoque occasionnellement des échanges d'eaux turbides.

Face aux données plus fines des satellites Pléiades, les données de S2 présentent l'avantage d'être **gratuites** et de couvrir des surfaces marines plus grandes que celles que pourrait réaliser Pléiades en commandant une fauchée. Les bandes spectrales de S2 sont, de plus, nombreuses et utiles à l'étude de la turbidité et du phytoplancton (i. e. B02 à 494nm ; B03 à 560nm ; B04 665nm ; B08 834nm ; voir Tableau 4). Quatre tuiles de 100 x 100 km (ex. : 4 dalles S-2A) sont nécessaires pour couvrir l'ensemble du GdL : T31TEH, T31TEJ, T31TFH et T31TFJ, la première comprend particulièrement le PNM du GdL.

Tableau 3 : les différents satellites et capteurs utilisables pour l'étude de la couleur des océans (interprétation de la turbidité et de la chlorophylle-a)

Agence spatiale	Capteur/satellite	Durée de mission	Bandes spectrales	λ (nm)	Résolution spatiale(m)	Acquisition	Résolution temporelle
NASA	MODIS/Terra	1999 – ajd	9	412 - 6240	250 à 1000	SAS (satellite d'acquisition systématique)	1 à 2 jours
	MODIS/Aqua	2002 - ajd					
	OLI/LandSat8	02/2013 – ajd	9	443 - 2200	15 à 30	SAS	16 jours
	TIRS/LandSat8		2	10800 - 12000	100		
	SeaWiFS/SeaStar	08/1997 – 12/2010	8	412 - 865	1100		1 jour
ESA	MERIS/EnviSat	03/2002 – 04/2012	15	413 - 900	300 ou 1200	SAS	3 jours
	MSI/Sentinel-2A	06/2015 – ajd	12	444 - 2190	10 à 60	SAS	5 jours
	MSI/Sentinel-2B	03/2017 - ajd					
	OLCI/Sentinel-3A	02/2016 – ajd	21	400 - 1020	300	SAS	4 jours
	OLCI/Sentinel-3B	04/2018- ajd					
CNES	HRG/Spot5	05/2002 - 2015	5	595-1665	5 à 10	SAD (satellite d'acquisition à la demande)	2 à 3 jours
	VEGETATION2/Spot5		4	450-1580	1000		
	PHR/Pléiades 1A	12/2011 – ajd	2	490 - 560	0,5	SAD	Revisite quasi-journalière
	PHR/Pléiades 1B	12/2012 – ajd	3	645 - 840			
Airbus Defence and Space	Naomi/Spot6	09/2012 - ajd	5	485 – 825	1,5 à 6	SAD	2-3 jours
	Naomi/Spot7						

Tableau 4: Caractéristiques des capteurs MSI des 2 satellites Sentinel-2 (A et B) sélectionnés comme source des images dans cette étude à haute résolution spatiale

Capteur/satellite	Durée de mission	Fauchée (km)	Bandes spectrales	λ centrale (nm)	Résolution spatiale (m)	Résolution temporelle
MSI/Sentinel-2A et /Sentinel-2B	Juin 2015 - 2022	290	B01 –Aérosols	444nm (± 14 nm)	60	SAS 5 jours
			B02 – Bleu	494nm (± 49 nm)		
	Mars 2017 - 2024		B03 - Vert	560nm (± 23 nm)	10	
			B04 - Rouge	665nm (± 19 nm)		
	B05		704nm (± 10 nm)	20		
	B06		740nm (± 9 nm)			
	B07		781nm (± 14 nm)	10		
	B08		834nm (± 19 nm)			
	B08A		865nm (± 17 nm)	20		
	B09		945nm (± 13 nm)			
	B10 - Cirrus		1375nm (± 38 nm)	60		
	B11		1610nm (± 72 nm)			
B12	2190nm (± 121 nm)	20				

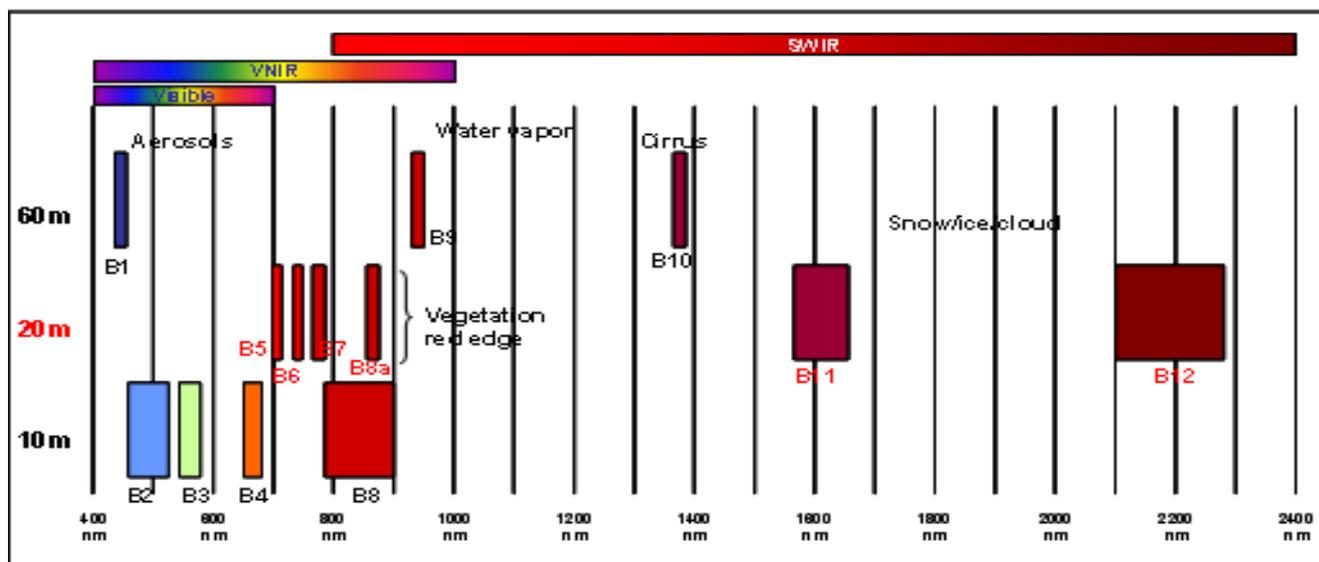


Figure 10 : le positionnement des différentes bandes spectrales mesurées par le capteur de Sentinel-2 dans le domaine visible et non-visible

3.2. Les données satellites de turbidité/chl-a déjà disponibles sur internet

La Plateforme Marine-Copernicus (marine.copernicus.eu)

Afin d'avoir à sa disposition un système opérationnel et autonome d'observation de la Terre, l'Union Européenne, l'ESA et l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) ont mis en place le programme Copernicus, anciennement « Observation et surveillance de la Terre pour l'Environnement et la Sécurité » (GMES). L'un des services que propose Copernicus est la mise à disposition d'indicateurs et de produits satellites à haute résolution temporelle et moyenne résolution spatiale, étudiant plusieurs variables marines d'intérêt dont le phytoplancton et la turbidité (en lien avec le consortium Mercator Ocean). Ces produits calculés à partir d'images des satellites MODIS/Aqua, /Terra et VIIRS/Suomi-NPP sont visualisables gratuitement et téléchargeables librement sous réserve d'indiquer le contexte d'utilisation.

Trois produits présentent un intérêt pour cette étude :

- Produit 009_038 :

○ Kd490

A partir du ratio de la réflectance¹ Rrs à 490 nm et 555 nm (couleurs bleues et vertes) mesurées par des capteurs embarqués sur les trois satellites précédemment cités, le coefficient d'atténuation de la lumière à 490 nm (Kd490), représentatif de la turbidité, est calculé selon la méthode de Lee et al. (2002).

○ Adg443

A partir des mêmes images-sources et selon la même méthode (Lee et al., 2002), le coefficient d'absorption à 443 nm est calculé. Il correspond à l'absorption due aux particules jaunes et au matériel détritique, excluant la participation du phytoplancton, contrairement au Kd490 qui tient compte de l'ensemble des particules présentes dans l'EDM.

- Produit 009_041 – chl

La source des images est la même que les deux jeux de données précédents, avec les capteurs MODIS/Aqua, /Terra et VIIRS/Suomi-NPP (traitement de niveau 4), mais aussi le capteur Sentinel3-OLCI (niveau-3). Pour calculer la concentration en chlorophylle, une discrimination entre les eaux ouvertes, dites de type 1, et côtières,

¹ Réflectance : Proportion d'énergie lumineuse réfléchiée par une surface par rapport à celle reçue. On peut également l'exprimer comme le ratio entre la luminance remontant et l'éclairement descendant. Elle ne dépend pas de l'éclairement reçu mais de l'angle d'observation et de la longueur d'onde.

de type 2, est tout d'abord effectuée puis le meilleur ratio des bandes spectrales à 443, 490 et 510 nm avec celle à 555 nm est choisi pour ensuite être intégré dans une équation d'ordre 4 dont les coefficients varient suivant le classement des eaux (Volpe et al., 2012). Ce travail sur les indices permet ensuite d'exprimer la concentration de chlorophylle-a en $\text{mg} \times \text{m}^{-3}$.

Au final, afin de discriminer la contribution des matières détritiques (+ particules jaune) de la contribution du phytoplancton (via l'activité chlorophyllienne), **Copernicus utilise différentes bandes spectrales dans les longueurs d'ondes des couleurs bleues et bleues/vertes : 443, 490 et 510 nm.** Cet objectif est rendu possible car le capteur utilisé cible de manière séparée et étroite la réception de ces bandes.

→ Il ne sera pas possible de séparer les différents composants de la turbidité avec Sentinel-2 car son capteur n'est pas « spécialisé » pour les applications sur le suivi de l'Océan.

La résolution spatiale de ces produits est d'1 km^2 , tandis que leur résolution temporelle est d'un jour. Une interpolation permet de produire des cartes quotidiennes malgré le temps de révolution des satellites pouvant aller jusqu'à deux jours. Malheureusement, il est fréquent que du fait de la présence de nuages les données sur la turbidité présentent des trous, ceci en partie ou en totalité de la surface du Golfe du Lion. Les données concernant la chlorophylle-a sont des données interpolées et ne présentent pas de trous.

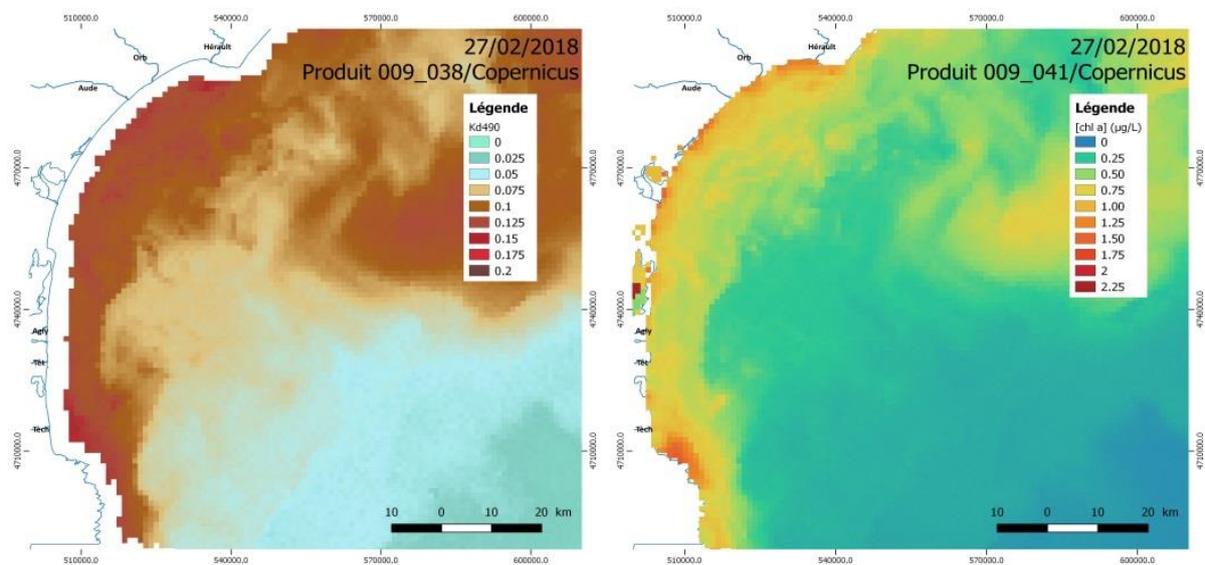


Figure 11 : Exemple de cartes produites à partir des données des produits Copernicus du 27/02/2018 (données téléchargées) montrant la turbidité (à gauche, indice Kd490), et la production phytoplanctonique avec le paramètre de la chlorophylle-a (à droite ; chl-a en $\mu\text{g/l}$)

Afin de travailler de notre côté à **une validation des traitements des images Sentinel 2** et étudier auparavant la dynamique saisonnière des phénomènes de panaches turbides et blooms phytoplanctoniques, les données quotidiennes de Copernicus de Kd490, Adg443 et [chl a] ont été téléchargées et consultées sur une période remontant à 2017. Pour comprendre la dynamique spatiale et événementielle des panaches, les valeurs des **trois variables d'intérêt ont été extraites pour chaque jour entre janvier 2017 et juin 2018 aux points d'échantillonnage présentés dans la Figure 12 essentiellement placés au droit des fleuves**. Au total, ce sont 4 668 valeurs de Kd490, 4 545 d'Adg443 et 18 489 estimations de la [chl a] qui ont été exploitées. Suite à la caractérisation des séries temporelles de ces différentes variables les mesures échantillonnées de Copernicus et du réseau de mesure *in-situ* PhytObs ont été comparées.

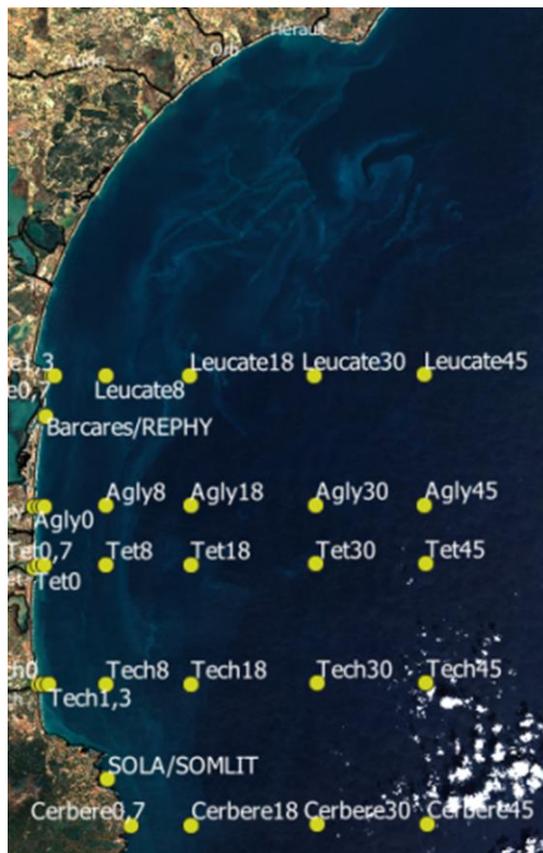


Figure 12 : position des extractions des points des grilles de données Copernicus pour créer une série temporelle de turbidité en 2017-2018 devant les principaux fleuves, à différentes distances du bord, ainsi qu'au niveau des points de mesure in-situ (sondes multiparamètres en mer, décrites ci-après)

Plateforme MARC (marc.ifremer.fr)

De manière similaire à Copernicus, Le projet de Modélisation et Analyse pour la Recherche Côtière géré par le laboratoire LOPS et l'Ifremer fournit des observations satellites de la turbidité et de la chlorophylle-a sur la base des observations des satellites des capteurs MERIS (ESA) et MODIS (CNES). La résolution est également d'un kilomètre, mais le produit que l'on peut afficher est « analysé » d'après les 5 derniers jours d'observations, incluant l'interpolation par des modèles. Cette technique permet de fournir une observation en continue de la turbidité (exprimée en NTU) et de la chlorophylle-a (en $\mu\text{g/l}$) avec une quasi-absence de trou dans la donnée malgré les épisodes de mauvais temps.

Les indices utilisés sont aussi légèrement différents et développés par les chercheurs de l'Ifremer.

Les cartes et prévisions fournis par MARC (incluant aussi la prévision d'un modèle de courant) ont beaucoup été utilisées dans cette étude, néanmoins les données sont nettement plus difficiles à être extraites et téléchargées pour travailler dans un SIG et confronter cette données directement avec nos nouvelles interprétations faites sur les images Sentinel-2, et ainsi mieux suivre et comprendre les limites spatiales des panaches.

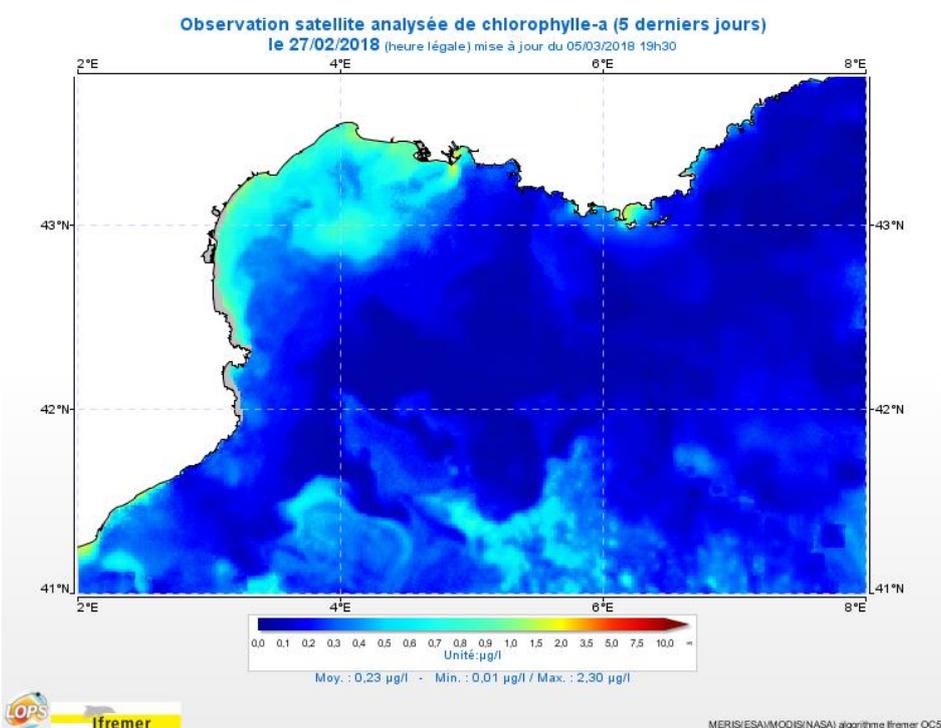
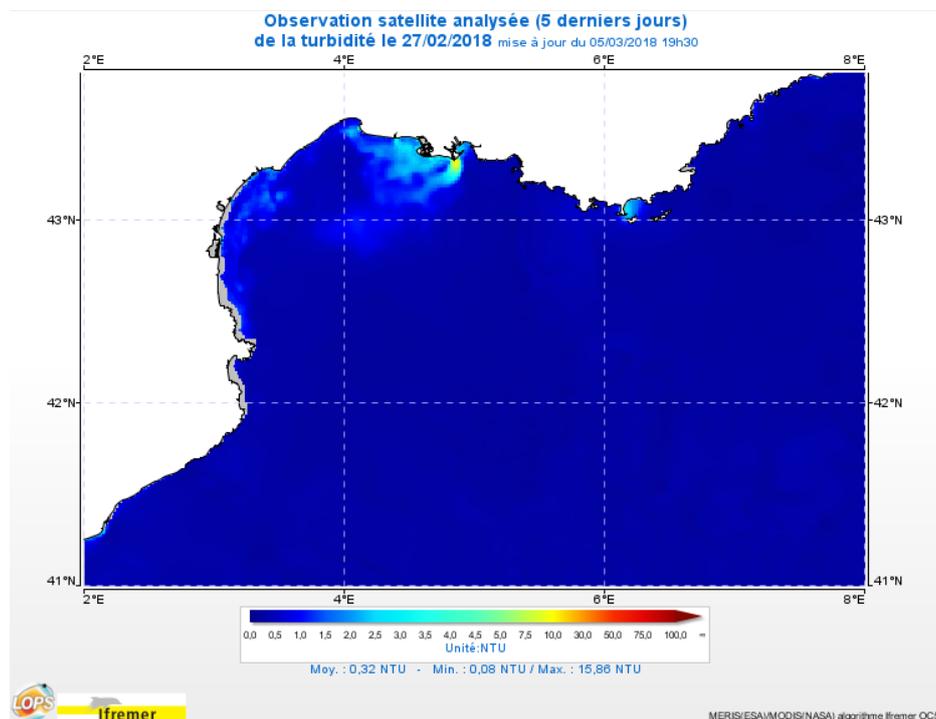


Figure 13 : produits de turbidité (en haut) et de concentration en chl-a (en bas) datés du 27/02/2018 fournis par le projet MARC (LOPS et Ifremer) d'après des Observations satellites et des interpolations.

3.3. Extraction des images Sentinel 2

Les images Sentinel-2 sont gratuites et en libre accès sur les portails tels que Théia² ou Copernicus³. Les images ont subies déjà les traitements nécessaires à leur utilisation pour la dynamique de l'océan (Orthorectification, corrections « Bottom-of-the-Atmosphere » : BOA). Ce niveau de corrections porte l'appellation « Level-2A » ou « L2A » et constitue le niveau de prétraitement le plus élevé.

Appartenant à l'Agence Spatiale Européenne (ESA), ce satellite permet une fauchée de 290 km tous les 5 jours avec une résolution de 10 m au sol pour les bandes qui nous intéressent : la bleue (B02), la verte (B03), la rouge (B04) et de 20 m pour la bande SCL qui permet de masquer, entre autres, la terre et les nuages lors des traitements SIG pour les images issues de la plateforme Copernicus (Copernicus fournit aussi des images brutes/traitées de plusieurs satellites).

Entre janvier 2017 et mai 2019 seulement 60 images exploitables ont pu être extraites (cf. Annexes A et B à la fin de ce document) pour le secteur du parc naturel marin du Golfe du Lion, avec 236 dalles à étudier pour replacer le parc dans des limites géographiques plus vastes. Toutes ne sont pas utilisées dans nos analyses et présentées dans ce document car certaines dates n'ont soit aucun intérêt scientifique, car il n'y a pas de panaches, soit la couverture nuageuse est trop importante (exemple en Figure 14) et aucun traitement n'est possible même si la présence d'un événement turbide est avérée. Aussi, **sur le pôle Théia, 58% des images présentent un traitement défaillant apparent** : très souvent, il manque une part importante de la tuile ou on voit la présence de stries blanches (Figure 14). Seul 34% des images présente une couverture nuageuse inférieure ou égale à 5%.

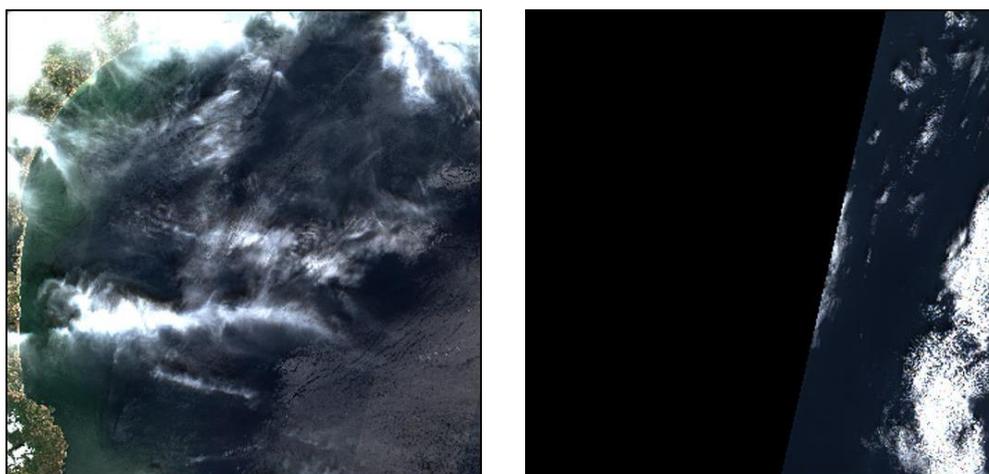


Figure 14 : illustration de cas d'images non-exploitables (nuages ou manques sur l'image)

² <https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/search?collection=SENTINEL2>

³ <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

L'annexe 2 présente la méthodologie pour le téléchargement des images Sentinel-2 sur les sites de Théia et Copernicus. Il est à signaler que les images visibles sur Sentinel-Hub n'étaient pas systématiquement disponibles au téléchargement sur Théia et Copernicus. Cependant, plus d'images se trouvaient sur Copernicus. L'utilisation de ce site s'est en pratique montrée plus simple et rapide pour acquérir les images.

Les deux plateformes n'utilisant pas les mêmes chaînes de prétraitement : les masques qui accompagnent les bandes ainsi que les traitements des bandes se sont avérés légèrement différents⁴.

Dans un second temps, afin de pousser plus loin la compréhension du déplacement des panaches avec les courants, d'autres plateformes ont aussi été consultées, avec certaines présentant l'avantage de permettre une visualisation des images d'autres satellites et d'autres capteurs (inventaire dans le Tableau 5 suivant).

⁴<https://labo.obs-mip.fr/multitemp/sentinel-2/theias-sentinel-2-l2a-product-format/> (THEIA) et <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm> (Copernicus)

Tableau 5 : COMPARATIF DES DIFFERENTS PORTAILS DE MISE A DISPOSITION D'IMAGES SATELLITES (OFFRANT DES POSSIBILITES DE VISUALISATION D'IMAGES SENTINEL – 2 MAIS AUSSI D'AUTRES SATELLITES PERMETTANT DE « TRACKER » AU JOUR LE JOUR LES PANACHES TURBIDES).

PORTAIL	Avantages	Inconvénients
Sentinel-Hub EO-Browser	<ul style="list-style-type: none"> - Pas besoin de compte pour visualiser la donnée. - Facilité à voir disponibilité des images (calendrier) et sur différents capteurs satellites. - Visualisation pleine page. - Assez intuitif - Beaucoup d'images disponibles. - Possibilité d'appliquer des indices (NDVI, NDWI, etc.) ou d'en calculer soi-même. - Différents outils disponibles : zone d'intérêt, règle, ... 	<ul style="list-style-type: none"> - bugs récurrents notamment au niveau du calendrier (les dates où des images sont disponibles sont censées être mises en avant). - recherches réinitialisées en cas de déconnexion (si inactivité pendant une dizaine de minutes). - Mais téléchargement des données brutes impossibles. - Portail en Anglais (nécessite d'être à l'aise avec cette langue).
Scihub (Copernicus) ► Choisi pour télécharger la majorité des images	<ul style="list-style-type: none"> - Facile d'utilisation (intuitif) - Visualisation avec une miniature avant téléchargement possible - Via « inspector » téléchargement des bandes et des fichiers désirés individuellement possible (moins lourd que le dossier entier). - Fiabilité des images 	<ul style="list-style-type: none"> - Vignette de visualisation de l'image moyenne voire petite, ne permet pas de voir en détail l'image, de zoomer dessus. - Lenteur - Déconnexion automatique assez rapide réinitialise la recherche en cours - Nombre maximum d'images ou de téléchargements fixé à 2 à la fois (parfois réduits à 1 quand bug). - Portail en Anglais (nécessite d'être à l'aise avec cette langue).
Théia Choisi pour télécharger les images	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche par tuile possible (ex : T31TEH) - Possibilité de zoomer sur l'image satellite sélectionnée dans la carte interactive - Portail en Français 	<ul style="list-style-type: none"> - Si recherche par tuile, seulement une à la fois (mais zone d'intérêt permet de palier à ça si on recherche plusieurs tuiles).
Earth Explorer (USGC)	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup de données disponibles (liste très longue) - Possibilité de rechercher plusieurs tuiles en même temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation peu intuitive - Seul le niveau L1C est disponible pour les images Sentinel-2A - Portail en Anglais (nécessite d'être à l'aise avec cette langue).
Pour tous les portails	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'avoir un compte pour télécharger les images satellites et justifier leur utilisation - Pas besoin de compte pour visualiser les images et faire des recherches - Pas toujours les mêmes dates proposées/images disponibles donc complémentarité entre les différents portails 	

4) Les données météo-marines en lien avec l'étude des panaches

4.1. Les données hydrographiques

Débits des fleuves



Figure 15 : interface de consultation (et téléchargement) des données de débit des fleuves « HYDRO-EAUFRANCE » (service du Ministère en lien avec les alertes inondation) avec des stations de mesure proches des embouchures pour tous les fleuves côtiers

Les débits moyens journaliers (Qjm) proviennent de la Banque Hydro⁵. Les données téléchargées sont mises à jour constamment et couvrent plusieurs dizaines d'années d'historiques. Elles prennent en compte les différents fleuves côtiers qui se déversent dans le périmètre du Parc Naturel Marin du Golfe du Lion : le Tech, la Têt et l'Agly ainsi que l'Aude, l'Orb et l'Hérault dont les embouchures se situent au Nord de la zone géographique du Parc. Les débits moyens journaliers du Rhône sont également étudiés. Les mesures proviennent des stations les plus en aval pour chaque cours d'eau, au plus près des embouchures. Elles ont essentiellement été installées par des services de l'Etat, tels que la DREAL ou la DDT, mais aussi par EDF, des organismes de recherches comme l'IRSTEA ou des universités, ainsi que par des compagnies d'aménagement méditerranéennes.

⁵ <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

Les bouées de mesure en mer (sondes multi-paramètres)

Le réseau d'observation PhytObs : SOMLIT et REPHY

Le Service d'Observation en Milieu Littoral (SOMLIT) constitue un réseau de onze bouées de surveillance réparties le long du littoral français qui sont rattachées à différentes unités de recherche. Elles mesurent 16 paramètres essentiels à la surveillance du milieu côtier dont la concentration en chlorophylle, représentative du phytoplancton, mesurée par fluorimétrie selon (Holm-Hansen et al., 1965; Yentsch and Menzel, 1963) avec une précision de $\pm 15\%$ et exprimée en $\mu\text{g/L}$. La concentration en matières en suspension⁶ (MES) est également mesurée par filtration d'un échantillon d'eau de mer (EDM) sur papier Whatmann 47 μm puis pesée, le résultat étant exprimé en mg/L (Garcia, 2014a, 2014b). Dans le Golfe du Lion, la bouée SOLA est située dans la baie de Banyuls-sur-Mer (Lat. $42^\circ 29.300' \text{ N}$; Long. $03^\circ 08.700' \text{ E}$).

On trouve 2 bouées dans le Golfe du Lion (Figure 16) :

- 1) la bouée SOLA du SOMLIT réalise des mesures à 1 km au large de la baie de **Banyuls**, et à 3 et 24 m de profondeur tous les 3 à 5 jours (Garcia, 2014a), seules les mesures dites en surface, à -3 m, sont utilisées pour cette étude. Les données sont acquises depuis janvier 1997 pour la [chl] et depuis 2003 pour les [MES]. Elles sont accessibles via le site <http://somalit-db.epoc.u-bordeaux1.fr>, uniquement sur demande. Dans le cadre de l'évaluation de la qualité des points d'échantillonnage du réseau SOMLIT utilisé pour le classement des eaux selon la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), (Ganzin et al., 2010) ont évalué que le point SOLA de Banyuls était représentatif des masses d'eaux du GdL, donc apte à être utilisée pour le suivi du PNM.
- 2) La seconde bouée intéressante est la bouée au **Barcarès** du Réseau d'Observation et de Surveillance du Phytoplancton et de l'Hydrologie (REPHY) de l'IFREMER. Grâce à la carte interactive « Surval Consultation » de l'IFREMER, les mesures du point Barcarès 095-P-002 sont téléchargeables (Lat $42^\circ 52' 28''$; Long $3^\circ 3' 26''$). Cependant, les mesures ont une faible fréquence de prise : Une à deux mesures de la [chl a] et de la turbidité par mois depuis 2015. Les mesures sont faites à 600 m de la plage.

Ces bouées sont des données précieuses pour valider les observations satellites et la méthode, mais ces données sont des échantillonnages ponctuels. Elles ne permettent pas de comprendre la source des phénomènes de turbidité et de production primaire (ex. le lien avec un apport à l'embouchure).

⁶ Les MES désignent l'ensemble des particules organiques et inorganiques, vivantes ou non, en suspension dans l'eau de mer dont la diamètre est supérieur à $50\mu\text{m}$. Plus une eau en contient, plus forte sera la turbidité. L'équivalent anglais est le Total Suspended Matter (TSM).

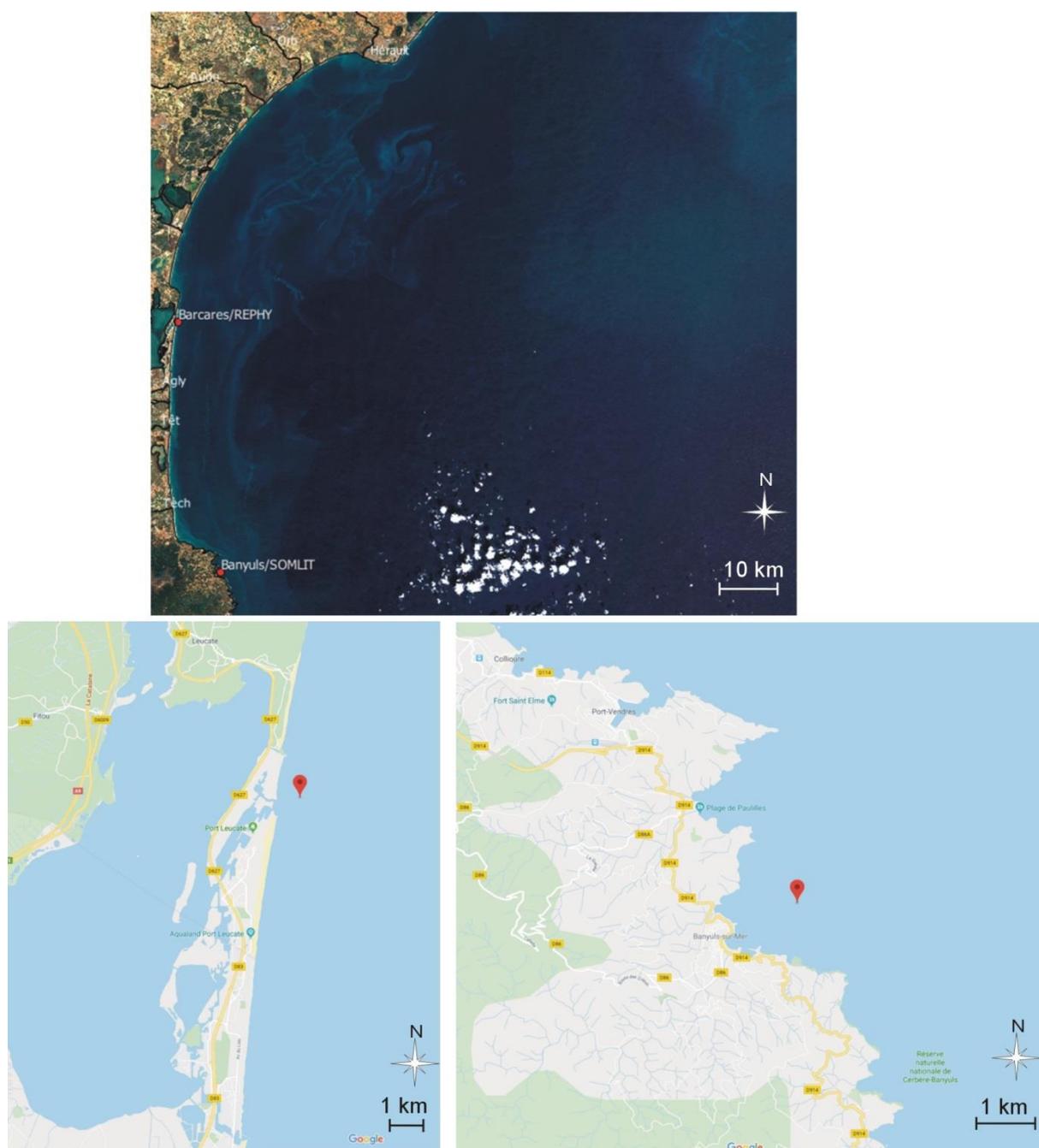


Figure 16 : Position des 2 bouées de mesure fixe de la turbidité et de la chlorophylle-a sur le domaine proche côtier au Barcarès et à Banyuls (image Sentinel 2 en haut ; cartographie google map en dessous)

Entre janvier 2015 et juin 2018, dates sur lesquelles les données ont été exploitées, la bouée de Banyuls présente une fréquence d'une mesure par semaine, tandis que la bouée du Barcarès n'affiche qu'une mesure tous les 10 jours, avec plusieurs fois des données sur la chl-a qui présentent des trous (données non acquises).

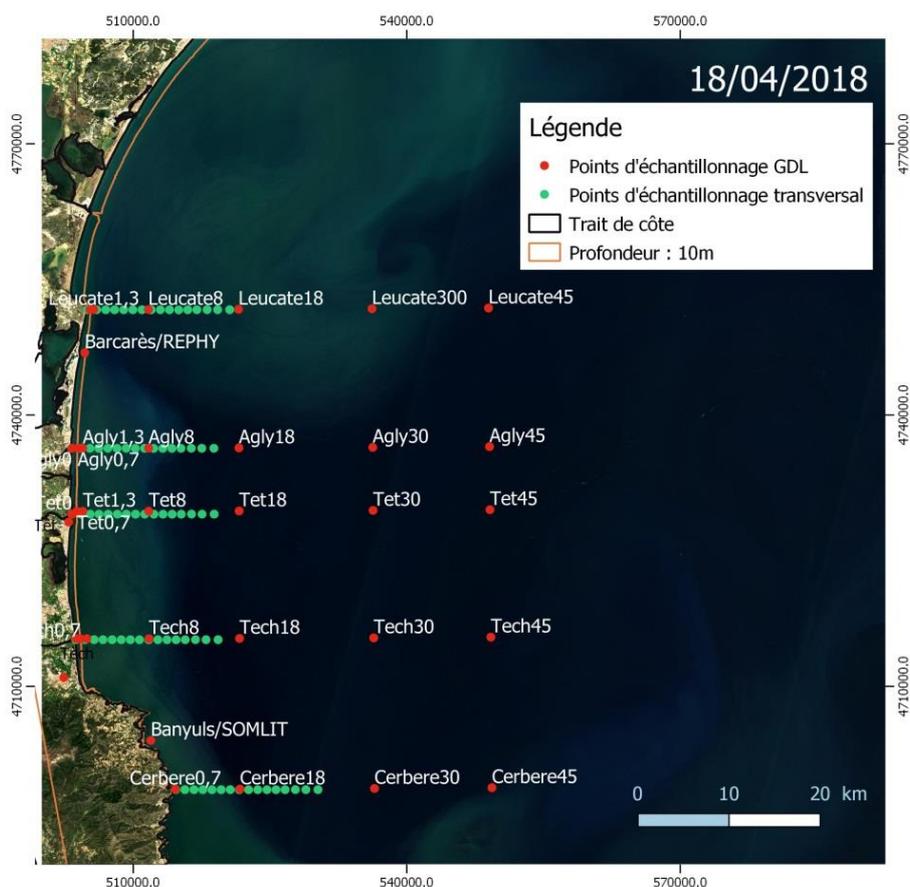


Figure 17 : Localisation des points où ont été extraits les différents valeurs du ratio RrsBleu/RrsVert (points verts et rouges), et du Kd490, d'Adg443 et de [chl a] des produits Copernicus (points rouge). (Fond Image Sat. Sentinel 2)

4.2. Les données météo marines (modélisations)

Si l'influence des houles sur la turbidité s'est révélée importante sur le domaine très proche du littoral avec le déferlement des vagues qui provoquent la remise en suspension des sédiments,... cette influence s'est montrée relativement limitée face à l'action du transport général par les courants du large des panaches turbides apportés par les fleuves.

Concernant les vents, après avoir souhaité utiliser les ré-analyses climatiques CFSR-v2 (centre météorologiques américains), nous avons pour des raisons de praticité préféré utiliser les archives du modèle de prévision global GFS de la NOAA visualisables facilement sur le site de prévisions météorologiques www.windguru.cz.

Dans cette étude, l'effet des vents sur les panaches turbides sera regardé, mais l'essentiel de l'analyse portera sur l'effet des courants du large, principal moteur du transport et du déplacement des panaches de turbidité et des blooms phytoplanctoniques.

Données de courant utilisées et téléchargées :

Si les données du modèle de courant MARS-3D du projet MARC se sont montrées les plus précises et les mieux résolues, leur lourdeur d'utilisation, la complexité du téléchargement, ainsi que l'absence de données à certaines dates nous ont finalement encouragé à travailler avec les données du modèle de courant de Copernicus. Les données MARC se sont également trouvées complexes à extraire sur la zone d'étude car l'exploitation et l'affichage des différentes variables ne peuvent pas se faire directement, nécessitant alors de passer par plusieurs étapes de calculs raster complexes. **Le produit Copernicus « MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_PHY.006.013 »** a une résolution légèrement inférieure, mais la maille de 4 km du modèle paraît satisfaisante pour décrire la courantologie de surface générale sur le plateau interne du Golfe du Lion, mise en cause dans le mouvement des panaches. Ce modèle permet entre autre d'avoir accès à de nombreux paramètres physiques comme la température et la salinité des masses d'eau.

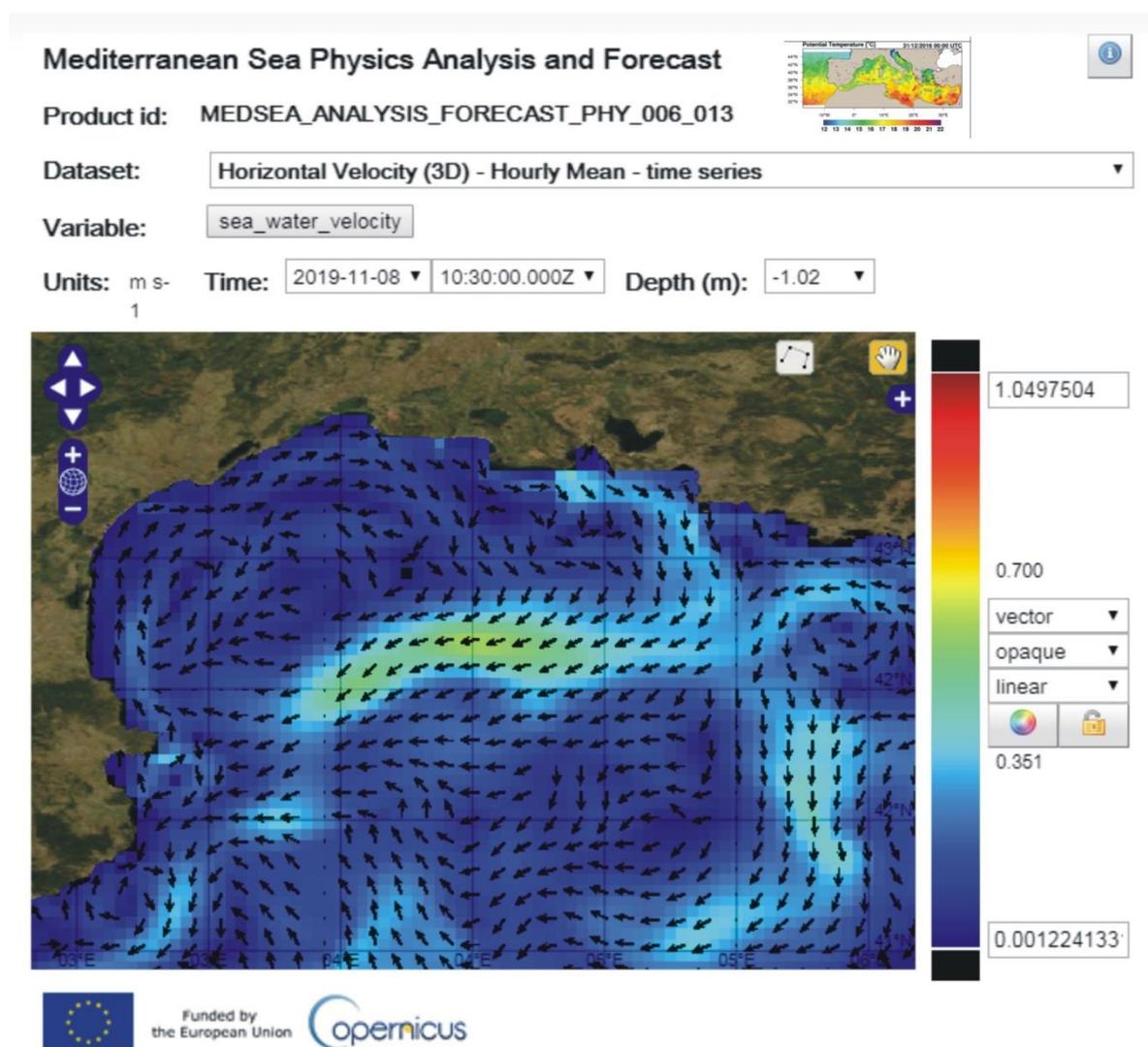


Figure 18 : exemple de visualisation des courants sur Marine-Copernicus, données qui ont été téléchargées et ré-exploitées dans cette étude pour les croisés localement dans un SIG avec les panaches turbides sur les images Sentinel 2.

5) Traitement des données - Méthodologie

5.1. Le choix de l'indice utilisé pour la turbidité

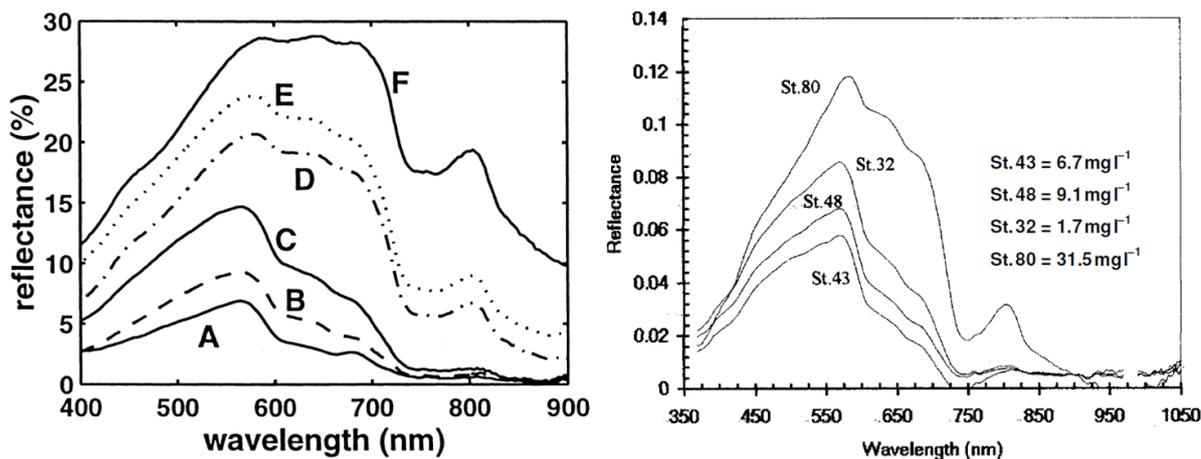


Figure 19 : Exemple de la réponse spectrale d'eaux turbides au large de deux fleuves côtiers, le Rhône à gauche (avec 3,9mg/L (A) ; 3,7mg/L (B) ; 19,1mg/L (C) ; 55,7mg/L (D) ; 56,4mg/L (E) ; 234mg/L (F)) et la Gironde à droite, entre 350nm et 1050nm à différentes concentrations de MES. Les différentes courbes/concentrations témoignent de différentes situations de débits plus ou moins forts.

La cartographie satellite de la turbidité et de la production primaire s'appuie sur les propriétés spectrales de l'eau de mer variant suivant ses composés. On peut distinguer trois principaux composés optiquement actifs :

- les **substances jaunes**, aussi appelées *gelbstoff* et comprenant les CDOM (Colored Dissolved Organic Matter), sont composées de matières organiques dégradées produisant des tanins. Ils absorbent les courtes longueurs d'onde jusqu'au bleu et réfléchissent les longueurs d'onde entre 500 nm et 700 nm (vert-jaune-orange).
- le **phytoplancton et ses produits associés**, dont la réponse spectrale dépend de la concentration en chlorophylle, du type de chlorophylle (types a, b, c) préférentiellement contenu dans les chloroplastes, ou d'autres pigments présents dans les organismes (Figure 20), ce qui variera selon le type de micro-algues (diatomées,...) et le milieu. Généralement (Figure 21) l'ensemble de la bande spectrale bleue (entre 350 et 540, centrée sur 440 nm) est absorbée, de même que

l'orange-rouge (680 nm), mais le proche infra-rouge l'est nettement moins (1000 nm).

- les **particules non-chlorophylliennes**, c'est-à-dire les apports terrigènes et les sédiments en suspension (particules minérales). En général, ces particules absorbent préférentiellement les longueurs d'onde bleue (350 à 550 nm) et le proche infra-rouge (750 à 1100 nm)

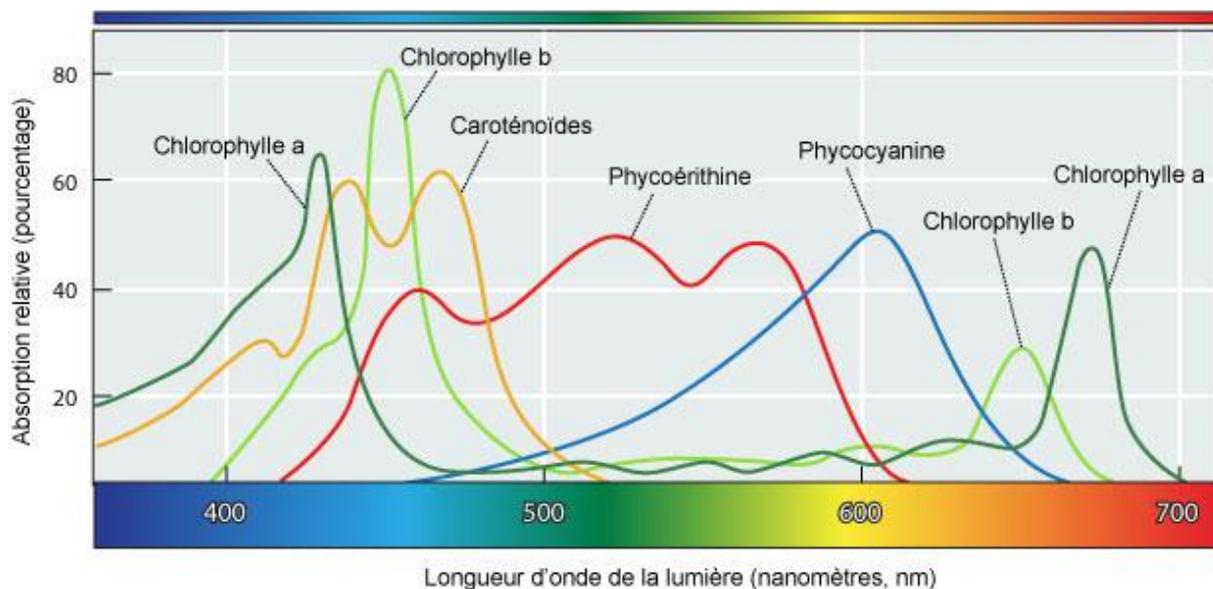


Figure 20 : spectre d'absorption des différentes longueurs d'onde visible pour différents pigments des plantes

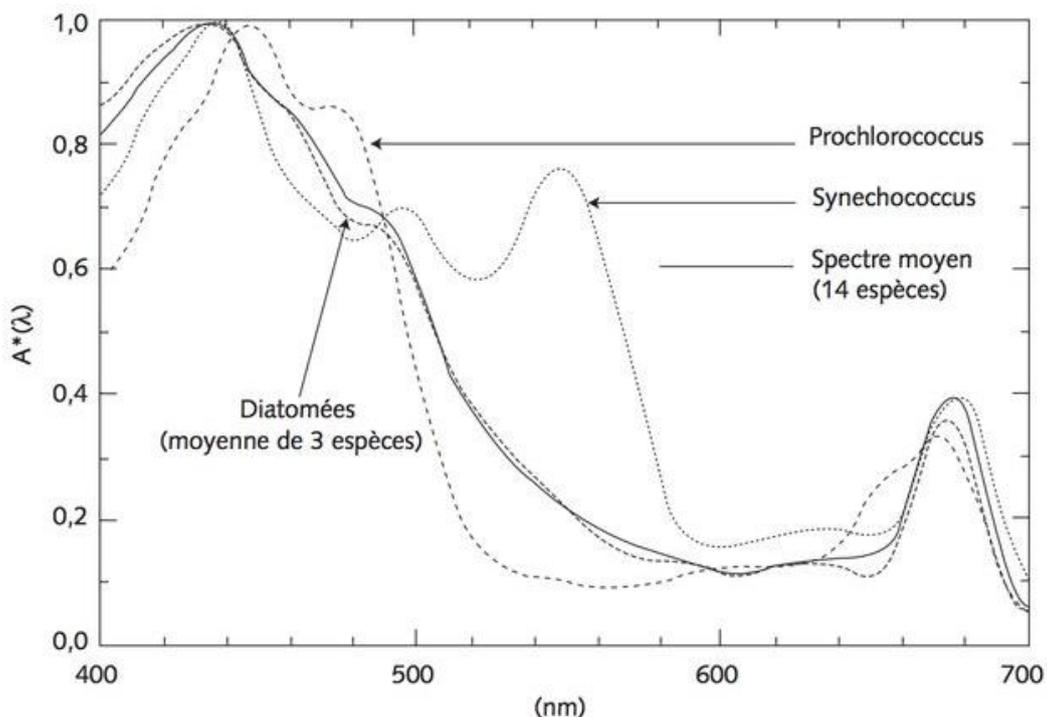


Figure 21 : Spectres d'absorption de différentes espèces de phytoplancton, normalisés par leur maximum. D'après différents auteurs, repris de la thèse de Carina Poulin (2018 ; https://www.researchgate.net/profile/Carina_Poulin)

Ainsi, l'ensemble des particules (MES) qui forment la turbidité absorbent facilement le bleu, tandis qu'elles absorbent moins le vert, ce qui explique la difficulté pour séparer la part des effervescences algales de la turbidité minérale due aux sédiments en suspension.

Les MES présentent généralement une forte réflectance à 555 nm (vert-jaune), puis faible au-delà de 750 nm (rouge et IR), mais cette réponse spectrale **dépend également de la concentration** en MES et du débit qui font varier sa composition dans l'eau de mer (Figure 19) (Doxaran et al., 2005, Froidefond et al., 2002; Nechad et al., 2016; Ody et al., 2016). Dans ce cas, certainement que la part terrigène due aux particules minérales, et la part biogénique due au phytoplancton, zooplancton, etc. vont influencer différemment sur la réponse spectrale renvoyée par l'eau de mer. La difficulté de la télédétection de la couleur de l'océan réside également dans l'hétérogénéité des zones étudiées : la réponse spectrale des eaux ouvertes, dites de cas 1, est majoritairement due au phytoplancton mais la composition plus complexe des eaux côtières, dites de cas 2, rend la réponse spectrale plus délicate à interpréter, les MES minérales et CDOM altérant la réponse spectrale (Gohin et al., 2005) ; les indices génériques sont difficilement applicables sur des grandes surfaces côtières (ex. : tout le Golfe du Lion).

Une veille bibliographique des différents indices cités dans la littérature a montré qu'il existait de très nombreux indices pour cartographier la turbidité et la chl-a. Les couleurs utilisées se résument généralement aux bandes spectrales des couleurs visibles : bleu (entre 440 et 510nm), vert (510-575nm) et rouge (620-780nm) ainsi que plus rarement à l'infrarouge proche (850nm). La cartographie de la turbidité et les indices développés dans ce but sont adaptés à de nombreux types d'eaux, plus ou moins turbides. Après de nombreux tests, seuls les indices généralistes et/ou ayant été appliqués dans des conditions similaires au PNM du GdL ont été retenus (Tableau 6), c'est-à-dire avec une gamme de turbidité ou de [MES] suffisamment large pour comprendre à la fois les eaux côtières turbides aux embouchures des fleuves et les eaux au large plus claires.

Le NDTI (*Normalized Difference Turbidity Index*, cf. Lacaux et al., 2007 ; Figure 22) semble inadapté pour classifier de manière continue un gradient de turbidité : les eaux moyennement turbides tendent vers un NDTI de -1 puis augmenter vers 0 lorsque que la turbidité diminue, cependant des fortes charges sédimentaires, comme la crue de l'Aude le 23/01/2018, présente des valeurs de NDTI supérieures à 0, rendant la classification discontinue. L'indice de Lorthiois (2012) adapté au capteur MODIS et utilisant un ratio $(RrsVert-RrsRouge)/RrsBleu$ représente bien les gradients au large, et est cohérent avec Copernicus (Figure 23 de droite) mais de fortes charges sont mal représentées ou par des valeurs négatives (Figure 22) alors que cet indice permet théoriquement de calculer la [MES] à partir de la réflectance. L'incohérence entre la turbidité cartographiée par Copernicus et celle par l'indice de Doxaran et al. (2002), quelles que soient les conditions, l'a aussi exclu des potentiels indices (Figure 24). L'algorithme de (Potes et al., 2012) devrait calculer la

[MES] mais des zones classées turbides par Copernicus présentent des [MES] calculées négatives. En prenant cet indice comme simple indicateur de la charge sédimentaire, il met bien en évidence les panaches turbides de l'Aude, de l'étang de l'Ayrolle au 23/01/2018 et le long des côtes (27/02/2018) mais les gradients moins marqués au large ne sont pas représentés.

Tableau 6 : les différents indices testés dans cette étude

Indice/ variable	Calcul	Source	Capteur/satellite	Conditions d'application
NDTI	$(Rrs_{rouge} - Rrs_{vert}) / (Rrs_{rouge} + Rrs_{vert})$	Lacaux et al, 2007	HRG/SPOT5	Classification de zones de ponte de moustiques au Sénégal
Turbidité	$\log_{10}(Rrs_{bleu} / Rrs_{vert})$ Si ratio > 0,85, alors utiliser $\log_{10}(Rrs_{bleu} / Rrs_{rouge})$	Zhang & Fell, 2007		Tous types d'eaux
Turbidité	Rrs_{NIR} / Rrs_{vert}	Doxaran et al, 2002	SPOT et LandSat	Eaux côtières moyennement à très turbides de la Gironde
Turbidité	Rrs_{bleu} / Rrs_{vert}	Froidefond et al, 2002	SeaWiFS/SeaStar	Eaux moyennement turbides
Turbidité (NTU)	$-6,39 + 8,93 * (Rrs_{vert} / Rrs_{bleu})$	Potes et al, 2012	MERIS/EnviSat	
[MES] (mg/L)	$670 * ((Rrs_{vert} - Rrs_{rouge}) / Rrs_{bleu})$	Lorthiois, 2012	MODIS/Terra et /Aqua	Eaux côtières moyennement à très turbides du Rhône
[MES] (mg/L)	$470 * ((Rrs_{vert} - Rrs_{rouge}) / Rrs_{bleu})$	Lorthiois, 2012	MERIS/EnviSat	Eaux côtières moyennement à très turbides du Rhône
[MES] (mg/L)	$10^{(1,0758 + 1,1230 * (Rrs_{rouge} / Rrs_{bleu}))}$	He et al, 2013		Eaux très turbides du Yangzi
[MES] (mg/L)	$-1,91 * 1140,25 (Rrs_{rouge})$	Millet & McKee, 2004	MODIS/Terra et /Aqua	Eaux moyennement turbides du golfe du Mexique

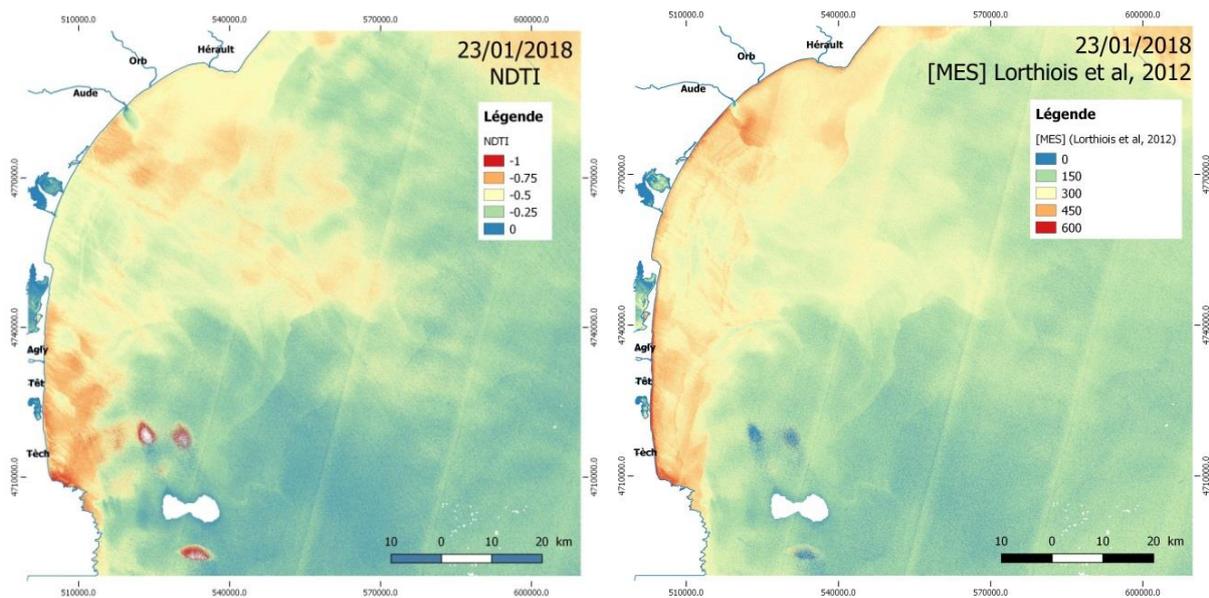


Figure 22 : Exemple d'indices initialement testé représentant la turbidité de manière non-linéaire et inadaptée après un essai sur les images Sentinel-2 (NDTI à gauche ; et indice de Lorthois et al., 2012 à droite)

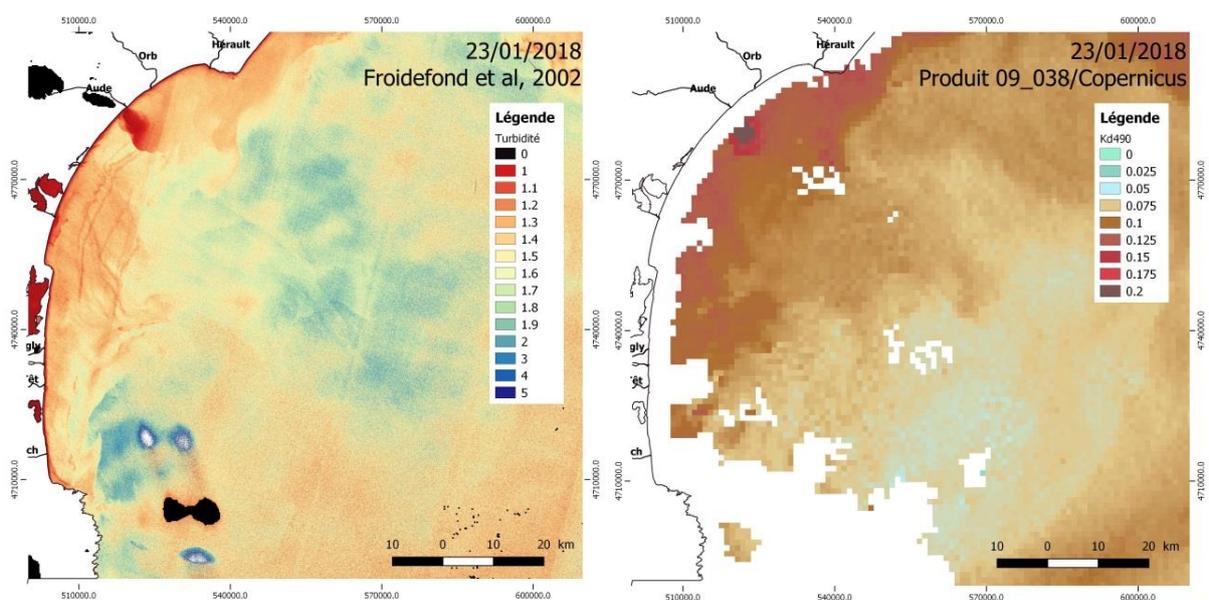


Figure 23 : Application du ratio $RrsBleu/RrsVert$ utilisé dans de nombreuses publications (Froidefond et al., 2002 ; Petus et al, 2010 ; Zhang and Fell, 2007) et comparaison avec le $Kd490$ du produit 009_038 de Copernicus, représentant lui aussi la turbidité

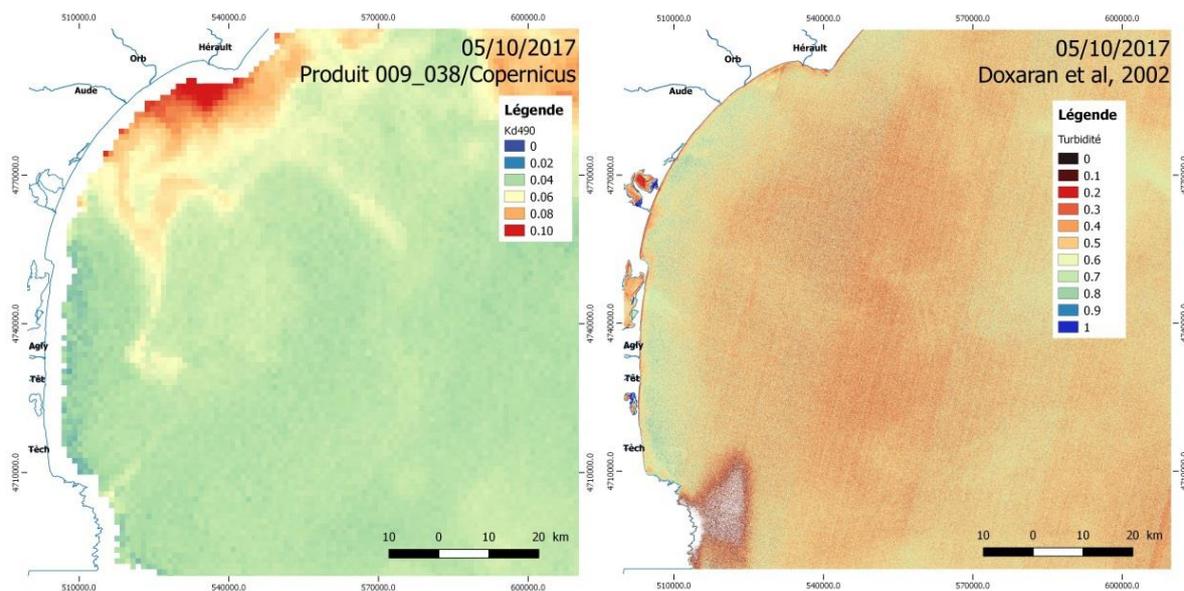


Figure 24 : Illustration de la distribution de la turbidité entre le produit 009_038 de Copernicus à gauche représentant le Kd490, et l'indice de Doxaran et al (2002) à droite basé sur le ratio des réflectances dans le vert et le proche infrarouge (NIR).

L'indice finalement choisi est celui utilisé par Froidefond et al. (2002); et repris par Zhang and Fell (2007), puis Petus et al. (2010). Il utilise dans chaque cas le ratio R_{rsBleu}/R_{rsVert} . Il ne permet pas de quantifier la turbidité mais d'établir un proxy aidant la détection des zones turbides. La formule complète de la représentation de la turbidité par le Kd490 est l'équation (1). La valeur du coefficient $Kw490$ est communément admise comme étant égale à $0.016m^{-1}$:

$$Kd490 = 10^{a_0 + a_1 * R + a_2 * R^2 + a_3 * R^3} + Kw490 \quad (1)$$

Si $R_{rs490}/R_{rs555} > 0,85$, alors utiliser $R = \log_{10}(R_{rs490}/R_{rs555})$ et $a_0 = -0,843$; $a_1 = -1,459$; $a_2 = -0,101$; $a_3 = -0,811$.

Si $R_{rs490}/R_{rs555} < 0,85$, alors utiliser $R = \log_{10}(R_{rs490}/R_{rs665})$ et $a_0 = 0,094$; $a_1 = -1,302$; $a_2 = 0,247$; $a_3 = -0,021$.

Les ressources techniques et matérielles demandées par ce type d'algorithme étant trop grandes, **seul le ratio R_{rsBleu}/R_{rsVert} sera utilisé pour cartographier la turbidité dans le cadre d'un suivi régulier, ce qui évite aussi de devoir adapter l'indice entre une situation de crue et une situation ultérieure (turbidité rémanente).**

L'indice **RrsBleu/RrsVert** va de 0 à 5. Plus l'indice est proche de 0 plus l'eau est turbide et inversement, plus il est proche de 5 plus celle-ci est limpide. Cet indice est d'ailleurs similaire à celui de Lee et al. (2002), le Kd490, qu'on retrouve parmi les produits Copernicus. Un Kd490 proche de 1 (la valeur maximale pouvant être atteinte) indique une forte turbidité.

Afin de valider la donnée de turbidité issue de Sentinel-2 avec les produits copernicus entre janvier 2017 et juin 2018, 38 images sont exploitables et ont été traitées selon la même démarche que Copernicus, avec une extraction de 1 037 valeurs de l'indice calculé face aux trois fleuves côtiers du PNM, au Cap Leucate et au Cap Cerbère (cf. précédemment la Figure 12).

5.2. L'impossibilité de discriminer la production primaire des MES sur les images S-2 avec un indice simple

Comme vu précédemment (chap. 5.1), le satellite Sentinel-2 ne permet pas de différencier différentes longueurs d'onde dans le bleu sur des bandes suffisamment étroites pour détecter l'activité chlorophyllienne. Un test sur les indices spécialisés de végétation de type NDVI a été réalisé car S-2 permet de détecter plusieurs bandes dans le proche infra-rouge. Le résultat de ce test n'a pas été concluant car il s'avère que la MES absorbe aussi les longueurs d'onde situées entre 700 et 1000 nm (cf. Figure 19).

En effet, sur les images de la Figure 25, il est montré que le NDVI semble détecter des fortes teneurs d'activité végétale au large qui ne sont pas des fortes teneurs en chl-a d'après une consultation de MARC et de Copernicus (de plus, les zones turbides entre le cap d'Agde et le cap Leucate sont normalement bien définies par ces plateformes comme des blooms).

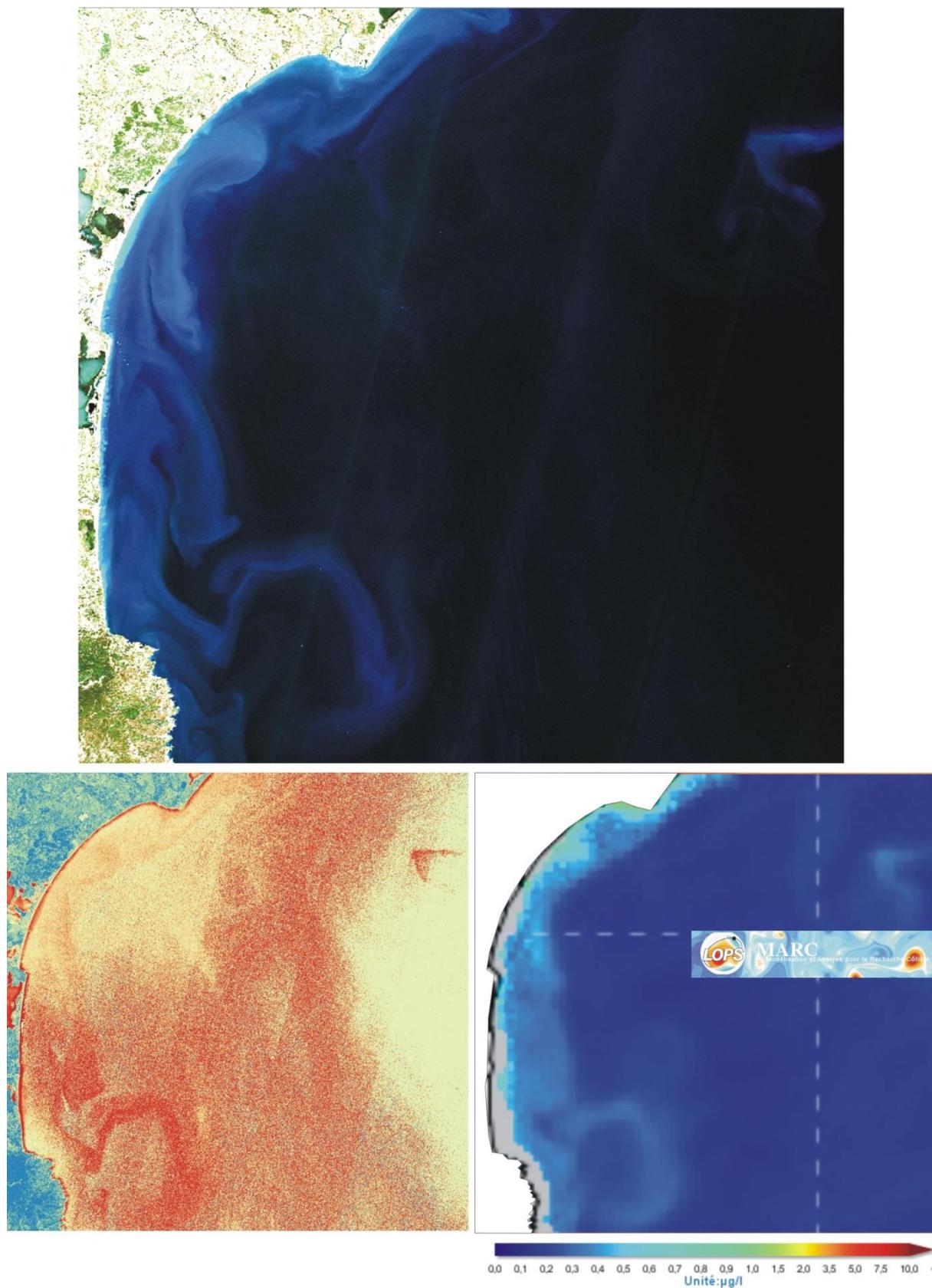


Figure 25 : comparaison de la turbidité visible sur l'image du 05 octobre 2018 de S-2 en haut, d'une application du NDVI en bas à gauche, et des résultats de chl-a de MARC à droite. La gamme couleur de l'allant du jaune vers le rouge révèle l'augmentation de l'activité végétale du NDVI. Les contours sont ici mal décrits par le NDVI.

5.3. Les étapes de traitement des images Sentinel-2

Acquisition des données Sentinel-2

Les données S2 sont acquises à la fois sur les plateformes Copernicus et Théia, et celles-ci ne montrent pas toujours le même nombre d'images. Il est rappelé que l'annexe 2 détaille le déroulement de ces phases de recherche d'image et téléchargement sur chacune des plateformes. Afin de cibler les images les plus intéressantes en fonction des événements météo-marins tels que les crues, des tableaux de type base de données ont permis de croiser les dates des images avec les débits des différents fleuves et diverses autres observations sur la turbidité (autres images d'autres satellites ; voir Figure 26).

image S2 du PNM dispo et téléchargeable à cette date								commentaires analyse visuelle (pré-traitement)
événements turbides importants								
débit maximum instantané (m3/s) QJM								
autres débits importants (selon le mois)								
période de crue potentielle/augmentation débit								
fleuves côtiers								
Dates	QJM Le Tech (Argelès-sur-mer)	QJM La Têt (Perpignan)	QJM L'Agly (Rivesaltes)	QJM L'Orb (Tabarka-Béziers)	QJM L'Hérault (Agde)	QJM L'Aude (Coursan - Arminis)	QJM Le Rhône (Tarascon)	
01/08/2018	1,19	2,13	0,48	5,32	4,27	7,49	869	Panache turbide à l'embouchure de l'Aude. Très bonne visibilité des barres d'avant côte, tout le long du littoral. Entre l'étang de l'Ayroll et Port-la-Nouvelle, les sédiments semblent être emportés vers l'Est. On observe des sortes de stries perpendiculaires à la côte dans cette zone. Pas de turbidité particulière au sein du Parc naturel marin d'après les images S2 L1C.
02/08/2018	1,09	2,04	0,47	6,44	4,4	6,74	897	La mer apparaît lisse et uniforme, aucun panache ne se distingue à l'échelle des images S3 OLCI hormis de légères nuances de bleu plus clair entre Agde et Narbonne.
03/08/2018	1,02	1,96	0,48	10,2	3,17	6,3	941	La mer semble particulièrement lisse et uniforme, aucun panache ne se distingue à l'échelle des images S3 OLCI.
04/08/2018	0,9	1,86	0,49	10,1	3,19	6,16	768	Eaux plus turbides que d'ordinaire à l'embouchure de l'Aude et du port du Cap d'Agde selon l'image LANDSAT 8 USGS. Comme pour l'image du 1 août 2018, les sédiments semblent être emportés vers le Sud-Est. On observe là encore des sortes de stries perpendiculaires à la côte.
05/08/2018	0,83	1,81	0,48	5,96	3,12	6,93	714	
06/08/2018	0,82	1,99	0,48	5,47	2,66	6,77	843	Très légers panaches turbides plaqués le long des côtes, la mer semble également se déverser dans les étangs en arrière-dune au Nord de Cap Leucate. On observe également de légères nuances de bleu au large de l'étang de l'Ayrolle (encore plus visibles sur les images S3-OLCI).
07/08/2018	0,86	2,29	0,51	4,48	2,55	6,52	973	Des nuages couvrent le territoire d'étude, le PNM ne semble pas touché par de quelconque panache turbide.
08/08/2018	1,29	2,61	0,51	4,99	2,64	8,1	976	
09/08/2018	0,98	3,53	0,58	4,96	2,6	9,08	1500	Les eaux côtières au sud du Cap d'Agde apparaissent turbides ; les eaux côtières du parc naturel marin également (mais seule une image S3 est disponible).

Figure 26 : extrait de la base de donnée Excel ayant permis de cibler en amont les images S-2 intéressantes pour l'étude des panaches turbides et des blooms phytoplanctoniques dans le Golfe du Lion en fonction des débits journaliers des fleuves. Un commentaire est mis à droite sur diverses observations issues des autres plateformes (ex. Copernicus) ou des autres satellites.

Nettoyage de la terre, des nuages.

La chaîne de traitement MAJA permet de repérer les nuages ainsi que leurs ombres par leur réflectance dans le bleu et comparaison multi-temporelle (Hagolle, 2018), les pixels nuageux sont donc masqués grâce au masque CLM_R1 livrés avec les produits Théia. Copernicus fournit également un masque des parties terrestres et des nuages, mais il est possible dans tous les cas d'utiliser la bande spectrale n°6 des images, dite « la bande des nuages » (aussi appelé « SCL20m ») et de n'appliquer l'indice de Froidefond que sur la partie qui nous intéresse : l'eau. Pour plus d'informations concernant la méthode mise en place avec l'outil OrfeoToolBox de QGIS et les formules utilisées par l'outil de commande Band-Math, il faut se référer à l'annexe 5 fournis en marge de ce rapport.

Une méthode simple pour isoler la terre est autrement de créer un masque. Pour cela, une fusion des traits de côte des départements des Pyrénées Orientales (55), de l'Aude (11), de l'Hérault (34) et du Gard (30) ainsi que des contours des 8 fleuves côtiers (Tèch, Têt, Agly, Aude, Orb, Hérault, petit Rhône et Rhône) et des principaux étangs a été réalisé. L'application de ce masque permet de conserver uniquement les pixels en milieu aquatique et côtier. Concernant le trait de côte, la ligne d'eau (position moyenne du jet de rive) a été choisie d'après des levés récents montrant la limite actuelle de la plage aérienne avec la mer en condition de beau temps et de houle extrêmement faible ($H_s < 0,5$ m).

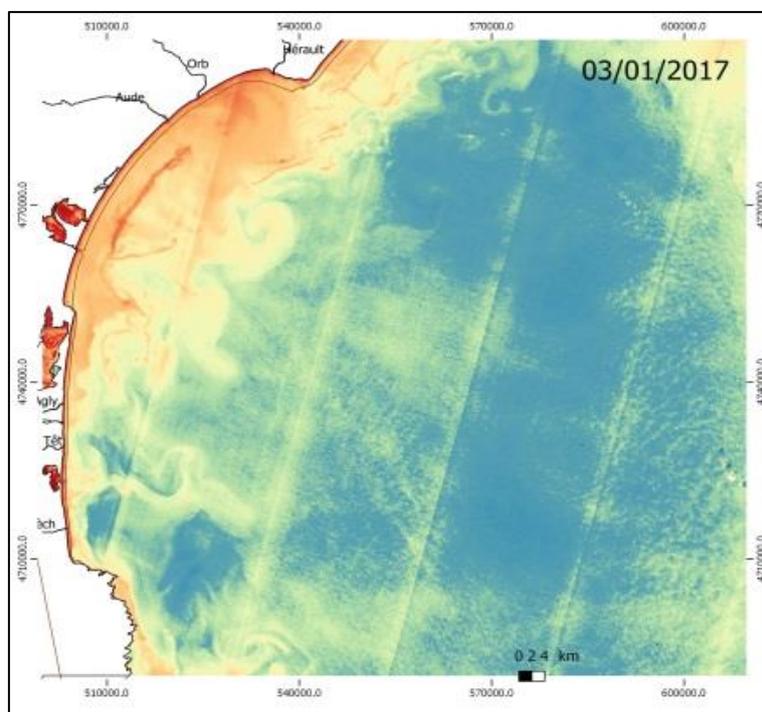


Figure 27 : Exemple d'image Sentinel-2 traitée avec application d'un masque sur les zones autres que la mer et les lagunes

Détection de de l'influence du fond sableux

Il est apparu rapidement que les barres sédimentaires : fonds sableux proches de la côte où déferlent les vagues lors des tempêtes, sont visibles par transparence sur les images et pouvaient influencer les résultats en étant interprétées comme de la turbidité.

En effet, des formes courbes turbides parallèles à la côte sont visibles par transparence de l'eau jusqu'à -10 m de profondeur (Figure 28). Ces structures festonnées évoquent sans contexte les barres sédimentaires présentes sur la côte du Roussillon. **Cette portion du littoral située au-dessus de 10 m de profondeur a été mise à part** (masque possible) car une grande partie de la turbidité qu'il sera détecté sera dans ce cas le reflet du fond et non de sédiments en suspension dans les eaux côtières.

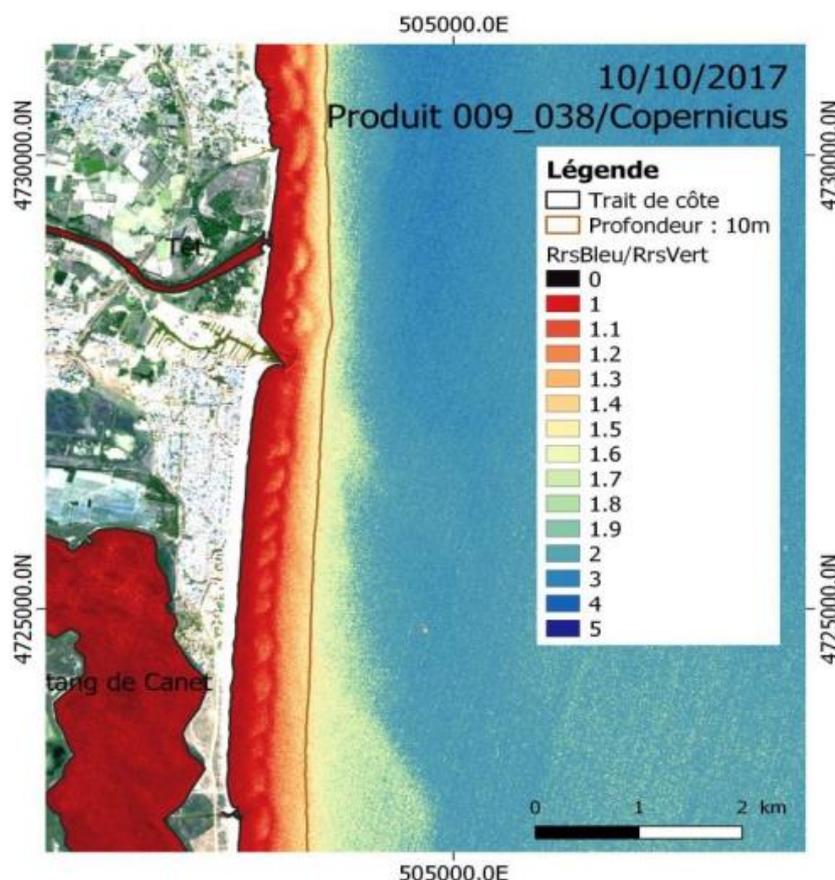


Figure 28 : Mise en évidence des structures festonnées disposées parallèlement à la côte montrant les formes des barres sédimentaires présentes sur la côte du Roussillon visibles par transparence. Pour ne pas fausser les résultats, un masque entre les isobathes 0 et -10 m a donc été créé.

Le problème des bandes sur les images et de la variation spatio-temporelle des éclairages

Il est rapidement apparu que les images Sentinel-2 montraient toutes des grandes bandes ressemblant à des fauchées d'axe NNE-SSO (Figure 29). Cet effet est lié au capteur car il acquiert les images grâce à un système composé de barrettes qui reçoivent en même temps

l'information de plusieurs milliers de pixels placés sur une même ligne. Ces lignes sont ensuite assemblées pour obtenir une image complète lors de la production entraînant des variations de valeurs liées aux différentes dynamiques captées par chaque barrette. Ce phénomène est connu et corrigé par les plateformes de mise à disposition des données. Cependant Sentinel-2 étant un satellite conçu pour imager les surfaces émergées, ces corrections ne fonctionnent bien que sur ces zones. Pour la partie maritime, les corrections sont plus complexes du fait des faibles réflectances liées à l'aspect sombre de l'eau et à l'homogénéité de la zone. Il en résulte que la partie maritime présente ces stries visibles sur l'image brute ainsi qu'après le calcul de l'indice aboutissant à une carte de turbidité (Figure 29 de droite). Une correction aurait pu être envisagée dans le cas où ces stries seraient apparues au même endroit à chaque date mais leurs positions variables rendent toutes corrections impossibles.

En conséquence, la régularité des indices semble trop faible pour assurer un suivi de l'état du PNM par simple extraction de valeurs de l'indice. Le suivi depuis janvier 2017 de plusieurs surfaces terrestres dont la composition ne change pas montre également des variations des intensités des pixels et des couleurs. Pour vérifier la fiabilité des données et la constance des résultats, trois points de référence, à savoir des toits d'habitation à Canet-en-Roussillon, Agde et Argelès-sur-Mer ont été pris comme référence. Les données se sont avérées incomparables dans le temps (Figure 30) avec des couleurs variant dans le temps malgré les corrections d'éclairage liées aux saisons (traitement BOA) : L'indice reste stable aux environs de 0,8 entre avril et octobre 2017 mais entre le 19/11/2017 et le 18/04/2018, il augmente brutalement jusqu'à 1.

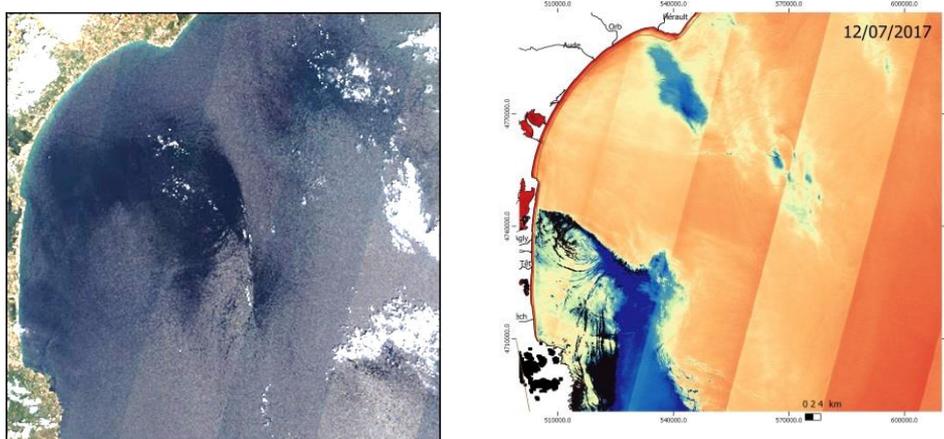


Figure 29 : Deux images montrant l'artefact systématique des bandes modifiant les couleurs selon des zones marines plus ou moins éloignées de la côte (image brute à gauche et image interprétées par un indice à droite, n.b. : ici deux dates différentes)

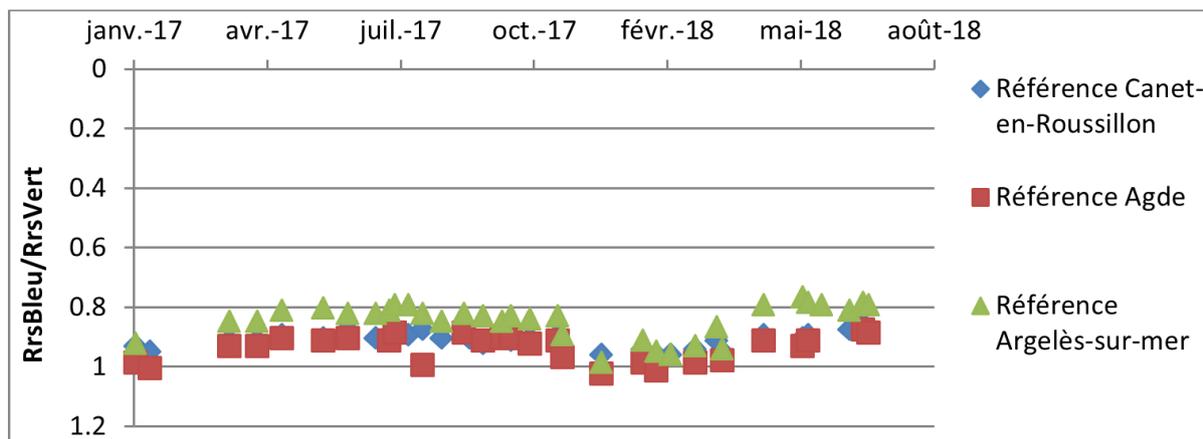


Figure 30 : Evolution du RrsBleu/RrsVert de trois points de référence à terre (toits de bâtiments) dont la surface est supposée de couleurs constante.

Enfin, si Sentinel-2 permet de suivre de manière extrêmement fine les formes et les contours des panaches, il ne permet pas de quantifier de manière fiable la variation temporelle de la turbidité en un point fixe durant plusieurs mois / années.

Calcul de l'indice de Froidefond (voir méthode en annexe 5)

L'extraction de la turbidité et le lissage des images satellites s'est faite via Qgis, avec l'extension Orfeo Toolbox (OTB). L'outil « **modeleur graphique** » disponible dans les « Traitements » a permis d'automatiser l'opération et par là même de réduire les risques d'erreur. Toutes les bandes ont été projetées à la même résolution de 10 m et l'algorithme « **Band Math X** » a permis de faire le traitement en quelques secondes (cf. extrait du modèle et de ces principales étapes en Figure 31).

On applique ensuite à l'image en sortie de traitement une classification colorée (échelle de couleur). Une fois appliquées, les couleurs révèlent les panaches et permettent de voir assez distinctement les limites et les formes de ceux-ci. On peut alors comparer ses résultats à ceux des modélisations de l'Ifremer ou de Copernicus.

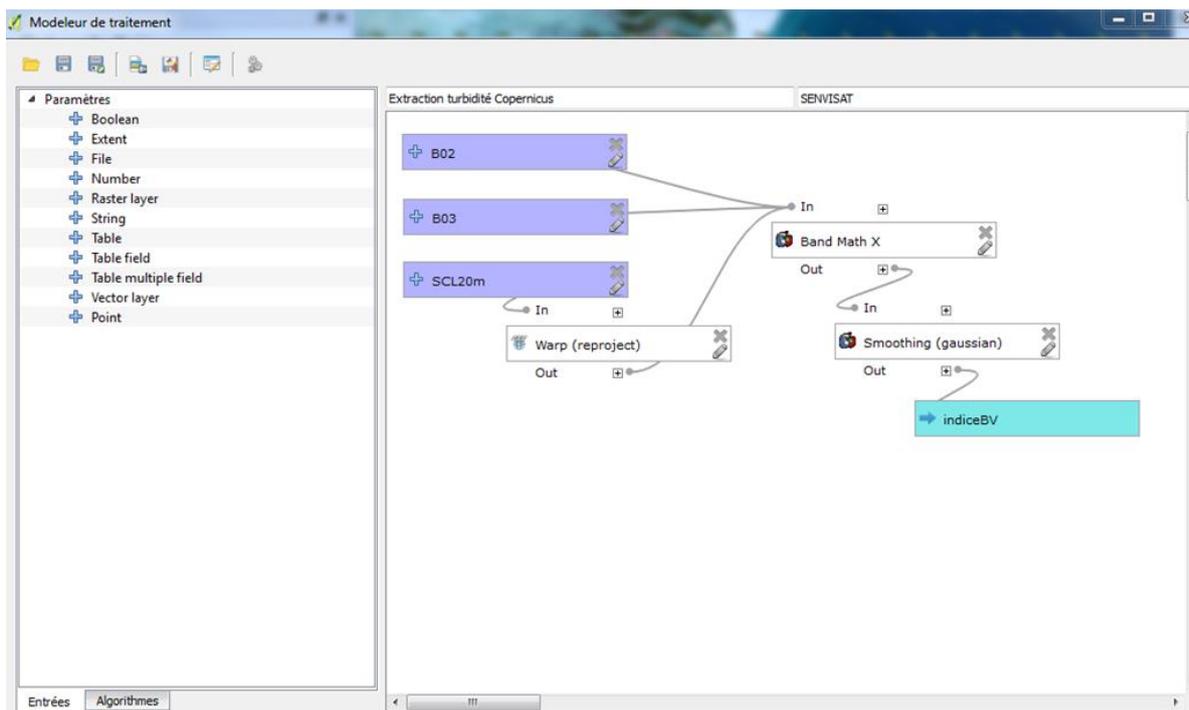


Figure 31 : modèle de traitement Qgis 2.18.28 with GRASS 7.6.0 pour l'extraction de la turbidité incluant le lissage des images satellites S-2.

Lissage de l'indice

Comme le montre la Figure 32, afin de rendre les données plus fiables quant à l'évaluation en un point de la turbidité grâce à l'indice sur les images, il fallait enlever un « grain » sur les images lié aux artefacts des capteurs du satellite.

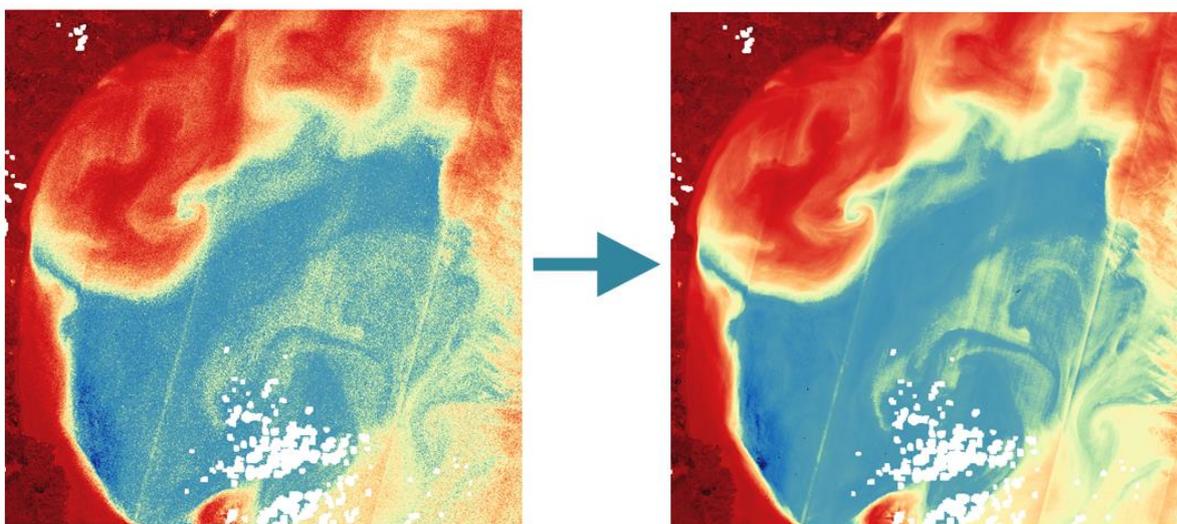


Figure 32 : lissage des données sur un rayon de 20 m autour de chaque pixel

Croisement des images avec les champs de courant des modèles (méthodologie en annexe 6 fournie hors de ce document)

Pour être analysées, les données météo marines MEDSEA_ANALYSIS_FORECASTPHY.006.013 ont été téléchargées individuellement au jour le jour et à la même heure. Plusieurs plages horaires ont été testées (00h00, 08h30 et 10h30), il s'avère que ne connaissant pas l'inertie des panaches turbides, le créneau de 00h00 semblait être le plus cohérent avec les formes des panaches observées entre 10h44 et 10h46 sur les images satellites des capteurs Sentinel-2.

Les fichiers sont au format NetCDF. Pour les utiliser et les alléger et ainsi éviter les bugs de Qgis, les fichiers sont convertis au format geotiff. On calcule en premier lieu l'intensité du courant avant d'intégrer ce paramètre dans le modèle de traitement automatique qu'on a préalablement créé afin d'afficher des flèches en nombre limité pour bien faire ressortir la courantologie et les présence des tourbillons méso-échelles sur les cartes de turbidité des images S-2. La Figure 33 illustre le type de rendu et la classification sur les tailles de flèche en fonction de l'intensité du courant issue du modèle.

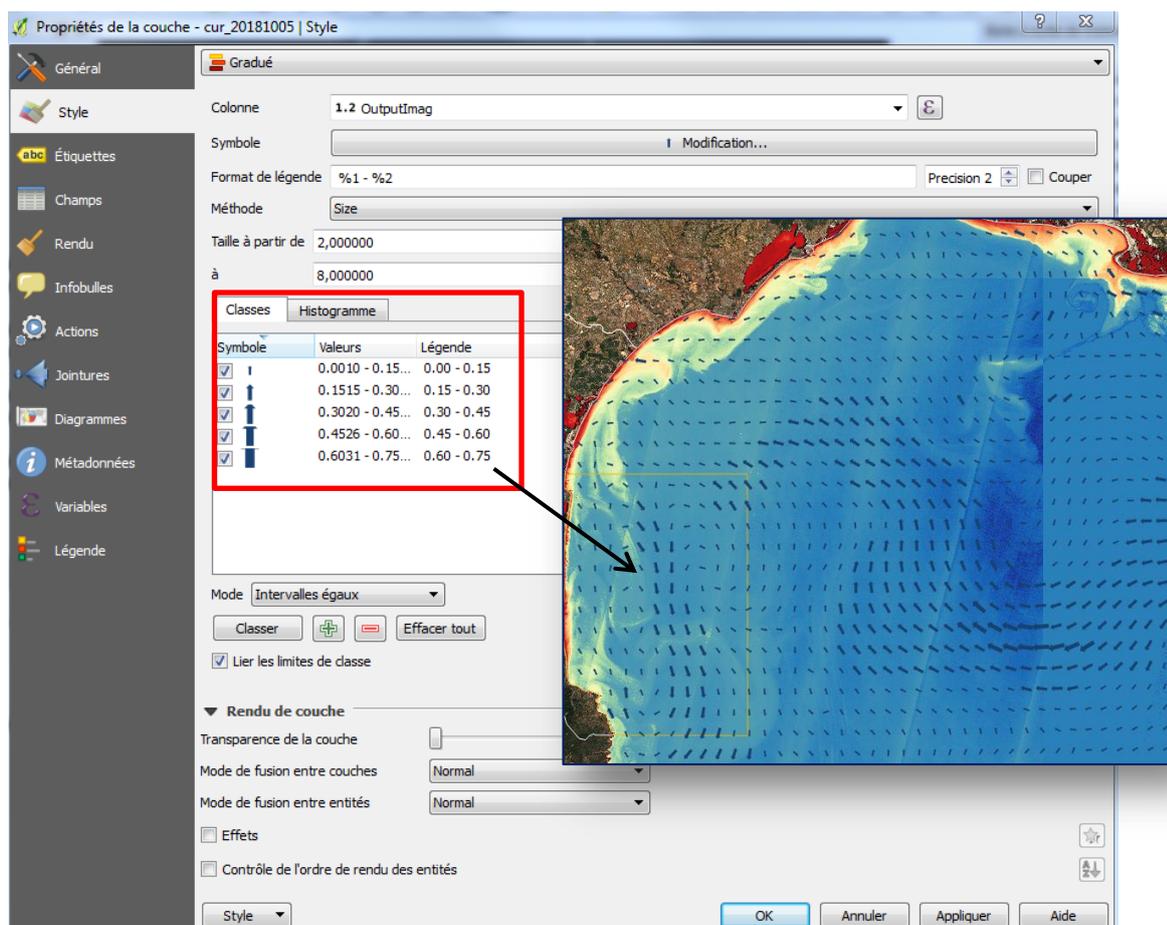


Figure 33 : méthode montrant le type de rendu réalisé dans la deuxième phase de l'étude en croisant les cartes de turbidité (images Sentinel-2) avec les champs de courant issus des modélisations hydrodynamiques de Copernicus

6) Résultats généraux des phénomènes turbides dans le Golfe du Lion

6.1. Les crues et les épisodes de pluie méditerranéen

La pluviométrie enregistrée à Perpignan (66) a été catégorisée en quatre types : des épisodes secs (ES) (précipitations journalières égales à 0), de pluie faible (EPF) (précipitation entre 0 et 5 mm), de pluie moyenne (EPM) (précipitations entre 5 et 15 mm) et de pluie élevée (EPE) (précipitations > 15 mm). Les EPM sont concentrés à l'automne et en fin d'hiver et les EPE interviennent aléatoirement au cours de ces deux saisons. Les fortes précipitations provoquent une augmentation des débits des fleuves, même certains EPF. La Figure 34 illustre ces propos en montrant que les crues sont systématiquement précédées de précipitations. Néanmoins, le lien entre cumul des précipitations et intensité du débit reste très aléatoire. Certains épisodes pluvieux, moyens ou élevés, durant l'été à Perpignan n'engendrent pas de crue au sein des trois fleuves du PNM.

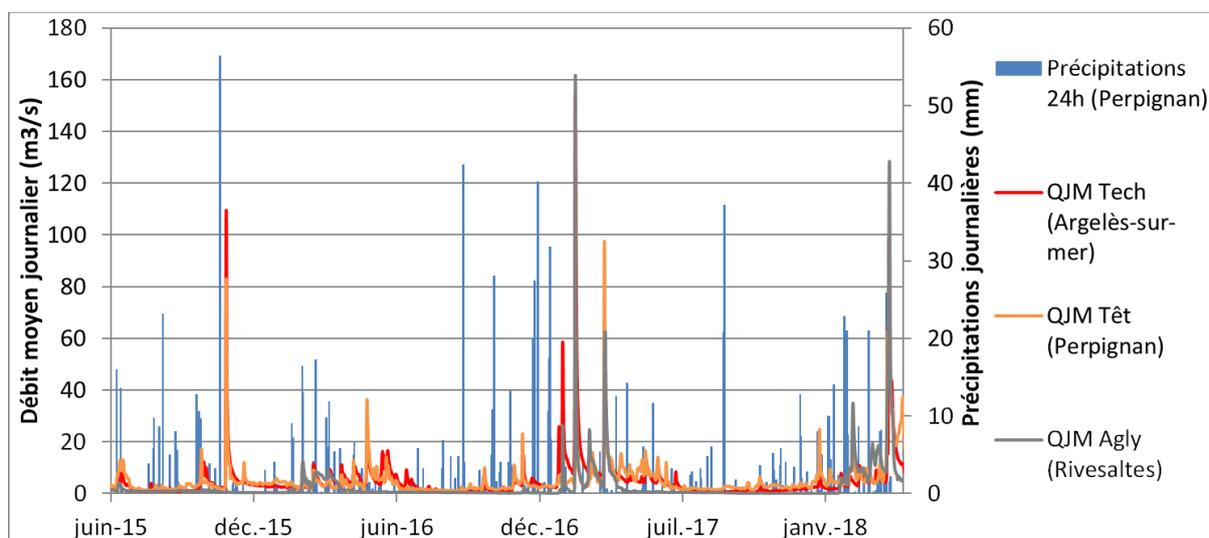


Figure 34 : Précipitations journalières (mm) à la station météorologique de Perpignan-Moulin à Vent (66) et débits moyens journaliers (QJM) des trois fleuves côtiers du PNM : le Tèch, la Têt et de l'Agly.

Source : Banque Hydro Eau France et <http://www.meteociel.fr/climatologie/villes.php?code=53&mois=12&annee=2014>

La Figure 35 est à mettre en parallèle de la figure précédente en montrant cette fois-ci les débits des fleuves Aude, Orb, et Hérault. Il est clair que la majorité des épisodes intenses et périodes de crue se retrouvent sur l'ensemble des 6 fleuves côtiers occitans, néanmoins, certains pics sont nettement plus intense dans la partie nord du Golfe du Lion, et il arrive parfois que seuls les fleuves du sud, ou seul les fleuves du nord rentrent en crue (ceci s'expliquant par l'alternance de vents de sud et de vents d'E-SE lors des épisodes

méditerranéen /cévenols qui feront varier l'intensité des précipitations sur les différents reliefs de l'arrière-pays).

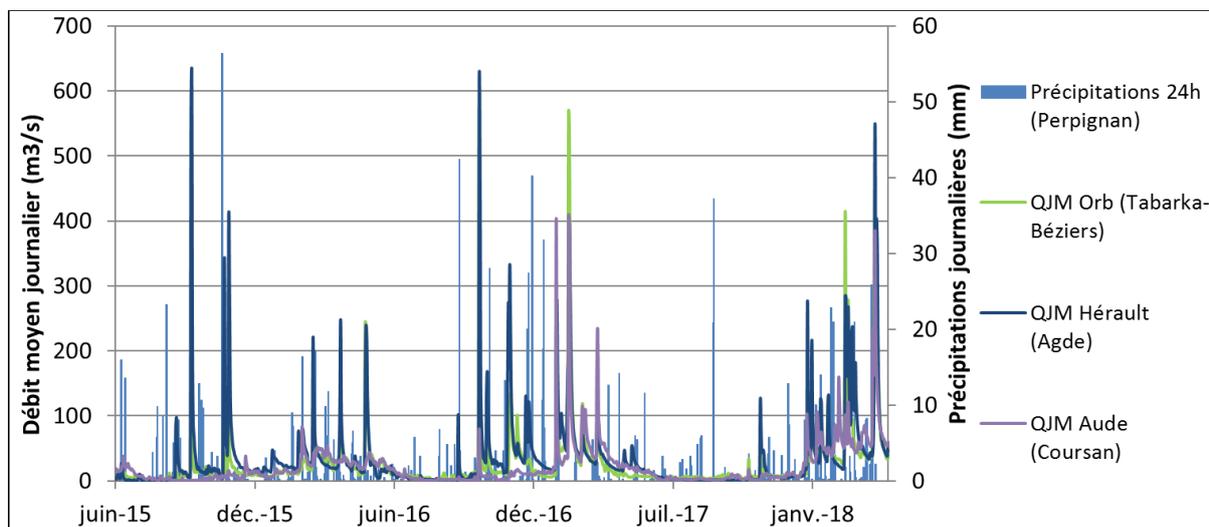


Figure 35 : Précipitations journalières (mm) à la station météorologique de Perpignan-Moulin à Vent (66) et débits moyens journaliers des trois fleuves côtiers de la côte narbonnaise : l'Aude, l'Orb et l'Hérault.

Source : Banque Hydro Eau France et <http://www.meteociel.fr/climatologie/villes.php?code=53&mois=12&annee=2014>

- La pluviométrie sur la plaine et les débits des fleuves sont parfois un peu déconnectés (pluies sur les reliefs ou plus en amont de la station météo)
- Tous les fleuves n'ont pas un fonctionnement similaire et simultané, et certains épisodes de crue ne se retrouvent que dans le sud, ou alors que dans le nord du Golfe du Lion. Les pics étant souvent plus forts pour les fleuves au nord.

6.2. La saisonnalité du signal de turbidité et de chlorophylle-a

Une [chl a] régulière et une turbidité plus instable d'après les mesures

Les mesures effectuées au large du Barcarès (réseau REPHY) et en baie de Banyuls-sur-Mer (réseau SOMLIT) montrent des pics de chl-a avec des variations saisonnières de la communauté phytoplanctonique : les **blooms automnaux** (efflorescences) relevés dans la littérature sont illustrés ici par une augmentation de la [chl a] **à partir de septembre qui se poursuit jusqu'au début du printemps** avant de brutalement chuter autour du mois de mai (Figure 36). Certaines années ont cependant vues des variations saisonnières peu marquées, comme ce fut le cas en 2013 et 2014 (Garcia, 2014a). La zone du Banyuls-sur-mer montrerait en première approximation des concentrations souvent plus élevées que celle de Barcarès, l'étendue temporelle du jeu de données est faible pour conclure sur ce point. La période estivale, marquée par de faibles apports fluviaux et leur moindre participation à l'apport de

nutriments dans les eaux côtières. Ainsi, l'été est pauvre en particules chlorophylliennes, que ce soit pour la zone du Barcarès ou de Banyuls (<0,5 µg/L).

Au vu de ce résultat, il semblerait que le développement de la chlorophylle-a liée à la production primaire de phytoplancton, trouve des conditions plus favorables au cours des mois d'automne-printemps et surtout de l'hiver. La température faible de l'eau de mer (entre 10 et 15 °C l'hiver) ne semble pas être un frein au développement des micro-algues.

Le développement du phytoplancton sur la côte semble avoir un lien avec l'hiver qui est la période de forts vents/courants, ceci malgré la diminution de la source lumineuse. La période d'octobre à mai est aussi la période d'apports terrigènes intenses dans les eaux côtières via les épisodes de crues et les panaches turbides en mer.

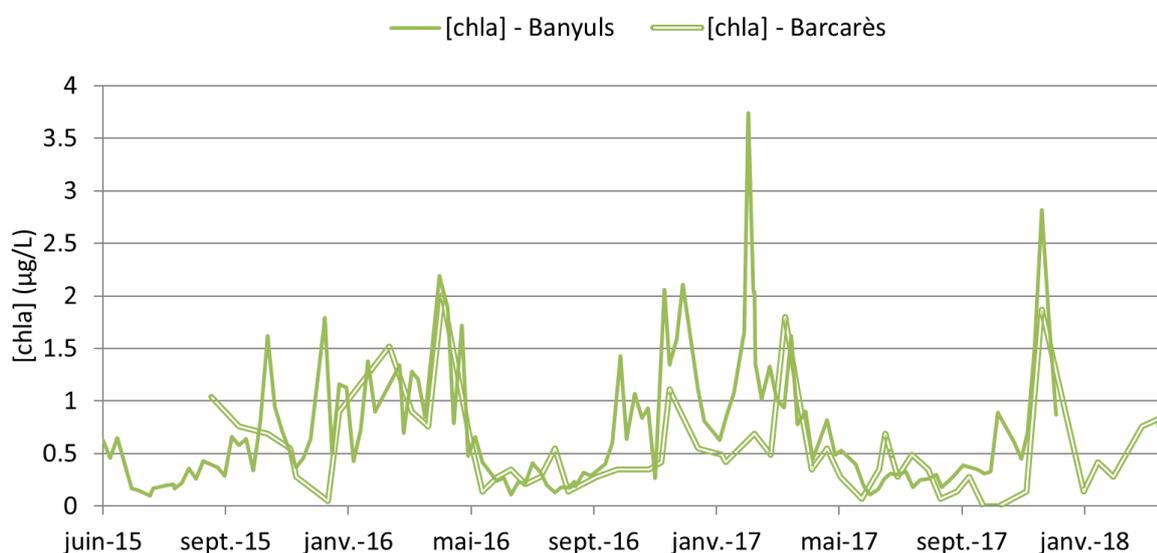


Figure 36 : Evolution de la concentration en chlorophylle a [chl a] en surface entre juin 2015 et avril 2018 en baie de Banyuls-sur-mer (réseau SOMLIT) et du Barcarès (réseau REPHY).

Source : Service d'Observation en Milieu Littoral, INSU-CNRS, Banyuls-sur-mer et Réseau de Surveillance du Phytoplancton, IFREMER, Barcarès.

Les **MES** présentent des tendances saisonnières moins marquées que la [chl a], et sa présence suit d'avantage un comportement de courtes « crises » (Figure 37). Les **périodes hivernales et estivales ne se différencient pas** aussi nettement, néanmoins, il est clair que l'essentiel des phases de turbidité et des fortes crises se produisent l'hiver. La turbidité oscille entre 0,7 et 2,5 FNU avec des maximums atteignant plus de 5 FNU, voire 9,3 FNU à la fin de l'hiver 2018. Les deux stations de mesures semblent suivre les mêmes tendances avec des augmentations et maximums enregistrés souvent aux mêmes périodes bien que certains pics de turbidité au Barcarès ne soient pas suivis par des soudaines augmentations de [MES] à Banyuls. Les tendances saisonnières des deux points de mesure semblent identiques,

malgré des zones géographiques différentes, suggérant qu'il existe une connexion claire des eaux dans tout le sud du Golfe du Lion.

Ainsi, la turbidité est davantage un phénomène épisodique et localisé. Il y a un lien, bien sûr, avec les crues, mais qu'une mesure ponctuelle distante des fleuves ne fait pas ici toujours apparaître clairement

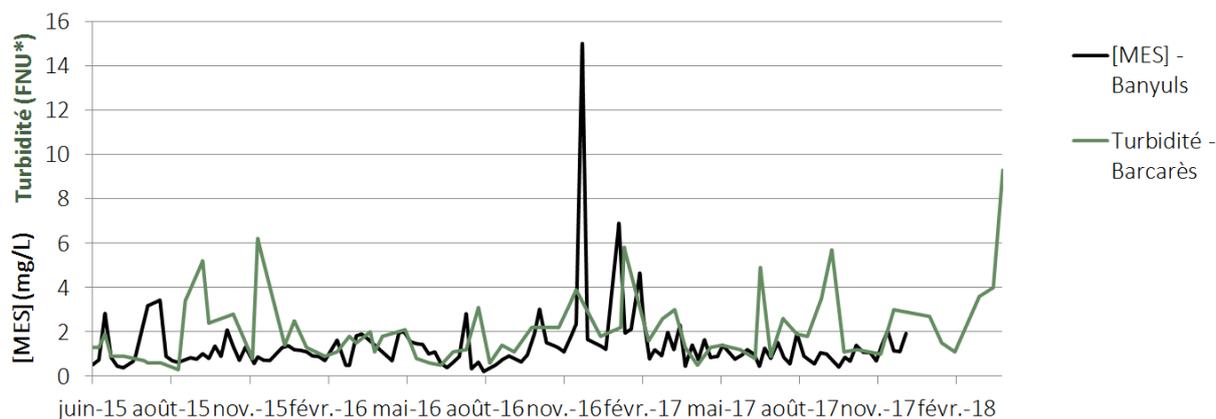


Figure 37 : Evolution de la concentration en Matières en suspension [MES] et de la turbidité en surface entre juin 2015 et avril 2018 au large de Banyuls-sur-mer (réseau SOMLIT) et du Barcarès (réseau REPHY). Source : Service d'Observation en Milieu LITtoral, INSU-CNRS, Banyuls-sur-mer et Réseau de surveillance du PHYtoplancton, IFREMER, Barcarès

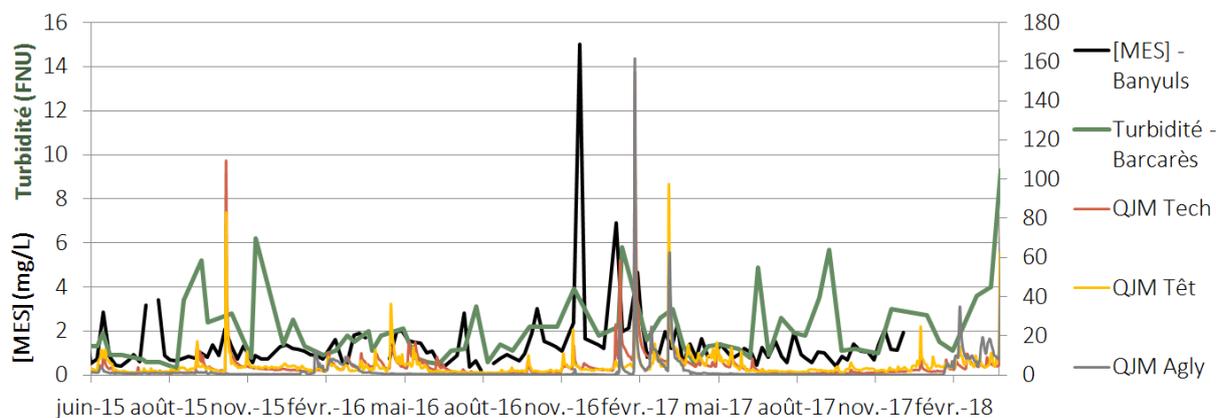


Figure 38 : Superposition des débits des fleuves du Roussillon par rapport aux mesures de turbidité côtières (idem figure précédente).

6.3. Une validation des capacités d'observation de Copernicus

Copernicus ne permet pas de s'approcher suffisamment de la côte pour estimer correctement la turbidité des eaux très côtières (les bandes côtières sont masquées sur les produits du Kd490). En conséquent, la mesure près de la côte des 2 capteurs en mer n'a pas une relation très bonne en termes de valeur absolue avec les produits satellites de Copernicus (ex. : Figure 40).

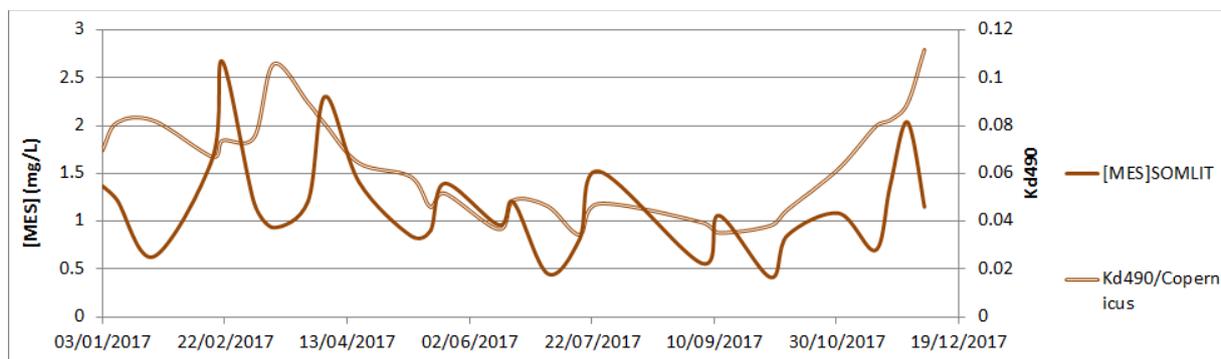


Figure 39 : Comparaison directe des mesures discrètes aux mêmes dates de Copernicus et de la sonde de Banyuls (SOMLIT) concernant la turbidité

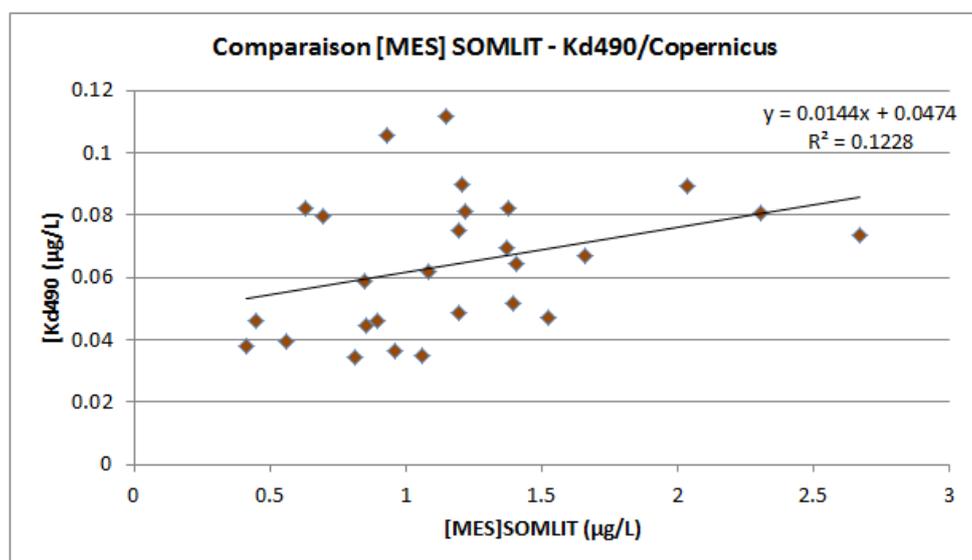


Figure 40 : relation entre la MES mesurée par la sonde de la bouée SOMLIT de Banyuls et le Kd490 estimé à proximité (légèrement plus au large) par Copernicus

A l'inverse, les données sur la chl-a sont accessibles plus près de la côte et la corrélation est assez bonne, en particulier au regard des séries temporelles permettant de révéler les principaux événements (blooms phytoplanctoniques, cf. Figure 41). Néanmoins, un biais pouvant être à la fois positif ou négatif apparaît entre la télédétection et la mesure directe (forte dispersion du nuage de point dans la confrontation directe des valeurs en Figure 42).

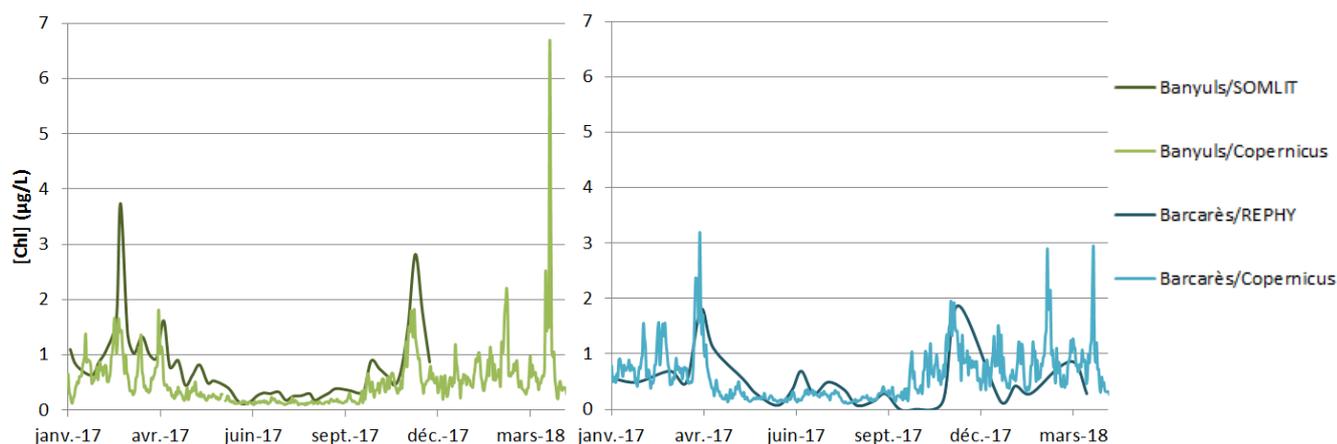


Figure 41 : Profils saisonniers dans la baie de Banyuls et au large du Barcarès de la [chl a] mesurée in situ dans le cadre du réseau d'observation du littoral SOMLIT, du réseau de surveillance du phytoplancton REPHY et la [chl a] estimée par imagerie satellite par Copernicus

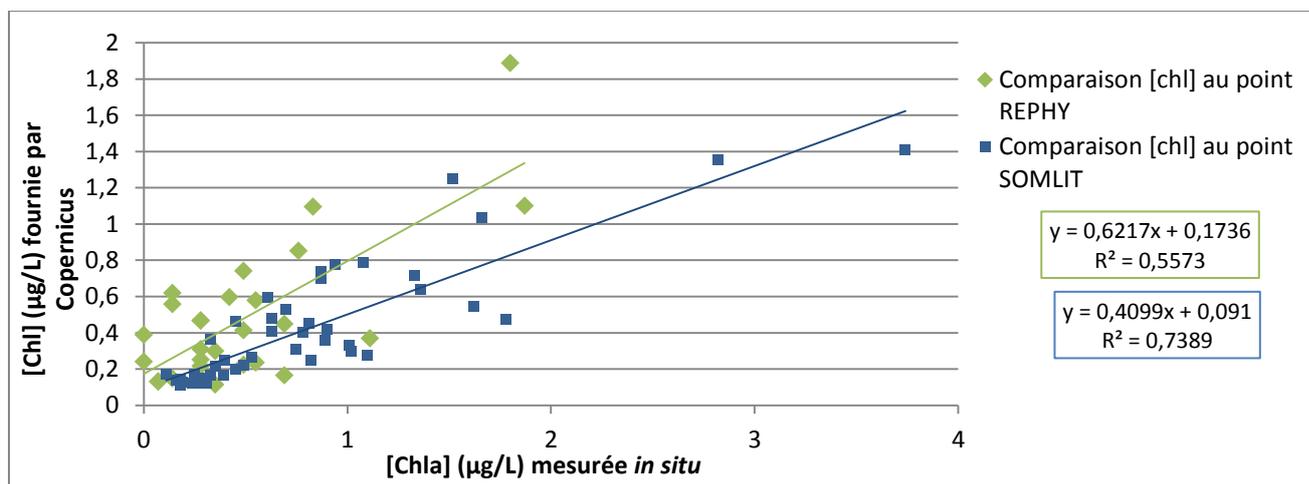


Figure 42 : Courbe de corrélation entre la [chl] mesurée in situ par les réseaux SOMLIT (à Banyuls) et REPHY (au Barcarès) et les concentrations estimées par Copernicus.

- Les estimations de Copernicus semblent cohérentes avec les mesures directes pour la Chl-a, mais :
 1. L'erreur entre les valeurs de télédétection de la chl-a et la mesure in-situ se montre parfois forte même si les événements sont généralement relevés ;
 2. La turbidité est un phénomène très localisé et variable selon la distance à la côte ;
 3. Sur le domaine vraiment proche des côtes, les produits Copernicus ne donnent pas accès à une estimation de la turbidité (mais seulement de la chl-a)

6.4. La chlorophylle-a est-elle seulement dépendante de la turbidité générale comme indiqué par Copernicus ?

Comme le montrait déjà précédemment les deux cartes en Figure 11, les panaches favoriseraient un développement de la chl-a en leurs seins suivant les mêmes contours géographiques d'après les indices spécialisés de Copernicus ou de MARC.

En effet, le graphique suivant (Figure 43) montre que les deux paramètres sont parfaitement corrélés la majorité du temps d'après une extraction de 5 points (pixels) proches de la côte du Parc issus des produits Copernicus des données de turbidité (Kd490) et de Chl-a. D'après cette analyse, il arrive plus rarement que de fortes turbidités ne soient pas perçues comme un développement de chl-a important, ce que confirment tout particulièrement les mesures (Figure 44).

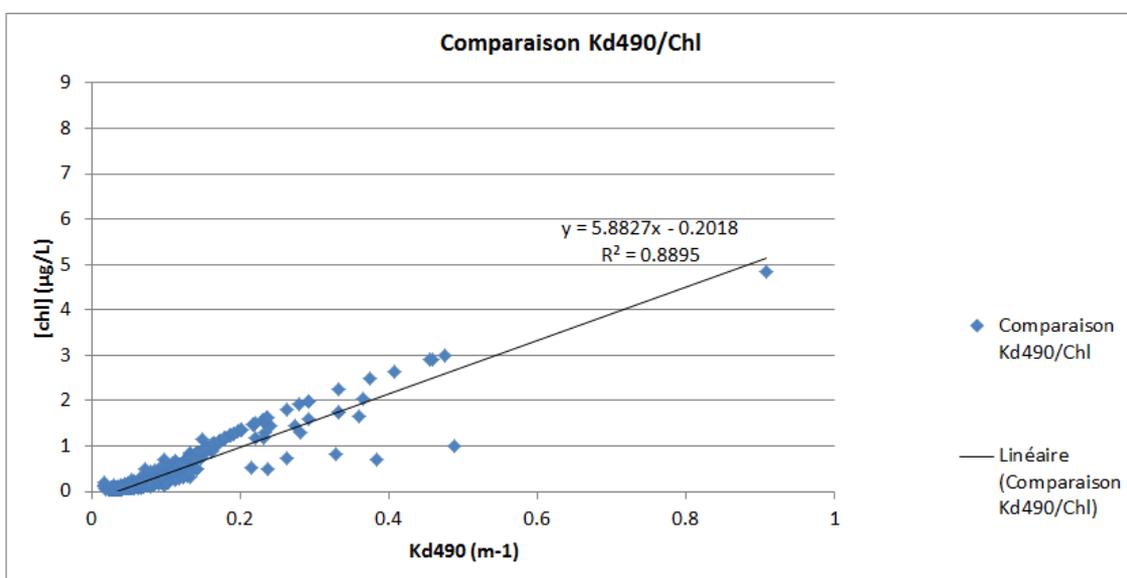


Figure 43 : comparaison des valeurs de turbidité et de Chl-a quantifiées simultanément par Copernicus (analyse de différentes sources d'images satellites moyenne résolution) en différents points proches de la côte (moins de 10 km)

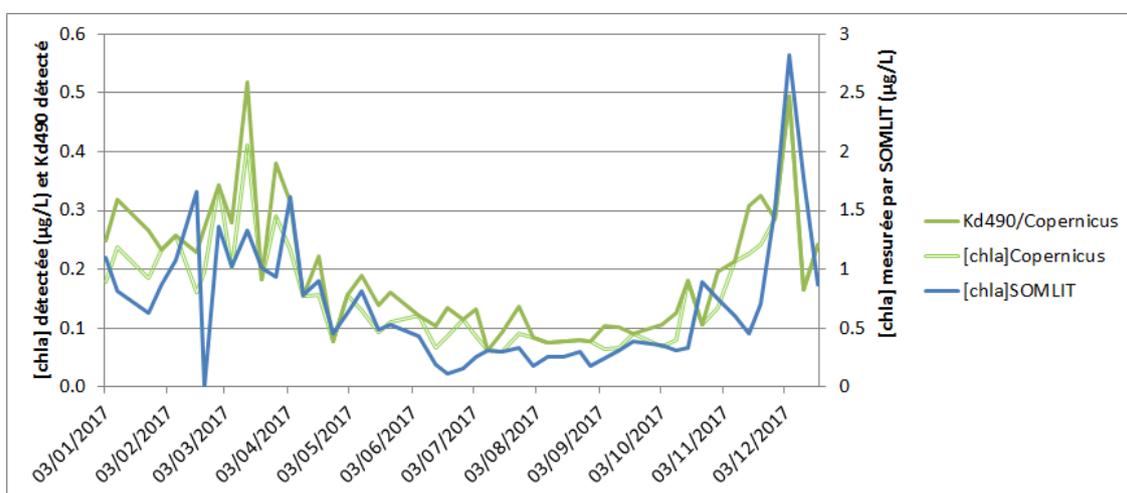


Figure 44 : comparaison de la série temporelle de chl-a mesurée à Banyuls par la bouée SOMLIT avec les pixels les plus proches de Copernicus des produits turbidité et chl-a (n.b. : la turbidité n'est captée que plus au large)

D'après les mesures directes in-situ, le lien quantitatif entre turbidité de l'eau et concentration en [chl-a] ne montre pas une dépendance si claire, du moins sur le domaine très côtier des mesures (voir Figure 45 et Figure 46 ci-contre).

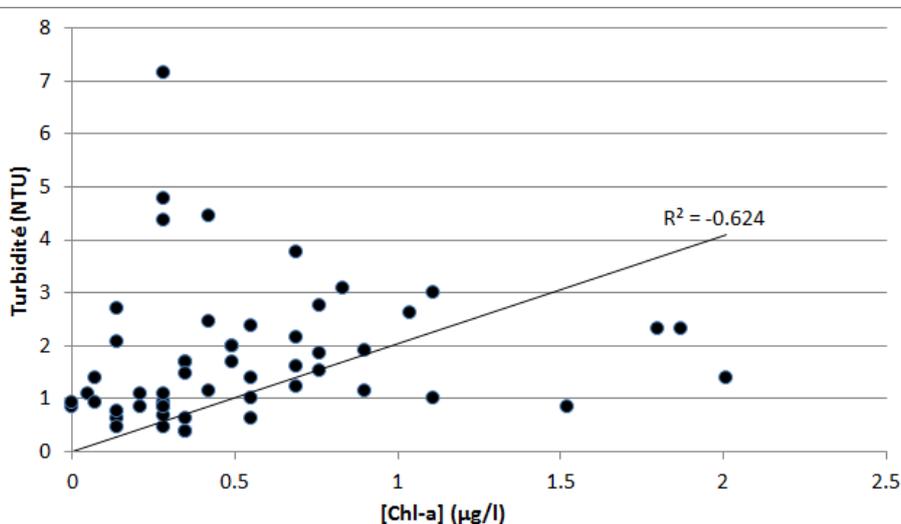


Figure 45 : lien entre la turbidité et la Chl-a mesurée au niveau de la sonde du Barcarès (REPHY)

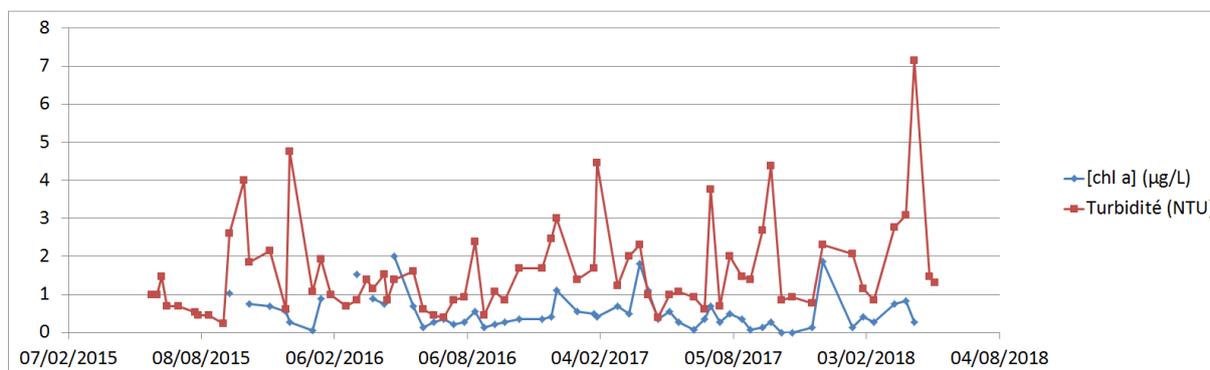


Figure 46 : série temporelle de la mesure simultanée de la chl-a et de la turbidité au niveau du Barcarès (REPHY)

La chl-a semble dans les faits effectivement liée principalement aux apports de MES, ce qui réfère aux matières nutritives présentes dans l'eau, mais dans certains cas de forte turbidité, le phytoplancton ne se développe pas forcément (on peut supposer un rôle nécessaire de la lumière).

Des efflorescences phytoplanctoniques visibles aux embouchures des fleuves

Contrairement aux produits turbidité, les cartes de [chl a] de Copenicus traitent les eaux de cas 2, c'est-à-dire des eaux côtières. Malgré une faible résolution spatiale, on peut distinguer

une répartition de la [chl a] concentrée aux embouchures des fleuves côtiers et une concentration marquée le long de la côte, sur une largeur aussi grande que les zones turbides précédemment décrites. La côte narbonnaise est particulièrement riche en chl a avec une concentration généralement haute, entre 0,2 et 1,5 µg/L, quel que soit le débit des fleuves. Sur la côte du Roussillon, c'est aux abords du Tèch et de la Têt que les concentrations sont plus élevées par rapport à l'Agly. Après une crue, moyenne ou forte, on observe une soudaine efflorescence phytoplanctonique qui dure entre cinq et vingt jours suivant l'épisode (Figure 47). **Cette efflorescence perdure donc plus longtemps que le pic de crue ($Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$).**

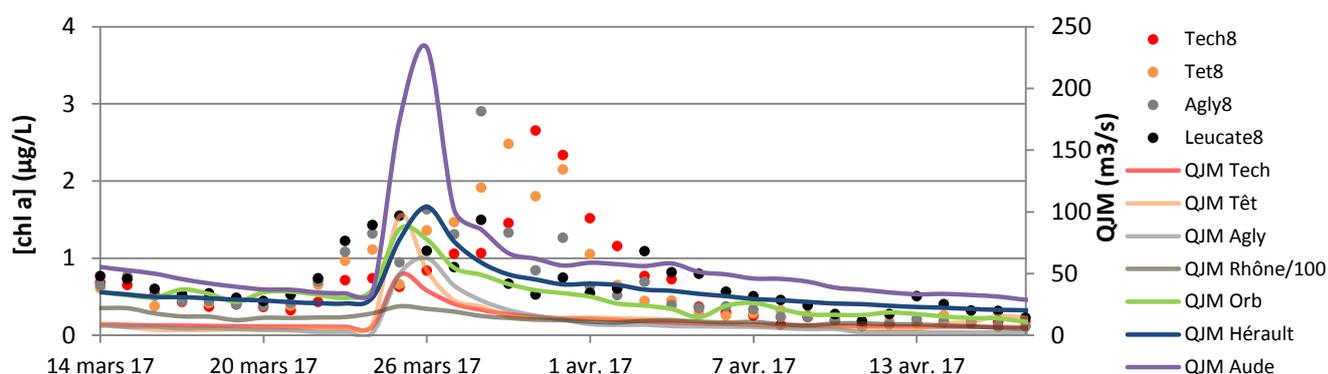


Figure 47 : Evolution de la [chl a] à 8km de la côte du Roussillon durant une efflorescence phytoplanctonique et une forte crue.
Source : Produit 009_041 de Copernicus

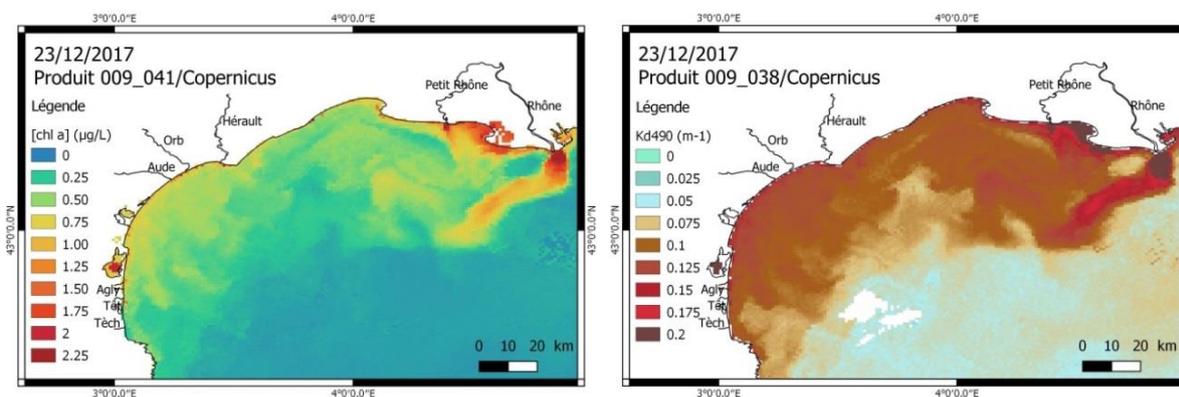


Figure 48 : Mise en évidence de la similarité de répartition des efflorescences phytoplanctoniques représentées ici par la [chl a] à gauche et le Kd490 à droite.

- **Les efflorescences algales semblent liées intimement à la présence de turbidité en mer, mais il semblerait que Copernicus détecte au travers des images MERIS et MODIS des contours « trop » analogues à ceux des panaches. Dans ce cas, il est possible que l'utilisation des indices colorimétriques sur les images satellite présente un biais qui expliquerait la différence plus flagrante dans les mesures in-situ entre les deux variables.**
- **Un décalage temporel entre MES et développement de la production primaire est parfois suspecté.**

6.5. Maintien de la turbidité proche des côtes

Les produits Copernicus apportent une vision globale avec des images de tout le Golfe du Lion, sur lesquelles on peut discerner le contour de courants chargés en particules jaunes et détritiques. Dans le cas le plus générale la turbidité se répartit suivant un gradient qui diminue avec la distance à la côte (Figure 49).

La largeur et l'intensité des zones plus turbides que les eaux ouvertes (eaux du large claires) varient dans le temps, particulièrement en fonction du débit journalier des trois fleuves de la côte narbonnaise, l'Aude, l'Orb et l'Hérault

Le long de la côte narbonnaise, une bande plus turbide entre la côte et le large, de 10 à 30 km de large, présente un Kd_{490} résidant entre 0,1 et 0,2 m^{-1} . La côte sableuse du Roussillon possède quant à elle la même dynamique que la narbonnaise avec cependant une constante de zone turbide plus étroite, de 10 à 15 km de large, et celle-ci est généralement plus effacée pendant les périodes d'étiage, entre avril et septembre. Les débits étant également plus faibles, les panaches se distinguent moins (en particulier sur les produits Copernicus qui ne couvrent pas le domaine proche-côtier ; cf. Figure 50).

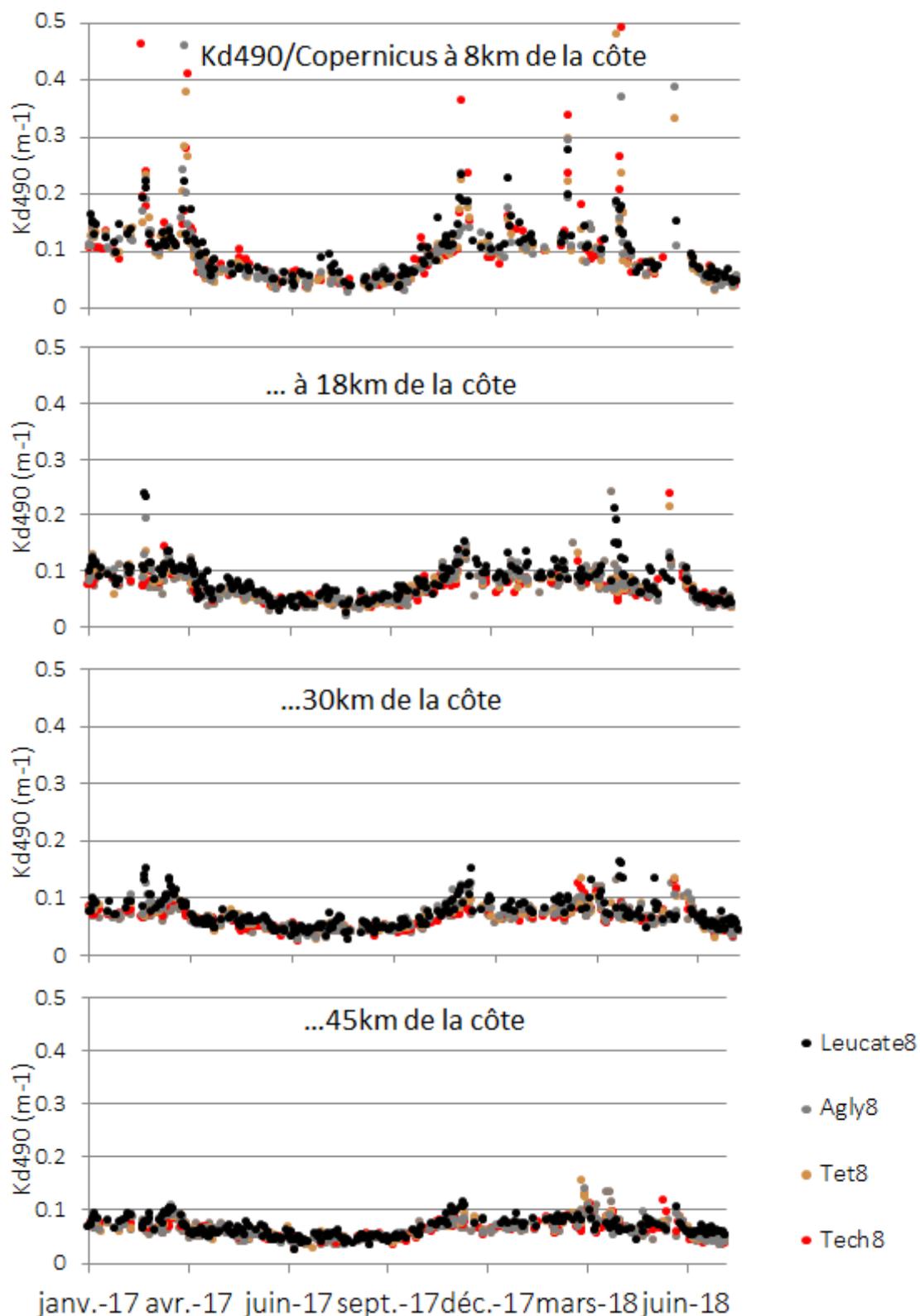


Figure 49 : Diminution de la turbidité, ainsi que des contrastes saisonniers et événementiels entre le domaine proche-côtier et le large d'après des extractions sur les produits Copernicus (009_038)

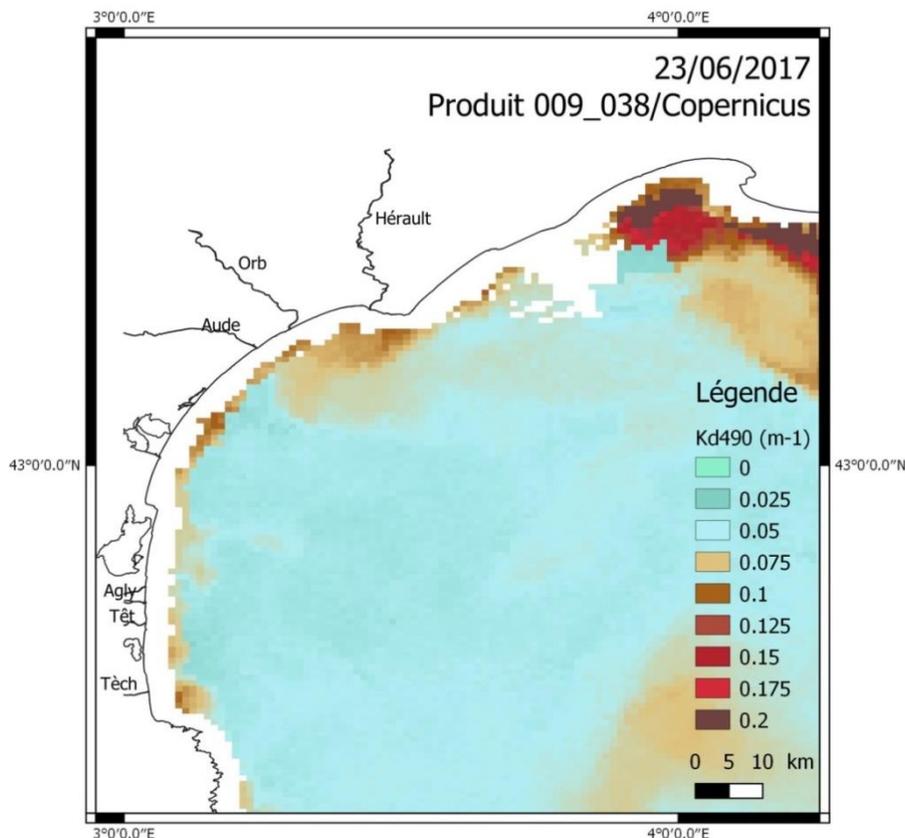


Figure 50 : Illustration de l'état du golfe du Lion pendant la période d'étiage des fleuves côtiers de la côte narbonnaise et du PNM avec néanmoins une turbidité rémanente propre habituellement au printemps (produit Kd490 Copernicus) particulièrement visible dans le Narbonnais et à l'ouest du Cap d'Agde

- **Certainement en raison de la dynamique des courants et de l'apport plus régulier des fleuves du Narbonnais / Ouest-Hérault, une bande turbide plus large se localise souvent sur la côte entre le Cap d'Agde et Leucate.**
- **Dans le Roussillon et le périmètre du PNM, la turbidité est souvent limitée à la zone proche de la côte (0-15 km)**

L'Adg443, plus spécifique aux particules jaunes ?

Comme attendu, les produits représentant l'Adg443 et le Kd490 montrent des zones turbides similaires (Figure 52). La forme des « patches » turbides rejoint la description précédente du Kd490 : tout le long de la côte se trouvent des eaux plus chargées en particules jaunes et détritiques avec une diffusion des charges un peu plus large, jusqu'à 30 km au large que les MES totales représentées par le Kd490.

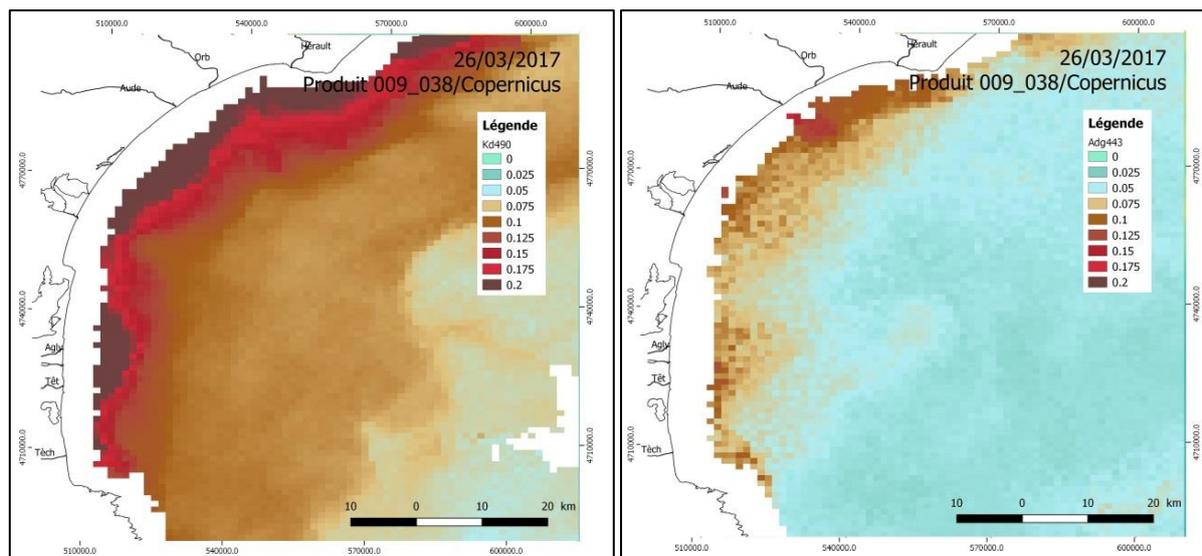


Figure 51 : Mise en évidence des similitudes de forme entre les zones turbides représentées par le Kd490 à gauche et le coefficient d'atténuation à 443nm (Adg443) à droite lié aux particules jaunes et détritiques.

Dans le contenu de la turbidité qui est emmené en mer par les panaches, les particules jaunes se dispersent de manière plus large en mer que la turbidité (ensemble des MES).

6.6. Une réponse non linéaire entre turbidité et intensité des débits

La proximité avec la côte et les fleuves induit une augmentation du Kd490 et le parallèle avec les débits semble, dans la majorité des cas, assez évident (Figure 52). D'après les données on peut signaler toutefois des exceptions : entre le 14 et le 27/02/2017, l'Agly accuse un débit supérieur à $150 \text{ m}^3/\text{s}$ et l'Orb à $550 \text{ m}^3/\text{s}$ sans que cela provoque une très importante hausse du Kd490 devant l'embouchure, contrairement à certaines crues au débit moins important mais au Kd490 plus conséquent. Entre le 25 et le 29/03/2017, seule une crue moyenne, atteignant difficilement plus de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la Têt, est enregistrée alors que le Kd490 monte jusqu'à $0,46 \text{ m}^{-1}$ à 8 km des côtes. De plus, bien que durant l'automne 2017 et le début de l'hiver 2018, seules quelques crues moyennes ponctuelles des fleuves héraultais sont enregistrées, le Kd490 reste élevé sur plusieurs mois avec un maximum le 28/11/2017. Pendant cette période, seul un épisode modéré de pluie intervient entre le 18 et le 19/10/2017 avec une pluviométrie journalière atteignant 37,2 mm (station de perpignan).

Les données montrent que le lien entre l'intensité de la turbidité côtière voisine de l'embouchure et l'intensité des débits des fleuves n'est pas toujours clair. La turbidité pourrait venir d'autres facteurs comme l'intensité des précipitations sur la plaine et le ruissellement sur les sols.

Il est par ailleurs possible que l'effet de plusieurs fleuves voisins se cumule.

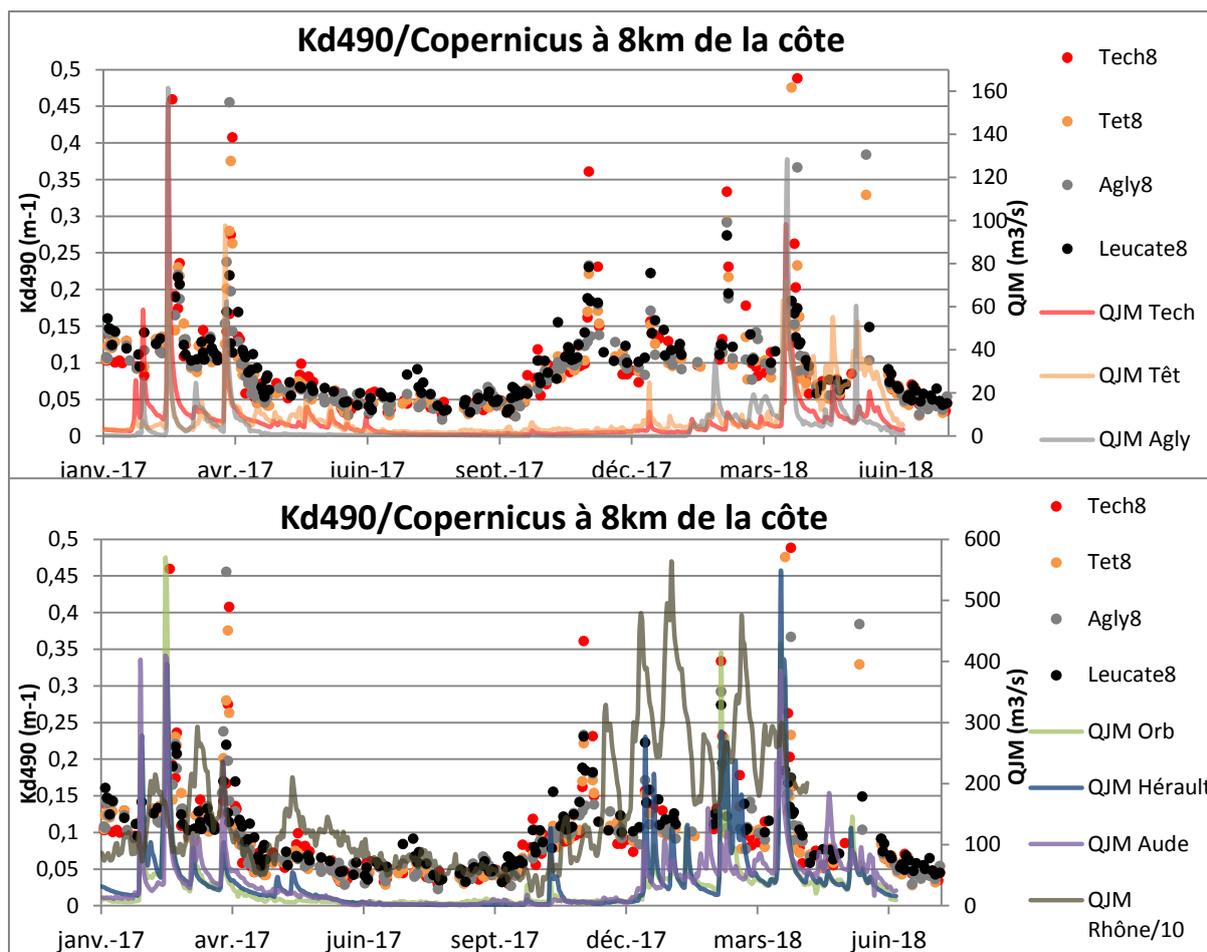


Figure 52 : Evolution du Kd490 à 8km à la côte, face aux trois fleuves côtiers du PNM, le Tèch, la Têt et l'Agly, et face au Cap Leucate. En parallèle, sur la figure du bas, il est représenté le débit de l'Orb, l'Hérault, l'Aude et le Rhône, situés plus au Nord et dont les rejets de MES peuvent être transportés jusque dans le PNM.

Source : Produit 009_038 de Copernicus

6.5. Amélioration de la résolution des informations de turbidité grâce aux images Sentinel-2

L'absence de traitement des eaux côtières n'a pas permis de tester la cohérence du gradient de turbidité entre les produits Copernicus et l'indice développé dans cette étude sur les images S2 dans les eaux les plus turbides, mais l'ensemble des points à 8, 18, 30 et 45 km de la côte a été extrait devant les principales embouchures du PNM (Figure 53). En raison des artefacts sur les bandes des images Sentinel 2 (cf. Chap 5.2) le lien direct entre le ratio bleu/vert et l'intensité de la turbidité n'est absolument pas clair. Les erreurs les plus fortes sont observées sur les eaux claires du large, mais plus proche du bord, malgré la forte dispersion des nuages de point, une augmentation de la turbidité observée sur les images S-2 est en général corrélée par Copernicus.

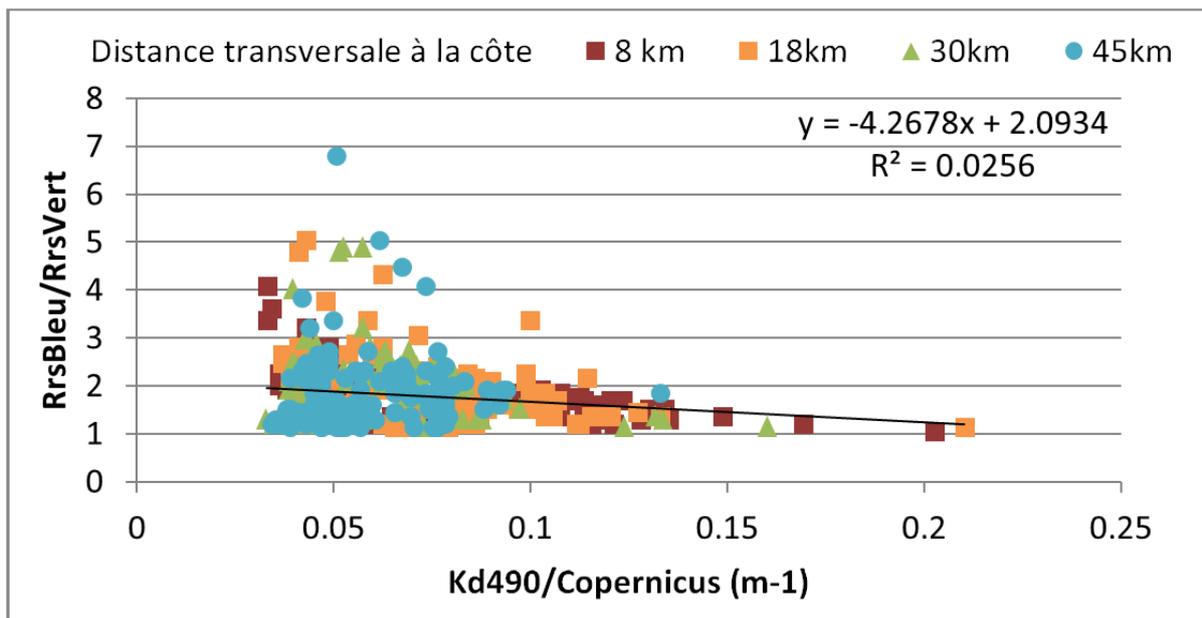


Figure 53 : comparaison du ratio bleu/vert (eau très turbide = 0 ; eau très claire = 8) des images Sentinel-2 ré-échantillonnée à 100 m avec le Kd 490 de Copernicus (eau claire = 0 ; eau turbide = 0,2) sur les données acquises entre janvier 2017 et juin 2018

Préalablement, afin d'éviter tout effet de support et de la différence de résolution spatiale entre les produits S2 et Copernicus, les pixels de S2 de 100 m² ont été redimensionnés à ceux de Copernicus, c'est-à-dire 1 km² grâce à l'outil « *SuperImpose Sensor* » d'OTB :

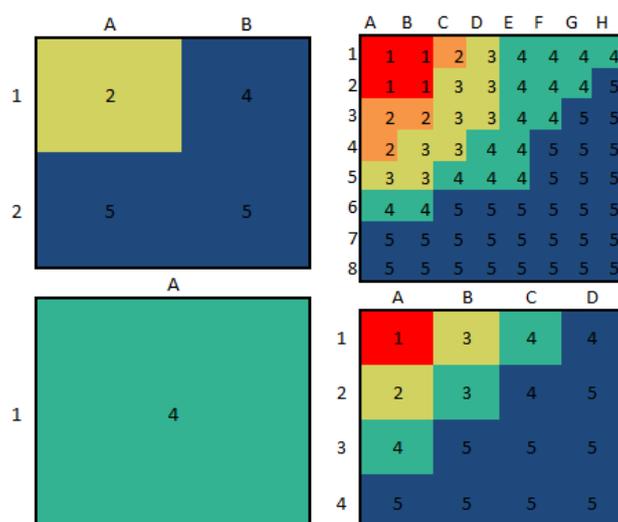


Figure 54 : Illustration de l'effet de la résolution spatiale sur la valeur des indices extraits.

La diminution de résolution spatiale signifie dans ce cas également une diminution du nombre de valeurs représentatives pour une même surface, et implique une moyenne de l'ensemble des pixels présents sous la surface d'un pixel. Ainsi, d'après la Figure 54, la valeur

d'un pixel sera différente (ex. intensité et couleur) entre deux capteurs de résolution différente si la donnée n'est pas au préalable ré-échantillonnée sur la plus basse résolution des deux capteurs.

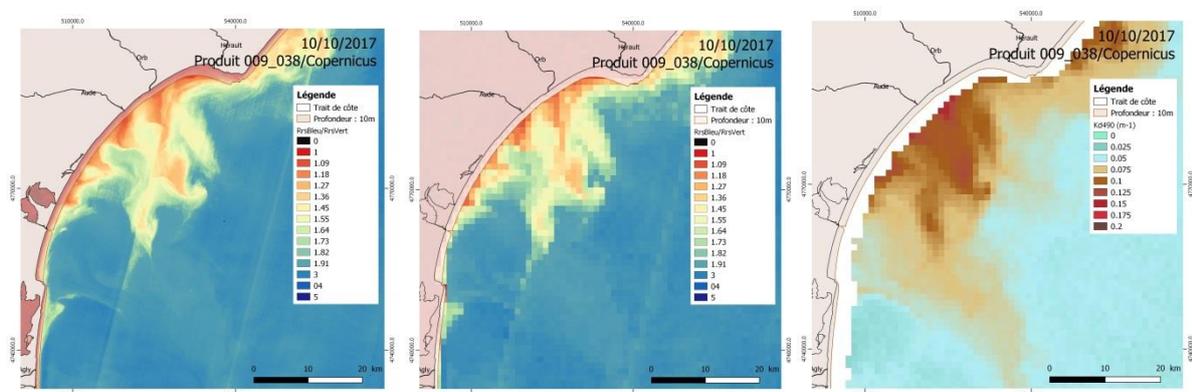


Figure 55 : Répartition de la turbidité de surface le 10/10/2017 cartographiée par le ratio RrsBleu/RrsVert (à gauche), le ratio RrsBleu/RrsVert redimensionné à la résolution de Copernicus (milieu) et le Kd490 de Copernicus (à droite). La comparaison des trois images montre bien une forme des panaches turbides similaire avec des fortes concentrations proches de la côte et une tâche plus concentrée face à l'Aude et l'Orb.

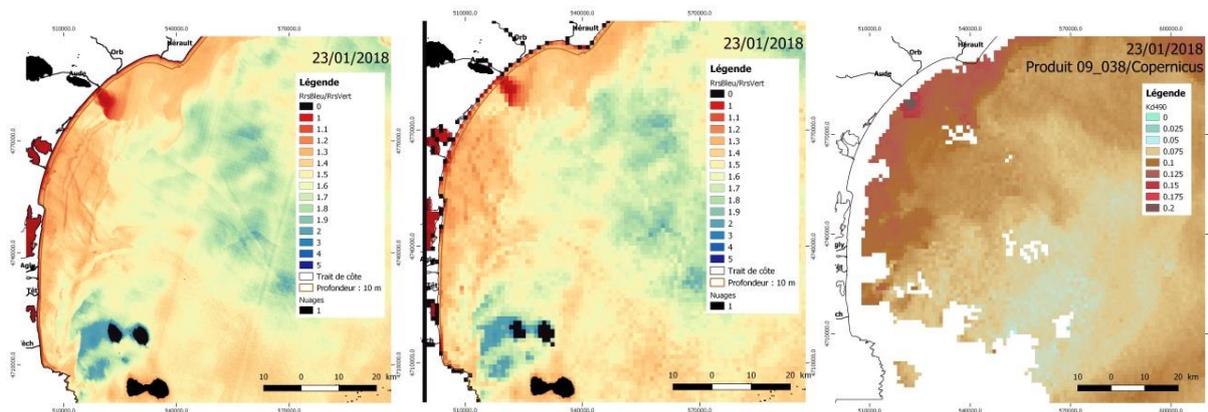


Figure 56 : Répartition de la turbidité de surface le 23/01/2018 cartographiée par le ratio RrsBleu/RrsVert (à gauche), le ratio RrsBleu/RrsVert redimensionné à la résolution de Copernicus (milieu) et le Kd490 de Copernicus (à droite). Le produit Copernicus présente des pixels manquants au Sud-Ouest du GdL, vraisemblablement à cause de nuages.

Des détails mis en évidence grâce à la haute résolution des images Sentinel-2

Grâce à leur haute résolution, les circonvolutions et les formes très complexes de lentilles turbides de surface sont observables sur les images S-2, et il est possible de discerner plusieurs zones et des limites franches au sein d'un grand panache à seulement quelques kilomètres de la côte. Sur la Figure 57 du 07/02/2018, c'est au niveau des panaches de l'Hérault et de l'Orb, qui semblent très chargés en MES, que l'on distingue des formes de panaches turbides avec des nébulosités aux aspects de « rizières » en étages. Sur de nombreuses images sont également visibles des circonvolutions, des gyres d'eaux turbides,

mais aussi des veines de turbidités plus linéaires formés par les courants, la direction des vents, et potentiellement la séparation de masses d'eau de surface de densités légèrement différentes.

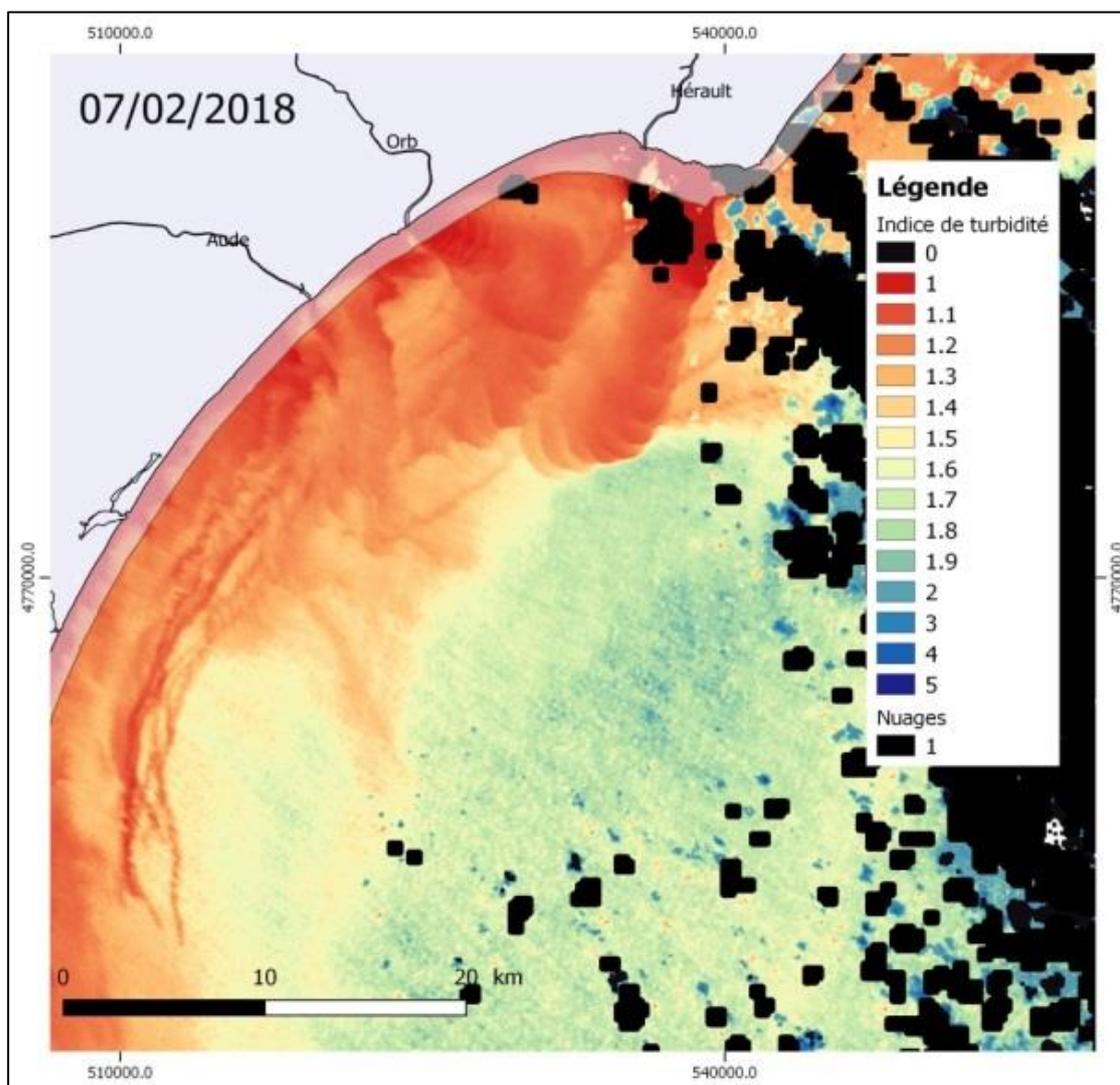


Figure 57 : Illustration de la finesse de Sentinel-2 par un zoom montrant les formes complexes des panaches en mer du 07/02/2018 autour d'Agde (zones masquées par des nuages en noir d'après les masques de Théia)

A l'inverse des valeurs brutes qui sont difficilement exploitables sur les images S-2, les différentes cartes montrent qu'indéniablement le lien des formes complexes des panaches avec la côte et les embouchures se trouve nettement mieux résolu avec les images S-2 qu'avec les images Copernicus.

7) Résultats sur les facteurs de dispersion des panaches avec la dynamique marine

L'objectif principal est dans ce chapitre de comprendre **quel(s) facteur(s) météo-marins influence(nt) la forme et la direction du déplacement des panaches ?**

Dans cette deuxième phase du travail, les images analysées provenant du satellite Sentinel-2A en 2018-2019 sont confrontés aux courants issus du produit 006_013 de Copernicus ainsi qu'aux données sur les vents du site windguru.cz

Pour des raisons de temps, seules certaines dates ont été choisies pour mettre en évidence des types de scénarios caractéristiques. Les 3 dates suivantes ont été sélectionnées : les 5 et 25 octobre 2018, et le 24 novembre 2018.

Pour compléter l'analyse des données de MARC ont été consultés et étudiés pour :

- La turbidité
- La production primaire
- La direction et la force des courants

Des scénarios étudiés entre janvier 2019 et mars 2019 ne sont pas présentés car des effets de bord importants sur le modèle numérique de courant de Copernicus témoignent de bugs.

Plusieurs hypothèses de travail ont initialement guidées cette étude :

- D'abord, lorsque des épisodes de Tramontane se produisent, les panaches sont poussés vers le large et inversement lorsqu'il s'agit de coups de vents de mer.
- Ensuite, il était envisagé que les courants marins tels que la dérive littorale et les courants secondaires au large du plateau, parfois issus du courant liguro-provençal, sont déterminants concernant la direction que prennent les panaches. Les premières observations laissaient à ce propos présumer que ces derniers étaient même prédominants face aux vents... Ceci expliquerait la régulière déviation vers le sud-ouest des panaches et des blooms phytoplanctoniques (depuis les fleuves du Roussillon-Narbonnais vers l'Espagne), phénomène parfois appuyé par les vents d'Est.
- Il y a-t-il possibilité de développement de la production primaire (chl-a) en l'absence de panaches simultanément ? Ceci dans le cas supposé où des fortes tramontanes

provoquent un phénomène d'*upwelling* (remontée d'eaux profondes) chargées en nutriments d'après plusieurs études de la littérature.

- Enfin, la part des fleuves côtiers situés au Nord du Golfe du Lion (Aude, Orb, Hérault, Rhône), présentant des plus forts débits que les fleuves côtiers du Roussillon est-elle prépondérante comme nous le supposions au départ ?

7.1. Etude de cas 1 –Blooms phytoplanctoniques du 05 octobre 2018

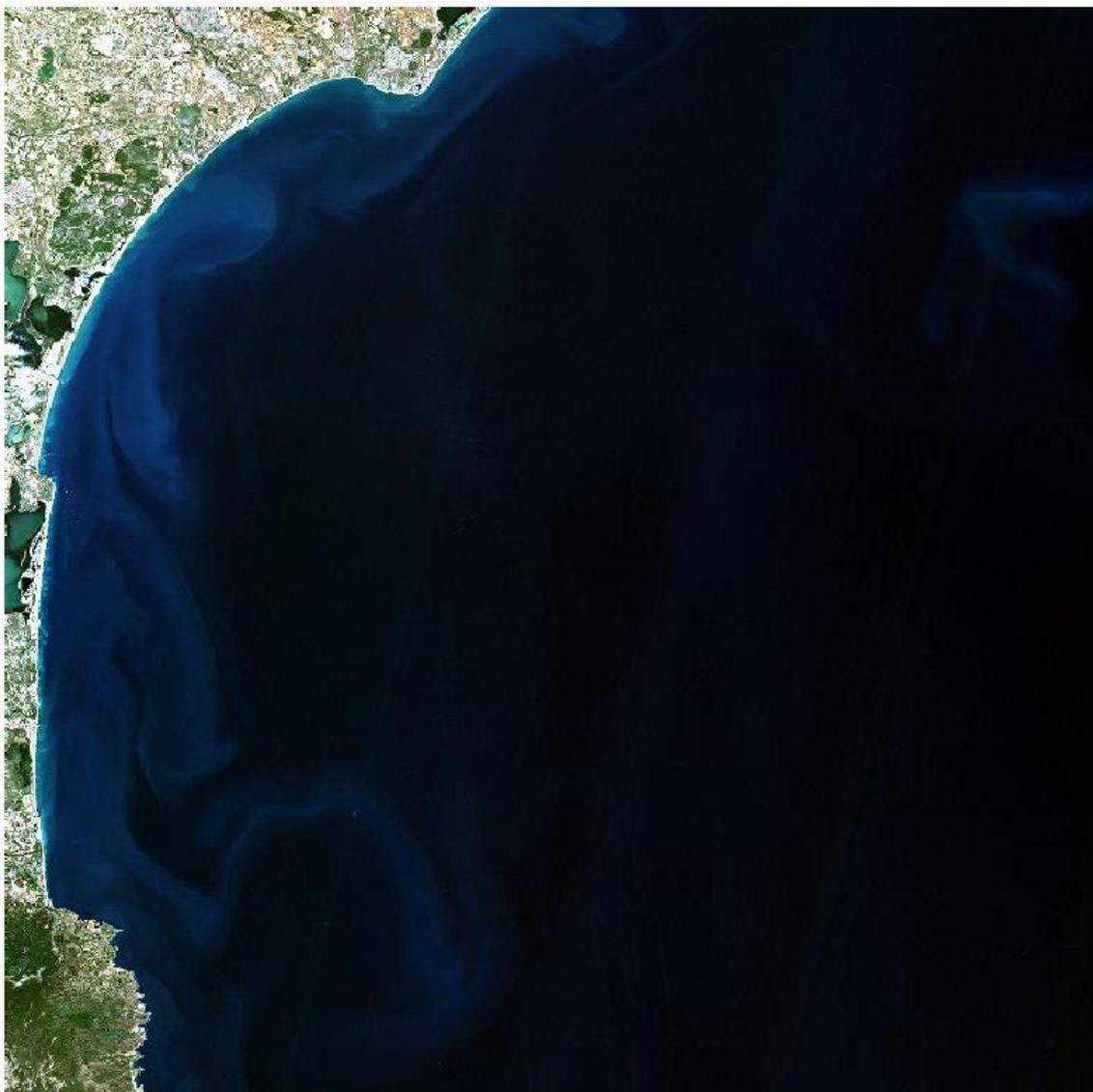


Figure 58 : Image originelle du satellite Sentinel-2A (Copernicus) du 05/10/2018, modifiée simplement en termes de gammes de couleur pour faire plus apparaître le panache turbide (augmentation du contraste/intensité).

A première vue, sur l'image Sentinel-2 du 5 octobre 2018 semblait se dessiner un léger panache turbide le long des côtes Narbonnaise et Roussillonnaises (Figure 58). Cependant, quand on observe les analyses satellites de MARC, on se rend compte que la turbidité ne dépasse pas 1,5 UTN (Unité de Turbidité Néphélogométrique), ce qui est faible compte tenu de l'échelle habituellement exploitée, les valeurs d'un panache se situant habituellement entre

0 et 30 UTN dans la région. Les formes distinguées sur l'image satellite apparaissent difficilement sur l'observation satellite analysée de la turbidité de MARC (Figure 60 en haut).

Il est à noter que l'image Sentinel-2 de la Figure 58 n'est pas celle qu'on peut observer, brute, sur Copernicus, Théia ou Sentinel-hub. Afin de rendre un peu plus visible les différences de couleurs de l'eau, la dynamique de l'image a été ré-étalée (ajustement de l'intensité des 3 bandes de couleur visibles) dans QGIS. En zoomant sur la mer, on réduit l'intervalle de la dynamique pour faire ressortir les contrastes grâce à l'outil « histogramme cumulatif de l'emprise locale » de la barre d'outils Raster. La cartographie de l'Ifremer issue de l'observation satellite (Figure 59) est plus conforme à l'observation à l'œil nu des images satellites recueillies le 5 octobre 2018 dans le sens où les panaches nébuleux de turbidité sont faiblement concentrés en MES et les parties visibles sont diffuses, et elles restent près des côtes.

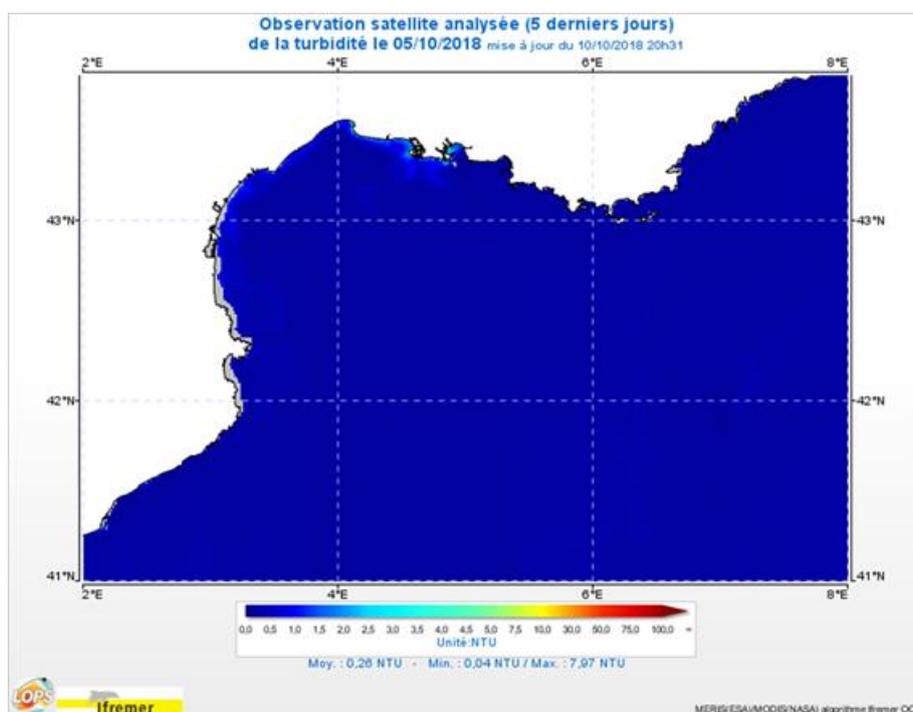


Figure 59 : modélisations de la turbidité le 05/10/2018 disponible sur le site de l'Ifremer (<http://marc.ifremer.fr/resultats>)

En revanche, concernant la chlorophylle-a, l'observation satellite analysée de MARC (cf. Figure 60 en bas) démontre que les limites sont sensiblement les mêmes que sur l'image S-2A dont le gain (la luminance) a été accentué. Cela présume qu'il s'agit probablement d'un bloom phytoplanctonique plutôt que d'un simple panache turbide de MES visible depuis l'espace. Lorsqu'on sélectionne uniquement les matières en suspension minérales, les limites des panaches turbides sont plus étendues et se confondent un peu plus avec celles de la production primaire sans toutefois que l'on puisse vraiment considérer qu'un panache

turbide lié à de la matière en suspension soit à l'œuvre sur la zone (on devrait dans ce cas s'attendre à une turbidité entre 3 et 50 $\mu\text{g/l}$ proche des côtes).

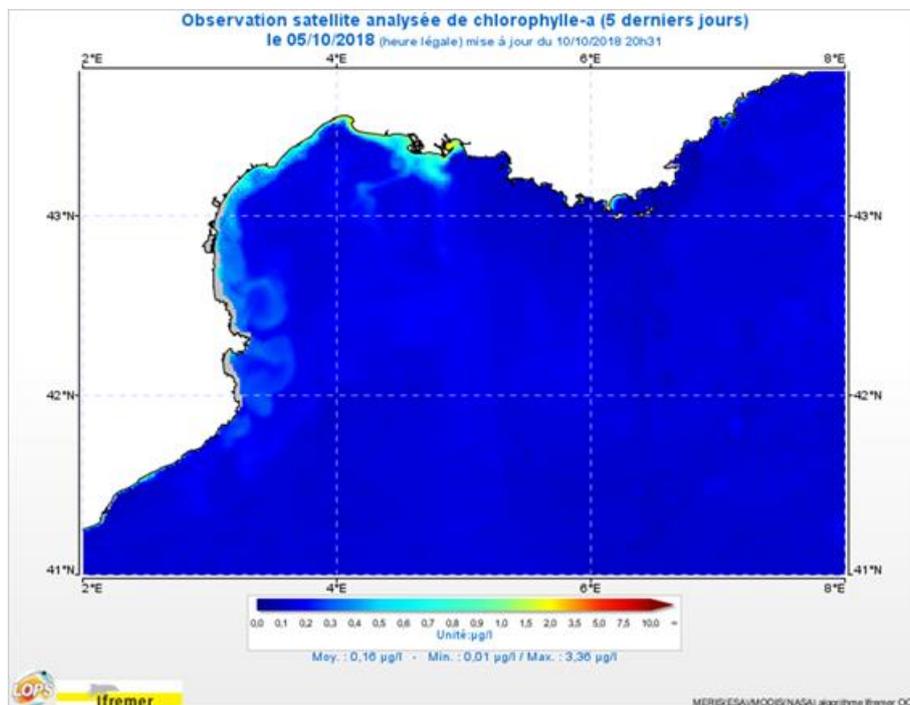


Figure 60 : modélisations de la chlorophylle-a dans le Golfe du Lion le 05/10/2018 disponible sur le site de l'Ifremer (<http://marc.ifremer.fr/resultats>)

Etant donné qu'il n'y a **pas** eu de pic de crue entre le début du mois d'août 2018 et le 8 octobre 2018, on peut exclure le rôle des MES au cours des semaines passées. On aurait pu en premier lieu supposer que ce sont les sédiments de l'avant côte qui sont remis en suspension par la houle.

On pouvait estimer en regardant l'image Sentinel-2 la présence d'une certaine houle a été importante sur les côtes ce jour-là. En effet, on peut voir sur les zooms (cf. Figure 61) que le déferlement et le jet de rive est bien visible. Cependant, les modèles de vagues de MARC démontrent que la hauteur significative (H_s) de la houle est faible : cette dernière oscille entre 0,75 m et 1 m le 5 octobre et était seulement de 0,25 m en moyenne la veille. La mer est finalement assez peu agitée, et il semble peu probable que l'essentiel de la turbidité soit liée à la remise en suspension des sédiments du fond par les vagues. C'est pourquoi il paraît plus probable que la turbidité visible soit liée au phénomène de développement planctonique.

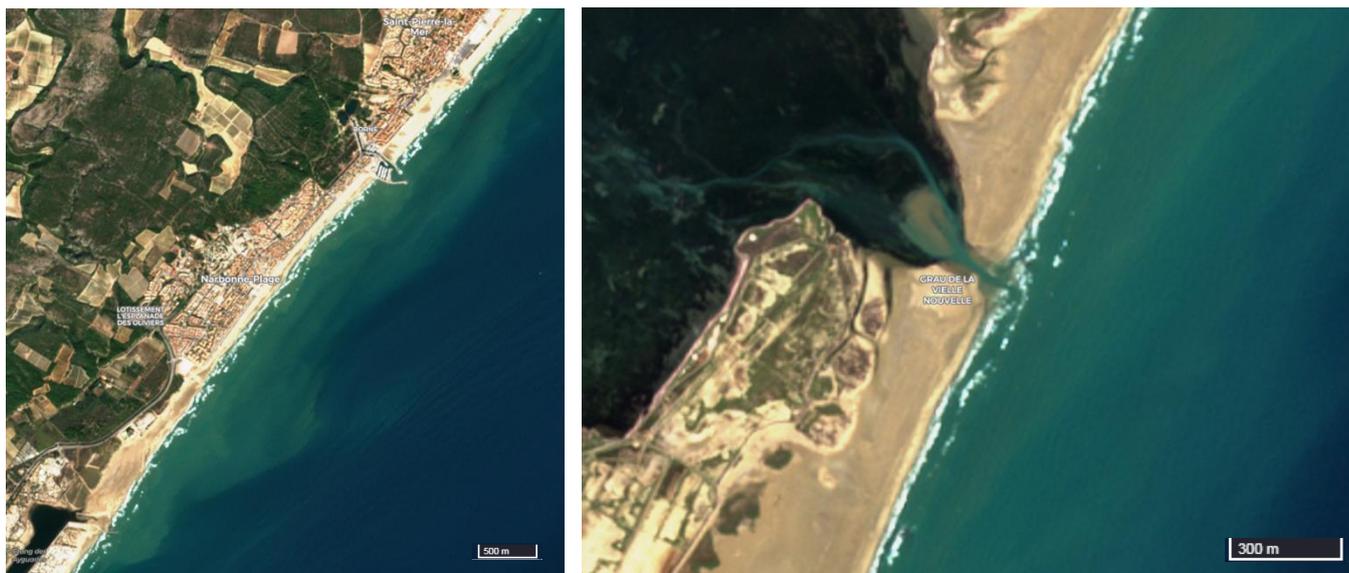


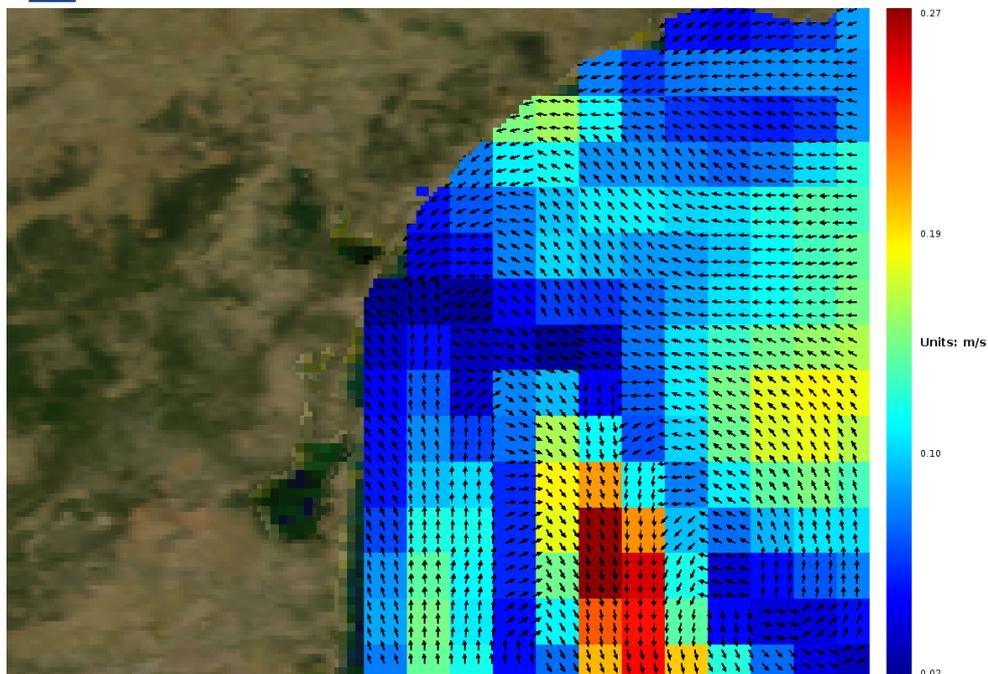
Figure 61 : Zoom sur l'image S2 du 05/10/2018 (Sentinel-Hub) sur lesquels on peut voir des vagues à la côte.

Les courants de surface ce jour-là prennent des directions diverses d'après Copernicus. Un courant S-N sur la côte du PNM vient heurter un courant NE-SO placé plus au nord avant d'être entraîné au niveau de Gruissan vers le large par un courant NO-SE comme on peut le voir sur les différents niveaux de zooms de la Figure 62. De manière générale on peut voir que la circulation des courants est perpendiculaire à la côte lorsqu'elle vient du large puis les courants descendent et longent les côtes. Le courant liguro-provençal, aussi appelé courant nord méditerranéen (CNM), se manifeste ici au large du Golfe du Lion. Il apparaît en turquoise sur la Figure 62. On peut d'ailleurs voir que la branche de courant qui descend vers le Sud à partir de Gruissan est ensuite reprise par le CNM.

Au large de l'Espagne les courants de surface forment des boucles de circulation plus intense (voir MARC, Figure 63) et entraînent les efflorescences algales dans ces gyres, d'où la forme en crochet que l'on peut observer au sud-ouest de la Figure 60. Ces cellules de courant sont supposées agir aussi sur la remontée d'eau profonde qui associe généralement de fortes teneurs en éléments nutritifs, ceux-là même dont se nourrit le phytoplancton. Les résultats de LOPS montrent à ce titre un bloom important sur toute la période du 15 octobre au 23 octobre 2018.



Horizontal Velocity (3D) - Hourly Mean
sea water velocity
Date: 2018-10-05 10:30 UTC
Depth: 1.02m



Horizontal Velocity (3D) - Hourly Mean
sea water velocity
Date: 2018-10-05 03:30 UTC
Depth: 1.02m

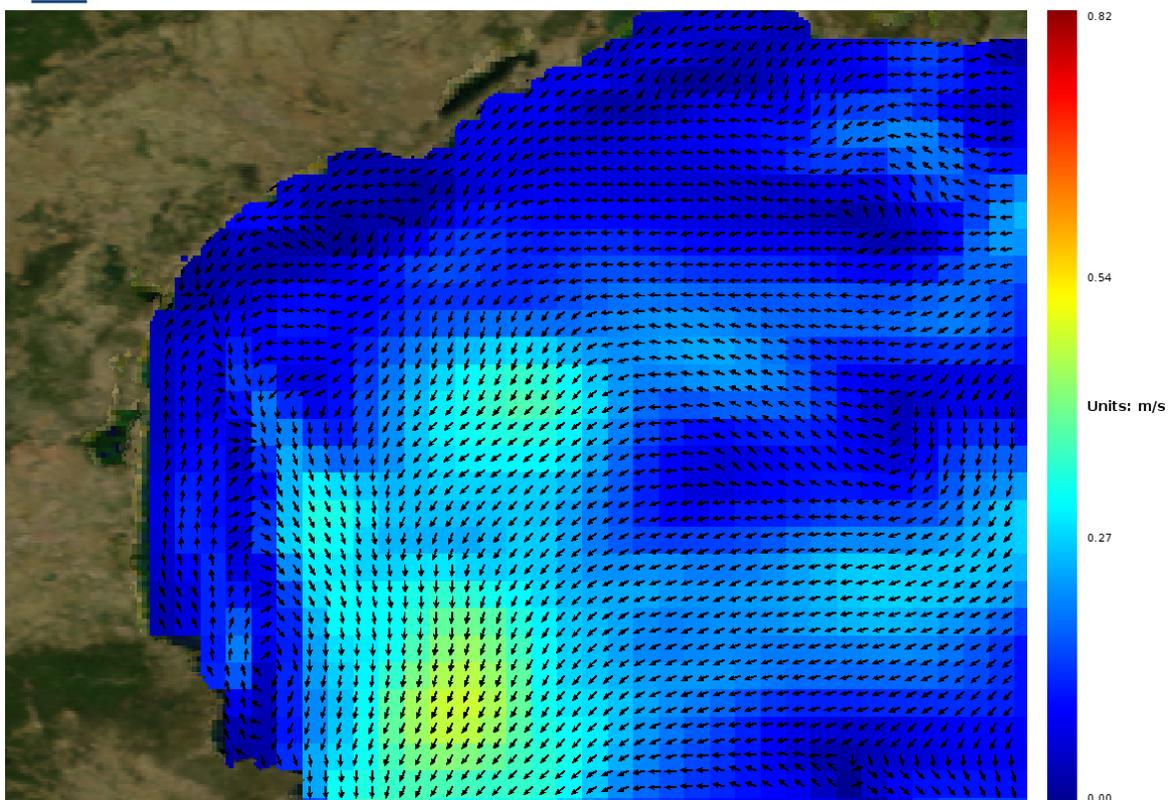


Figure 62 : Modélisation des courants de surface le 05/10/18 à 3h30 et zoom à 10h30 (Copernicus)

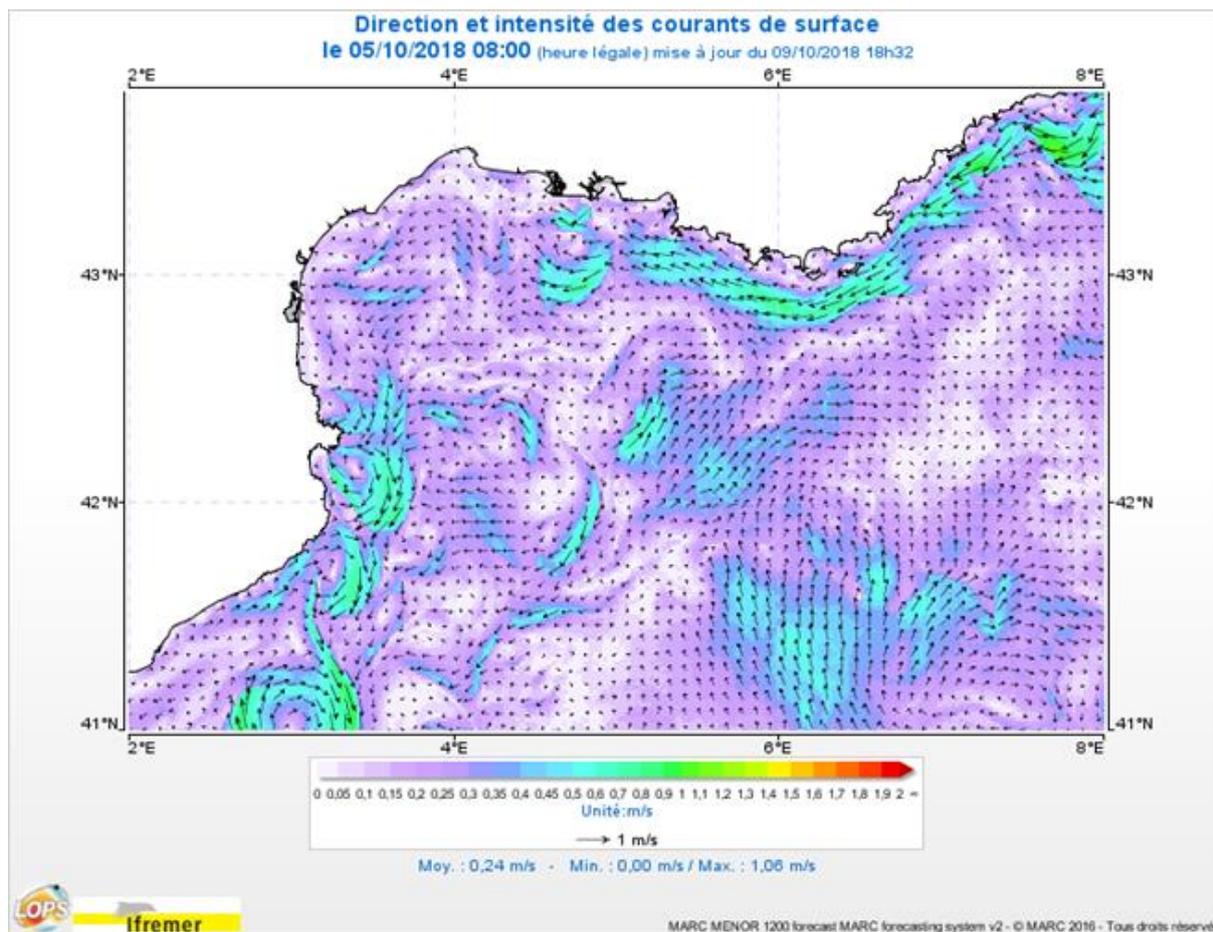


Figure 63 : modélisation des courants d'après le modèle Mars-3D de l'Ifremer (MARC) le 05/10/2018 au matin

Afin d'apprécier l'impact des forçages marins sur les panaches turbides, la courantologie a été cartographiée et superposée aux résultats de l'analyse des images S-2A avec l'indice de Froidefond (Figure 64). Différents éléments notables ressortent :

D'abord concernant la courantologie, les tourbillons turbides aux différentes embouchures du Rhône s'expliquent par les courants en spirale à proximité du Grand Rhône et à l'Ouest du Petit Rhône. Au large, la branche de courant fort ondulant d'est en ouest jusqu'aux limites Nord-Est du Parc naturel marin (PNM) correspond certainement au courant liguro-provençal (CNM) et à certaines de ses intrusions sur le plateau. La courantologie proche-littorale est majoritairement orientée NE-SO sur l'ensemble des côtes du Golfe du Lion même si, pour la zone du Parc, la circulation est inverse. En effet, les courants remontent depuis l'Espagne jusqu'à Gruissan selon un axe sud-nord. La convergence étant tributaire du **reflux**, un courant fort est dirigé vers le large et le sud-est.

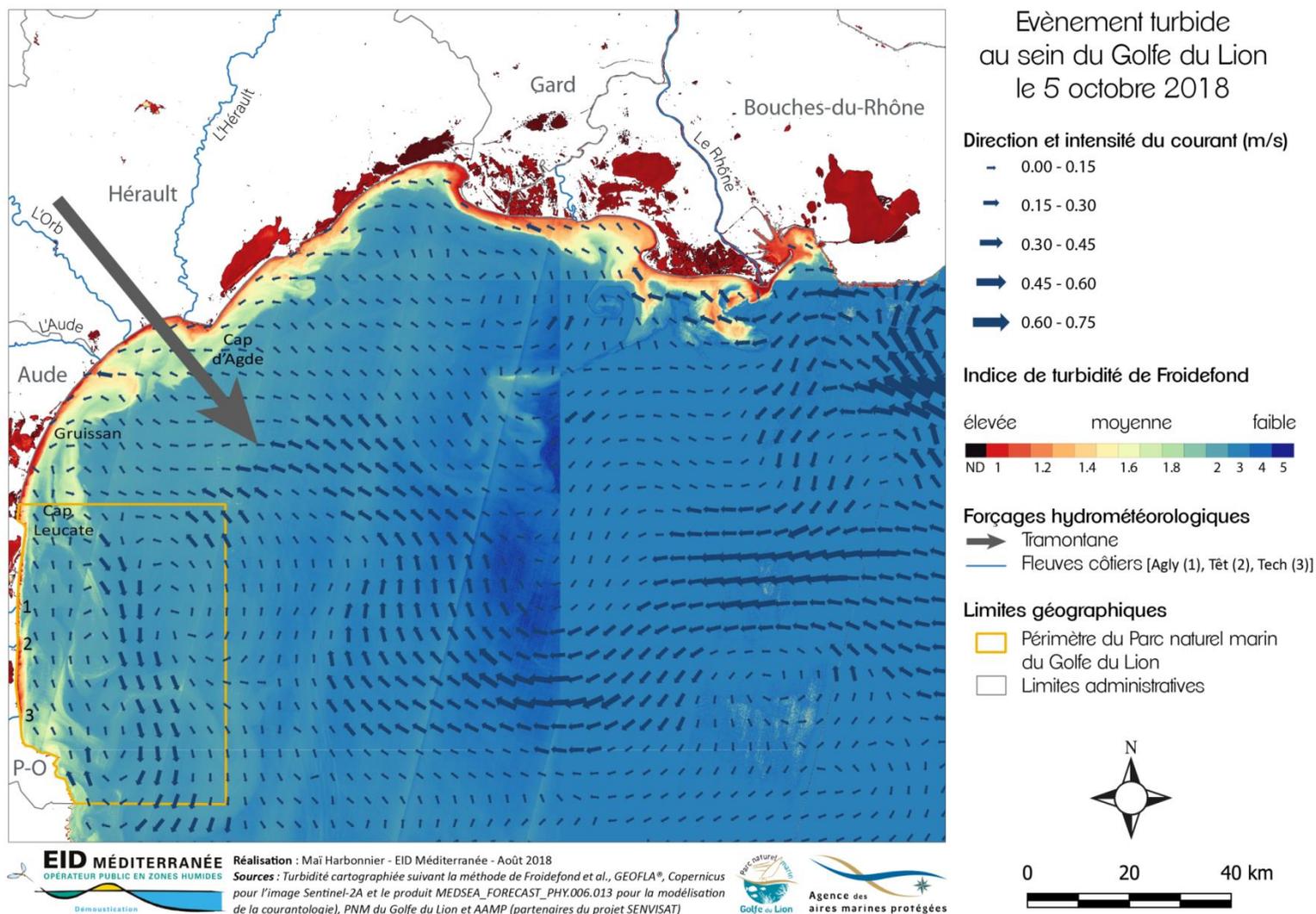


Figure 64 : superposition de la turbidité interprétée des images S-2 et de la courantologie de Copernicus (à 10h30) lors du bloom phytoplanctonique du 05 octobre 2018

La forte vitesse du courant de reflux vers le SE au large du PNM est donc probablement alimentée par la courantologie générale et non par les vents. Les données modélisées de vent archivées par Windguru.cz (Figure 65) indiquent un épisode de forte tramontane du 01 au 03 octobre, 2 jours auparavant, ayant probablement lancé sur le plateau un entrainement des eaux vers le sud-est. De fait, on peut voir que le 5 octobre il n'y a pas particulièrement de vent. Un certain temps d'inertie (ou de retard dans la réponse) semblerait affecter les courants après des épisodes de vent violents.



Figure 65 : archives météorologiques Windguru du 29 septembre 2018 au 7 octobre 2018. La force du vent est ici exprimée en nœuds (à gauche du tableau) toutes les 3h chaque jour. Au milieu, la flèche donne la direction des vents et à droite se trouve les températures de l'air.

Il est connu dans la région que les phénomènes d'upwelling vont de pair avec des épisodes intenses de Tramontane. A. Schaeffer en parle dans sa thèse sur l'impact du vent sur la circulation hydrodynamique dans le Golfe du Lion en 2011. L'efflorescence algale visible le 5 octobre peut donc découler de cet épisode venteux des jours précédents. Le courant très fort qui traverse le cœur du Parc est lui aussi certainement influencé par la Tramontane du 01 au 03 octobre 2018.

Ensuite, concernant la turbidité, on observe sur la carte que les panaches sont plaqués aux côtes car en dehors de la courantologie proche-littorale, les courants arrivent perpendiculairement à la côte. Les blooms sont donc confinés à proximité du littoral, ils ne peuvent se dissoudre au large. Il existe peut-être une exception, s'il on considère la cartographie juste, au niveau du Rhône. En effet, la « gyre » située à l'embouchure du Petit Rhône semble entraîner le panache turbide des côtes camarguaises au Sud-Ouest, formant une traînée qui se dissout progressivement au large. On note également que près du Parc, la veine de courant fort emporte avec elle une langue turbide au large de Gruissan (témoin d'une ancienne boucle de courant proche de la côte dans la nuit du 04 au 05 octobre ; cf. Figure 62 du bas).

Ainsi, pour expliquer ce phénomène turbide du 5 octobre, plusieurs hypothèses ont été avancées, telles que la présence de précipitations sur le littoral, la remise en suspension des sédiments à la côte, la charge de MES terrigènes apportées par les cours d'eau en mer, le rôle du vent, etc. **Il s'avère que dans ce cas précis, un développement d'un bloom phytoplanctonique large échelle est en cause en raison de la tramontane et certainement d'un épisode d'upwelling côtier.**

Selon les observations du LOPS, il apparaît que des blooms phytoplanctoniques se sont répétés par la suite entre le 15 et le 23 octobre 2018 → **les blooms phytoplanctoniques sont donc des évènements qui peuvent durer plusieurs jours sur le littoral**

Avant l'épisode suivant que nous allons étudier, le bloom phytoplanctonique en cours s'essouffle et se disperse.

7.2. Etude de cas 2 - Evènement de turbidité forte le 25 octobre 2018



Figure 66 : tuile T31TEH originelle de l'image Sentinel-2A du 25/10/2018 (Copernicus), gamme de couleur légèrement modifiée

Enquête sur la mise en place de l'évènement (avant observation ; Figure 68)

Le 20 octobre semble se produire un évènement turbide majeur, en grande partie lié à l'Aude, à l'étang de l'Ayrolle (grau de la Vielle Nouvelle) et la Berre, une petite rivière qui se jette dans cet étang. Le secteur du Parc naturel marin est camouflé par les nuages contrairement aux côtes camarguaises. Le Rhône ne semble pas être responsable de la turbidité dans cette partie ouest du Golfe du Lion. Sur l'image satellite S3-OLCI du 22 octobre 2018, on observe un évènement turbide important, sans doute lié à l'Aude en particulier et dans une moindre mesure à l'Hérault. Des tâches turbides se distinguent devant l'étang de l'Ayrolle (grau de la Vielle Nouvelle), le long des côtes de Canet-en-Roussillon et au Sud d'Argelès-sur-Mer. Le 23 octobre 2018, une turbidité importante est visible entre Agde et la frontière espagnole, en particulier à l'embouchure de l'Aude, et le long de l'étang de

Leucate. La mer est également turbide aux abords du Rhône. Cependant les deux événements ne semblent pas être liés d'après l'image Landsat-8.

Résultats

L'image du 25 octobre 2018 est le témoin d'un événement turbide extrême. On décèle très clairement (même sans modifier les contrastes de l'image Sentinel-2, comme en Figure 66) la présence de panaches turbides denses au sein du Parc naturel marin et tout particulièrement entre le Cap d'Agde et le Cap Leucate, jusqu'à certains points très au large du Golfe du Lion (situés à au moins 45 ou 50 km des côtes). Au nord, au large de l'étang de Thau, l'eau est aussi turbide au vu des différences de couleurs de mer. Au sud, une bande turbide, longue, et d'environ 10 à 15 km de large s'étend de l'Espagne jusqu'à Leucate.

Les déversements de l'Aude et de l'étang de l'Ayrolle (complexe des étangs du Narbonnais) dans la Méditerranée engendrent de très importants panaches aux formes particulièrement intrigantes (Figure 67).

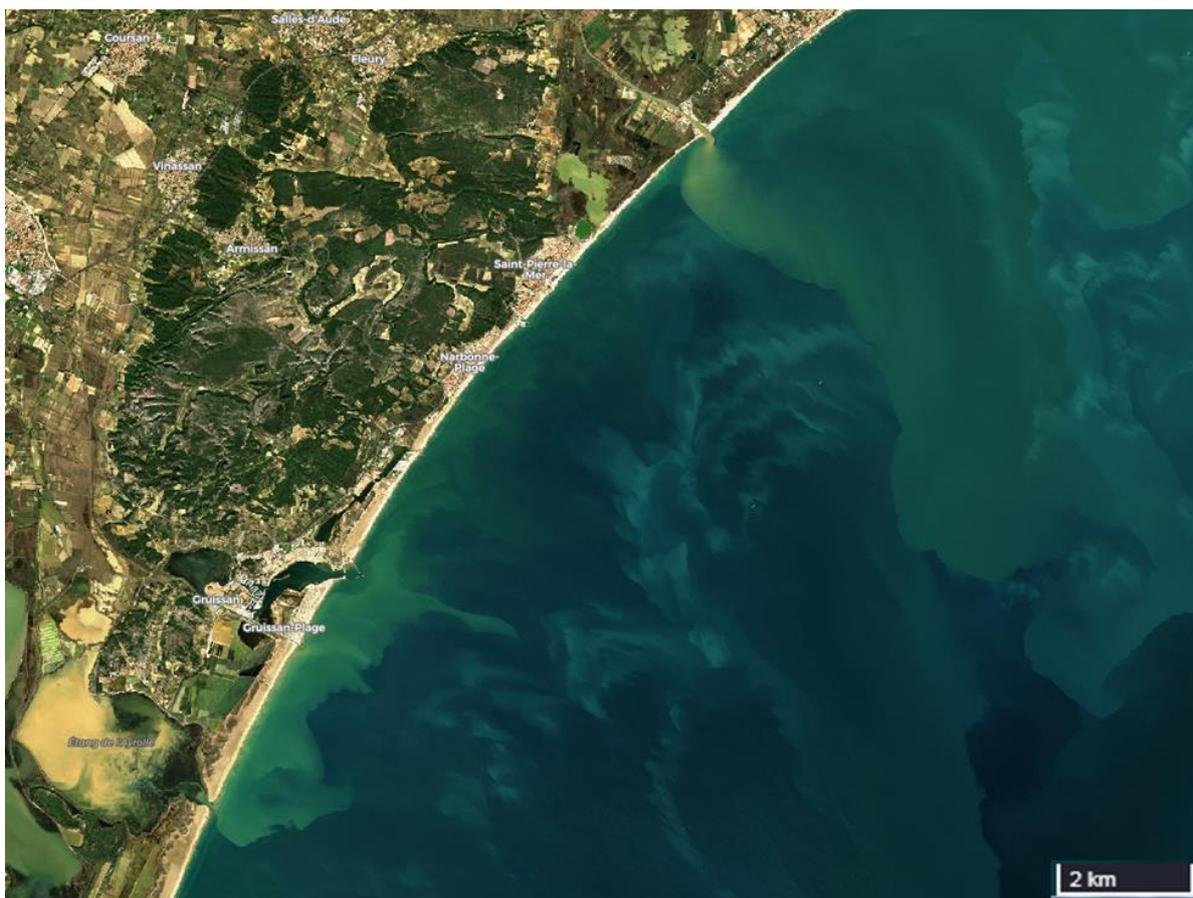


Figure 67 : zoom sur la côte narbonnaise le 25/10/18 (images sentinel-2 visibles sur le site EO Browser)

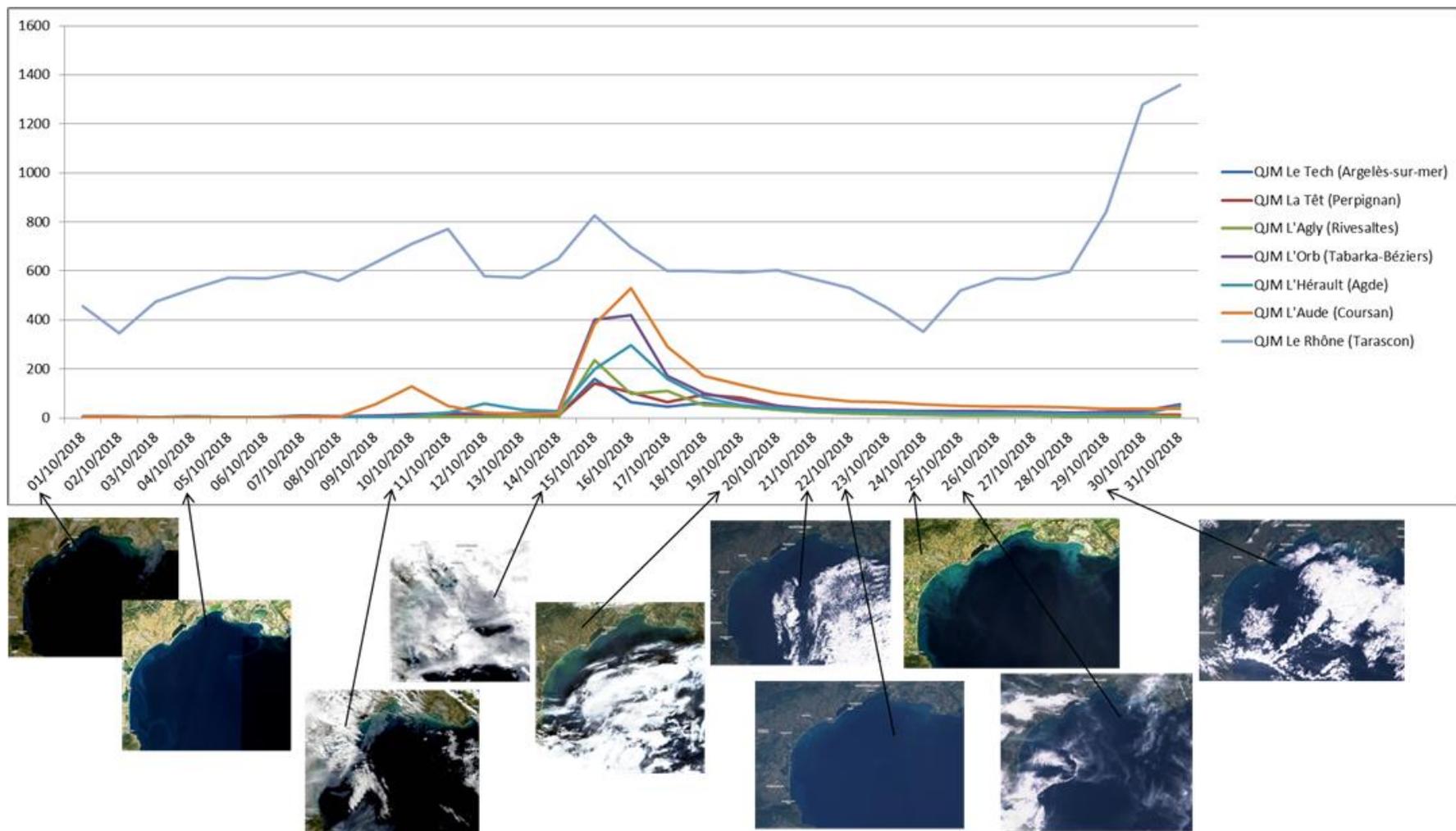


Figure 68 : Mise en place de l'évènement du 25/10 : débits moyens journaliers du mois d'octobre 2018 et images satellites multisources libre d'accès (EO Browser)

Au vu des résultats de MARC, on peut voir sur la Figure 69 ci-dessous, que l'activité chlorophyllienne est conséquente le 25 octobre 2018.

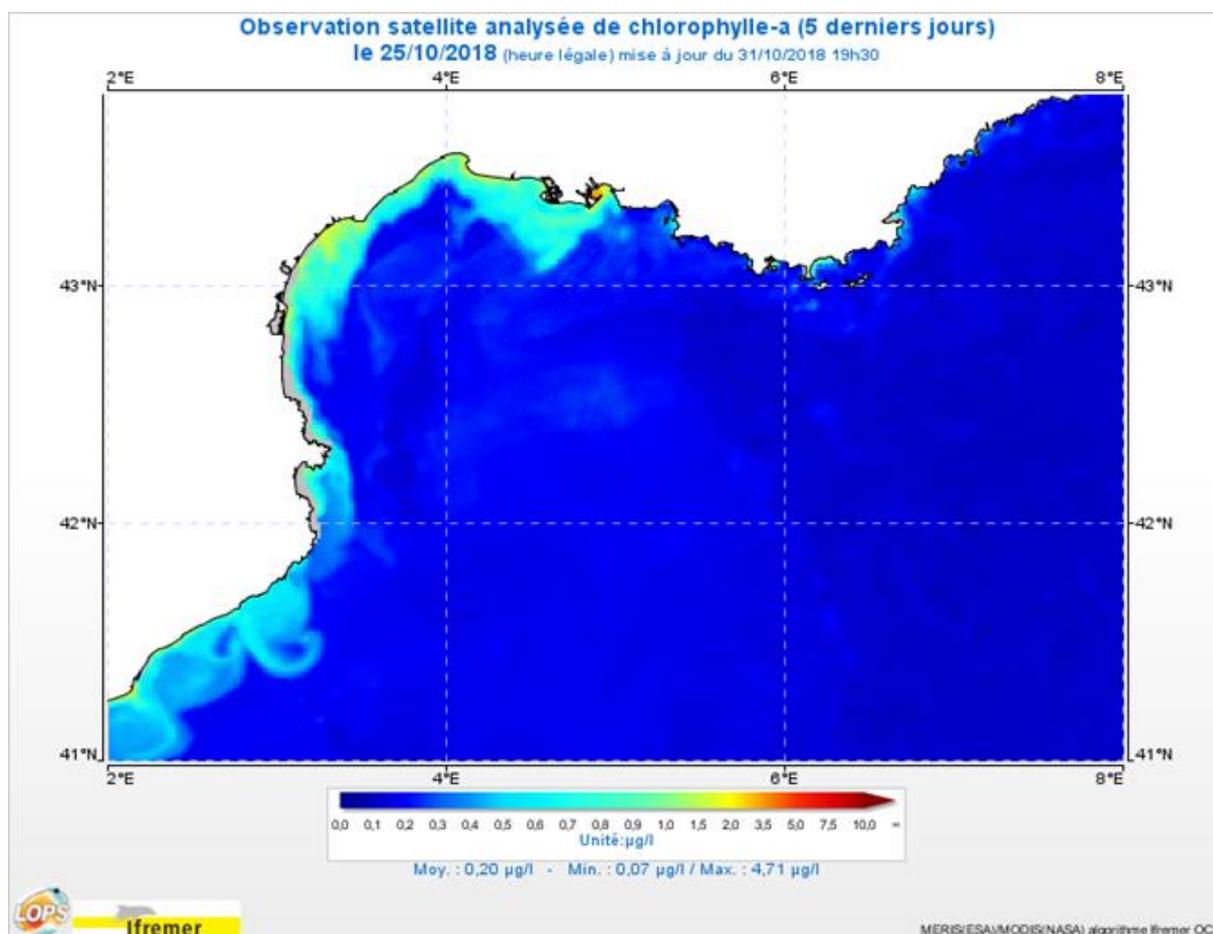


Figure 69 : résultats des observations satellites et interpolations de la plateforme MARC sur la Chl-a le 25/10/2018 au moment de l'observation de S-2

Les limites sont sensiblement les mêmes que celles visibles à l'œil nu sur les images brutes dont les contrastes sont un peu accentués. On note un pic de production primaire record à 4,71 µg/L dans le Golfe de Fos (à l'est du Rhône). La chl-a se situe environ entre 0,7 µg/L et 2 µg/L sur le reste des côtes nous concernant. L'embouchure de l'Aude abonde de chlorophylle-*a*.

En se basant sur la Figure 67 on constate que les fleuves côtiers comme l'Aude et les graus tels que celui de la Vielle Nouvelle (étang de l'Ayrolle) apportent ce jour-là une importante charge sédimentaire. **Ces apports terrigènes semblent être à l'origine des panaches turbides et des blooms phytoplanctoniques** qui en découlent et qui vont potentiellement renforcer l'empreinte du panache. La turbidité est d'environ 4 NTU à 4,8 NTU sur l'ensemble du littoral du Golfe du Lion. La part de matières en suspension minérales le 25 octobre 2018

s'élève à 5 mg/L et atteint les 10 mg/L à l'embouchure de l'Aude, de l'Hérault et du Petit Rhône d'après MARC.

D'après la Figure 68, on peut aisément conclure que **les crues du 14 au 20 octobre 2018, puis la lente décrue généralisée, sont à l'origine de ces panaches**. En effet, les précipitations mesurées à Avignon, Nîmes, Montpellier, Béziers et Perpignan les jours précédents (du 10 au 24 octobre 2018) ont été abondantes dans toute la région et correspondent à un pic de crue généralisé de l'ensemble des fleuves côtiers du Golfe du Lion comme le prouve la Figure 70.

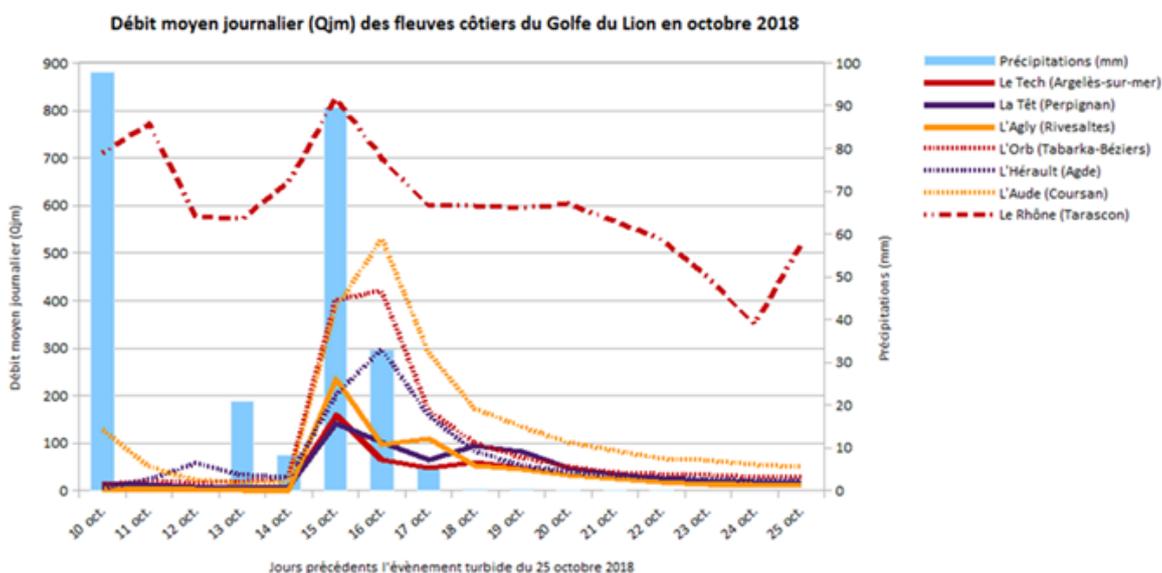


Figure 70 : Débits moyens journaliers (Qjm) et Précipitations moyennes sur plusieurs stations (en mm/24h) du 10 au 25 octobre 2018 (sources : Météociel et BanqueHydro)

De la même manière que cela a été fait pour l'évènement du 5 octobre 2018, une cartographie de la courantologie et de la turbidité du 25 octobre permet d'observer plus en détail les phénomènes naturels particuliers de propagation des panaches turbides (cf. Figure 72).

De prime abord, on note que le CNM se divise en 2 branches de courants pénétrant le Golfe du Lion. L'une des deux branches trace à peu près le même sillon que celui qu'on pouvait observer le 5 octobre et pénètre le Golfe du Lion en profondeur avant de redescendre vers l'Espagne. Elle entraîne avec elle les panaches du Rhône, mais en direction du large et sans le déplacer comme habituellement le long de la côte. Une seconde branche de courant puissant entraîne les panaches turbides vers le sud/sud-est.

Vu le sens des courants le long des côtes, on aurait tendance à dire que les impacts du Rhône dans le Parc sont faibles voire inexistants. En effet, la dérive littorale longe les Bouches-du-Rhône d'est en ouest avant de glisser vers le sud au niveau de l'étang de Beauduc, suite à la rencontre d'une autre dérive littorale en sens inverse. Depuis Agde jusqu'à ce point de rencontre, les courants côtiers longitudinaux sont d'ouest en est. En revanche, à l'ouest du cap d'Agde la dérive littorale s'inverse à nouveau, elle descend vers le sud jusqu'à une rencontre avec, là encore, une dérive inverse provenant d'Espagne, au niveau de Canet-en-Roussillon. Cette rencontre entre les deux dérives conduit à la **formation**

d'un tourbillon au sein du Parc naturel marin. Ce dernier maintient les panaches le long des côtes d'Argelès-sur-Mer et de Saint-Cyprien. En revanche, plus au Nord du Parc, les panaches sont entraînés vers le large et vers le Sud. Plus au nord-est d'Agde, les courants semblent, sur la côte, maintenir la turbidité sur le domaine côtier comme sur le secteur du Roussillon.



Figure 71 : archives météorologiques Windguru du 19 au 29 octobre 2018. Pour rappel, la force du vent est ici exprimée en nœuds (à gauche du tableau) toutes les 3 h de chaque journée ; au milieu la flèche donne la direction des vents et à droite se trouve les températures de l'air.

Enfin, comme pour le 5 octobre, c'est la Tramontane qui influence certainement cette exportation vers le sud-est des panaches turbides des côtes narbonnaises vers le large en créant à la base ces tourbillons et ces courants que nous classerions comme **courants « d'arrachement »** (du large, en analogie avec ceux du domaine de déferlement des vagues, ou courants de baïnes).

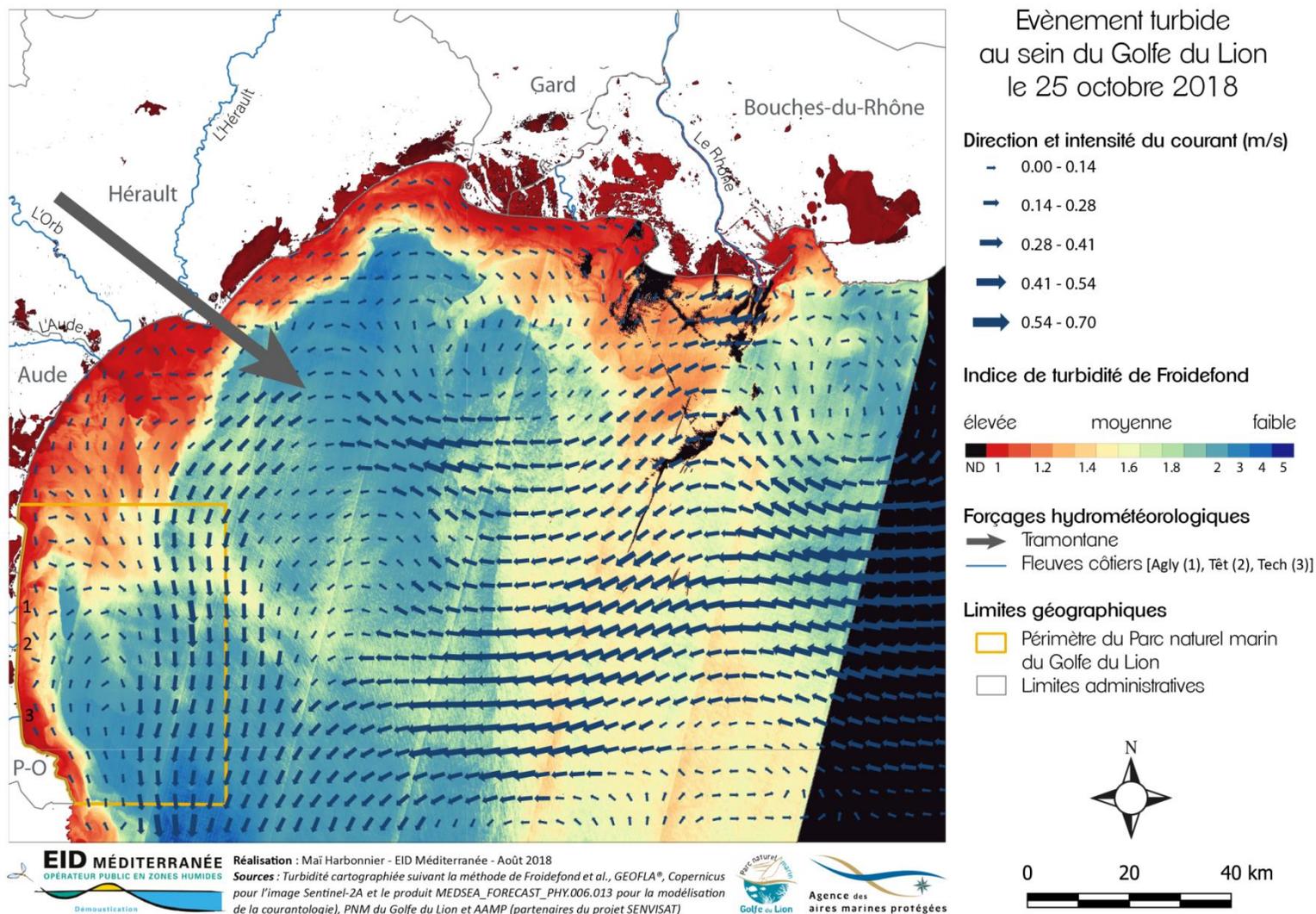


Figure 72 : superposition de la turbidité interprétée des images S-2 et de la courantologie de Copernicus à 10h30 lors des panaches de crue le 25 octobre 2018

7.3. Etude de cas 3 - Evènement de turbidité du 24 novembre 2018

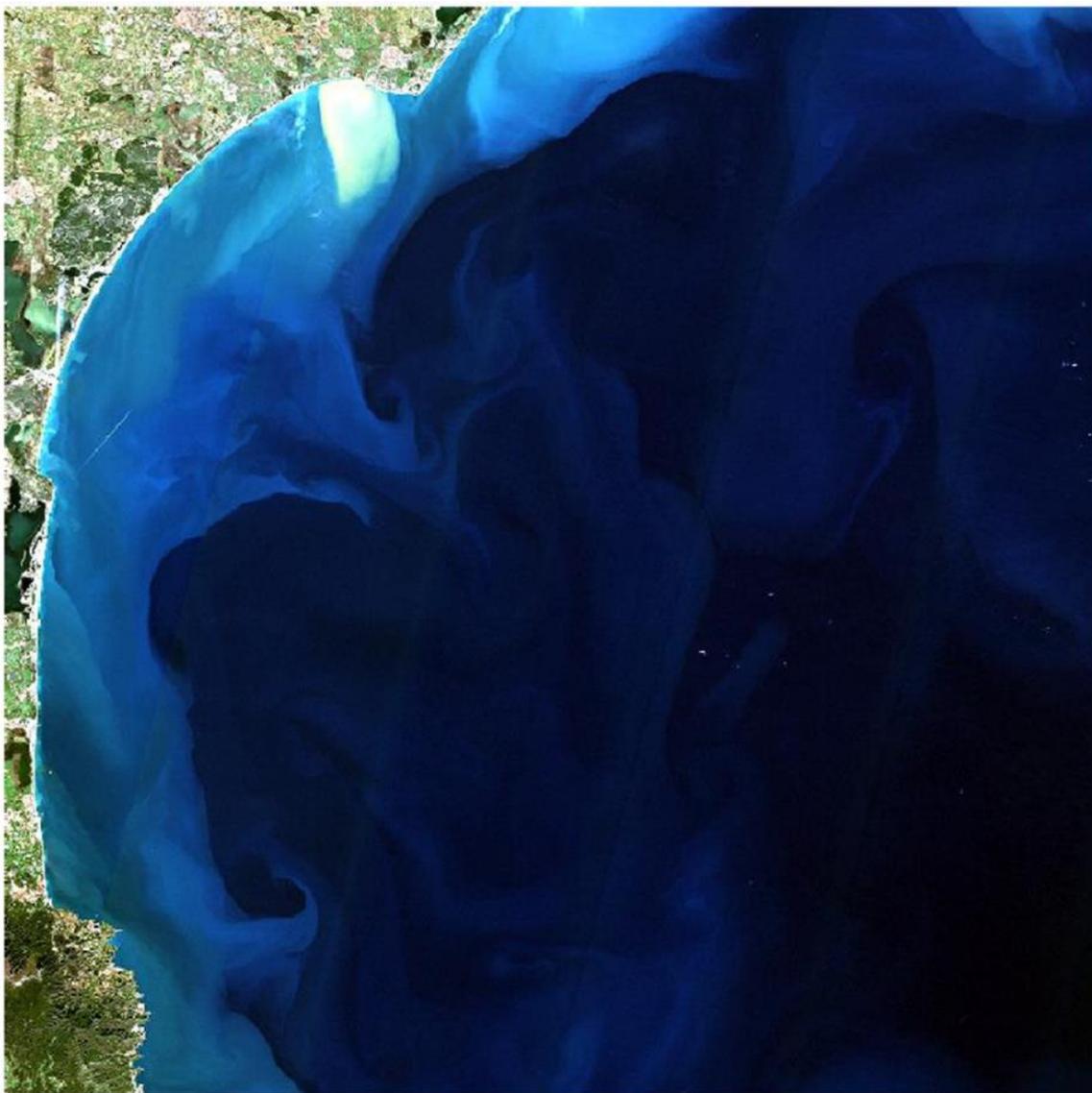


Figure 73 : Tuile T31TEH de l'image satellite Sentinel-2A (Copernicus) du 24/11/2018, modifiée.

L'évènement survenu le 24 novembre 2018 ressemble beaucoup à celui du 25 octobre. S'il apparaît comme étant plus turbide encore que le premier, ce sont approximativement les mêmes limites de panaches et des courants d'arrachement vers le large qui se dessinent une nouvelle fois.

D'après la Figure 73 un imposant panache à l'embouchure de l'Hérault se détache sur plusieurs kilomètres vers le Sud. Lorsqu'on regarde les précipitations et les débits moyens journaliers des jours précédents (cf. Figure 74), on constate que de fortes pluies se sont déversées les 9, 17, 20 et 23 novembre 2018. S'en sont suivies des crues pour l'ensemble des fleuves côtiers, en particulier pour l'Hérault et le Rhône.

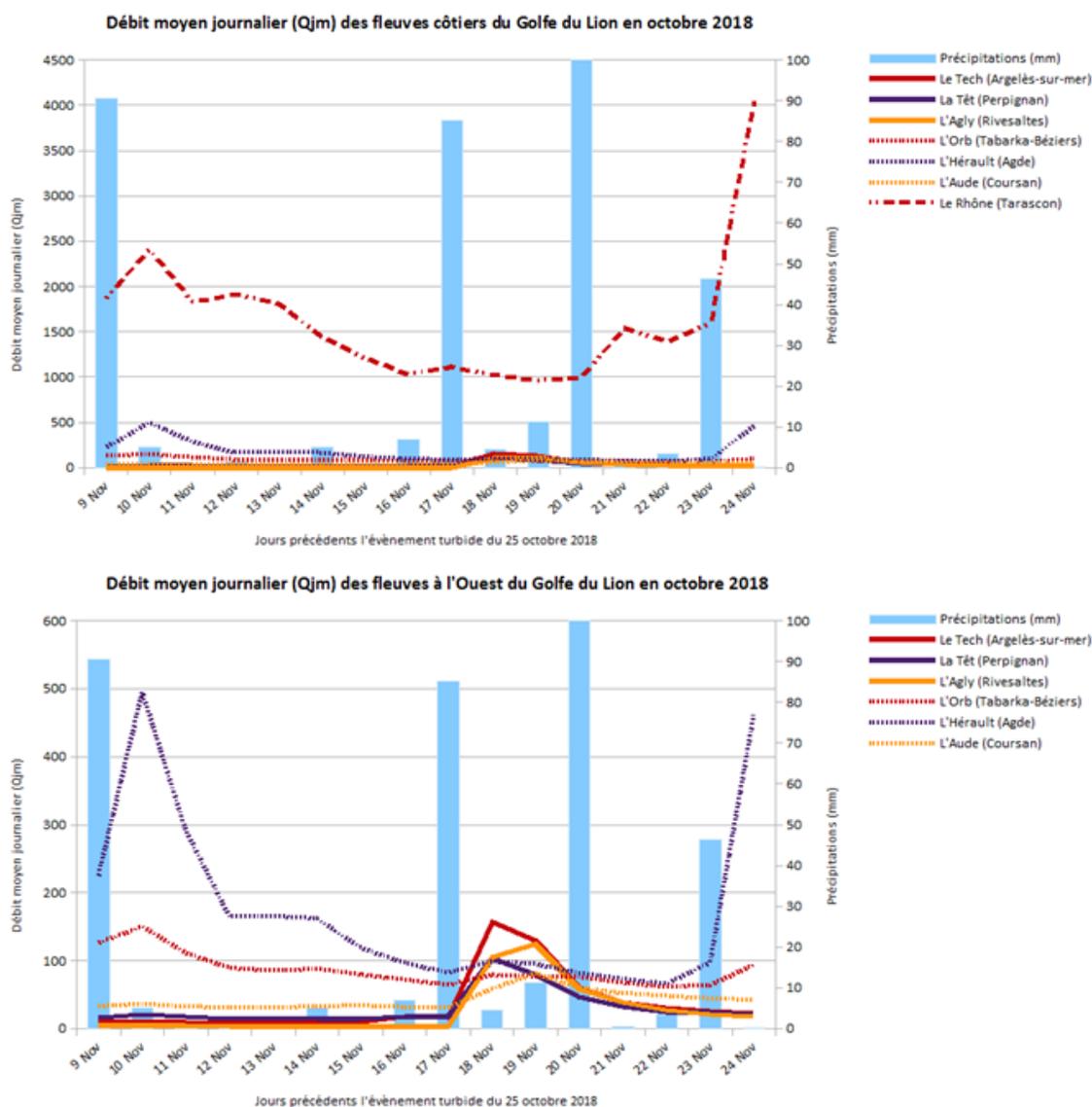


Figure 74 : Débits moyens journaliers (Qjm) et Précipitations moyennes (en mm) de plusieurs stations du 9 au 24 novembre 2018 (Météociel et BanqueHydro)

Ainsi, les panaches visibles directement aux embouchures de l'Hérault et du Rhône ce 24 novembre 2018 résultent d'un pic de crue commencé 2 jours plus tôt. En outre, le débit des 3 petits fleuves côtiers du PNMGL, le Tech, la Têt et l'Agly, se sont eux aussi accrus les jours précédents. En effet, sur le second graphique du bas où le Rhône a été retiré, on peut voir que les débits de ces 3 fleuves se sont intensifiés, en particulier du 17 au 22 novembre, avec un pic le 18 novembre pour le Tech et la Têt et le lendemain pour l'Agly. L'Orb et l'Hérault, en crue le 10 novembre 2018 (et jusqu'au 14 novembre pour l'Hérault), ont vu leur débit s'accroître à nouveau à partir du 23 novembre, juste avant l'image analysée.

Lors de cet épisode du 24 novembre, ce sont donc plusieurs épisodes de panaches plus anciens qui sont venus « polluer » la trace des nouvelles panaches des crues en cours, celui de l'Hérault notamment.

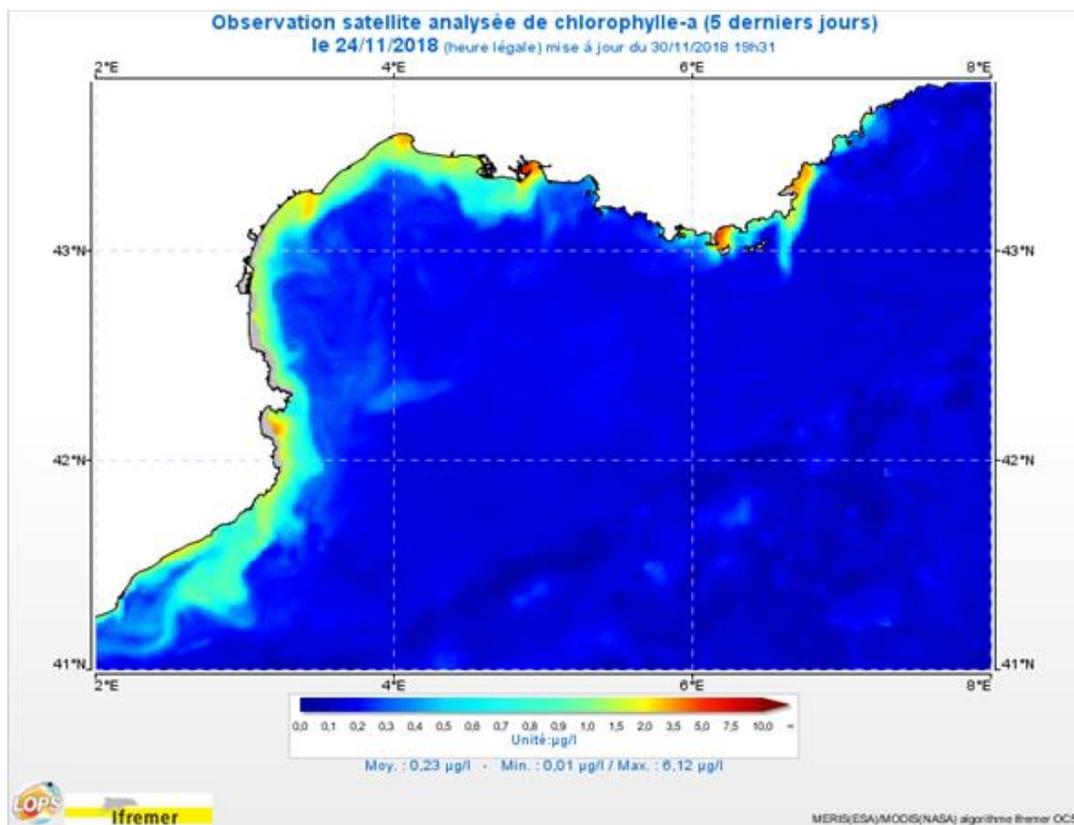


Figure 75 : Modélisation de la chlorophylle-a par LOPS (Ifremer-MARC) le 24/11/2018

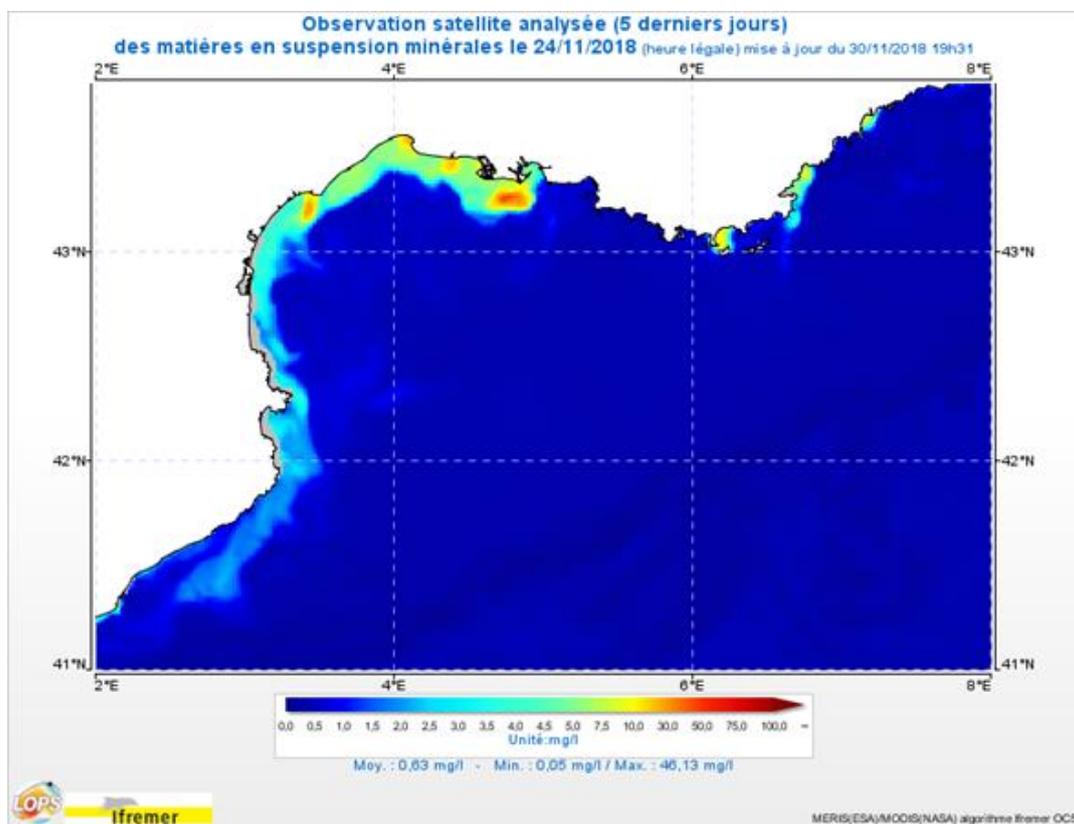


Figure 76 : Modélisation des MES minérales par LOPS (Ifremer-MARC) le 24/11/2018

A partir de ces observations, on peut supposer qu'il s'agit avant tout de turbidité mais qu'autant de matières en suspension et apports terrigènes dans la mer a sans doute engendré un pic de production primaire, du fait des apports en nutriments. Les observations satellites de MARC (cf. Figure 75) indiquent qu'en effet l'activité chlorophyllienne est conséquente le 24 novembre 2018. La charge des eaux côtières en MES minérales est également très élevée (cf. Figure 76).

Les blooms phytoplanctoniques se superposent aux panaches turbides, ils se développent de façon prolifique aux embouchures des fleuves. Le port de Fos-sur-Mer, l'embouchure du petit Rhône, le Golfe d'Aigues Mortes (embouchure du Vidourle, petit fleuve du Gard), et l'embouchure de l'Hérault sont marqués par une forte densité de chlorophylle-a. Les plus fortes densités de MES se situent systématiquement aux embouchures de fleuves. Le plus large des panaches se situe à l'embouchure du Grand Rhône, la charge en MES de cette zone s'élève à plus de 80 µg/L sur plusieurs kilomètres en mer d'après MARC. L'embouchure du Petit-Rhône, celle du Vidourle au Grau-du-Roi, et celle de l'Hérault sont aussi chargées en MES mais dans une moindre mesure vu la différence de débit de ces fleuves.

D'après la modélisation de Copernicus des courants du 24 novembre repris ici dans un SIG (Figure 78) les **courants tourbillonnent** particulièrement ce jour-là. Comme on peut le voir trois tourbillons se situent à proximité ou au cœur du parc naturel marin. 4 autres « gyres », bordés par le CNM au sud, forment une sorte de diagonale SO-NE de courants en boucles. Le CNM semble les « bloquer » ou à l'inverse « les générer » en demeurant à la lisière du plateau continental. Ces « gyres » donnent d'ailleurs l'impression de marquer la limite entre le plateau et la pente continentale, ils indiquent sans doute la présence de canyons sous-marins vu leur emplacement. Certains des tourbillons sont les mêmes que ceux observés lors d'autres événements turbides. C'est le cas de celui localisé à l'embouchure du Petit Rhône, et de ceux situés au large des côtes espagnoles et dans les limites du Parc. Face au CNM du large les vitesses des courants côtiers tourbillonnaires sont plus faibles. Concernant les courants longitudinaux côtiers ils sont également très changeants. En effet, des calanques marseillaises jusqu'au Port-de-Bouc, la direction des courants *longshore* est E-O. Après plusieurs zones giratoires, le courant est d'ouest en est dans le Golfe d'Aigues Mortes. De Frontignan jusqu'à l'embouchure de l'Orb, les courants longitudinaux suivent une direction NE-SO avant de rencontrer un courant diamétralement opposé remontant depuis le cap Leucate. De l'Agly jusqu'à la frontière espagnole, les courants descendent vers le sud avant de se confronter à un courant inverse, remontant vers le nord.

Concernant la forme des panaches, on note sur les zones de convergences des courants *longshore* **des courants d'arrachements qui propulsent les panaches turbides au large**. Ils sont souvent liés à des structures tourbillonnaires qui forment le **rouage** des courants côtiers. En dehors de zones d'arrachement, encore une fois les panaches se cantonnent à la côte mais sur bande assez large de plusieurs kilomètres (15 à 20 km en moyenne).

Le panache du Rhône est très important le 24 novembre, il semble peu étendu vers le large mais cette impression est très certainement due au fait que la dalle T31TFH présente ce jour-là des artéfacts qui faussent les résultats de l'indice de Froidefond.

Au vu de l'intensité et de la direction des courants ainsi qu'à la forme des panaches, on peut conclure que la turbidité provient principalement du Rhône et de l'Hérault, de l'étang de la Palme, du Grau de Leucate et dans une moindre mesure du Libron, de l'Aude et du grau de l'étang de l'Ayrolle. Les panaches issus du Rhône ont très certainement un impact au moins jusqu'aux côtes héraultaises. Ils viennent peut-être ensuite se mêler à ceux de l'Hérault et aux autres panaches issus des plus petits fleuves côtiers, vu les courants forts observés au large de Frontignan et de l'étang de Thau.

D'après une consultation des modélisations de courant de MARC entre le 16 et le 24 novembre, un régime principal de courants côtiers longshore s'est mis en place sur toute la période, avec une descente depuis le Rhône vers l'Espagne. Les contre-dérives sont restées minoritaires dans le temps.

A cause des nuages (cirrus) qui ont camouflés le Golfe d'Aigues-Mortes, devant Sète et devant l'Orb, on ne peut pas voir de résultat en Figure 78.

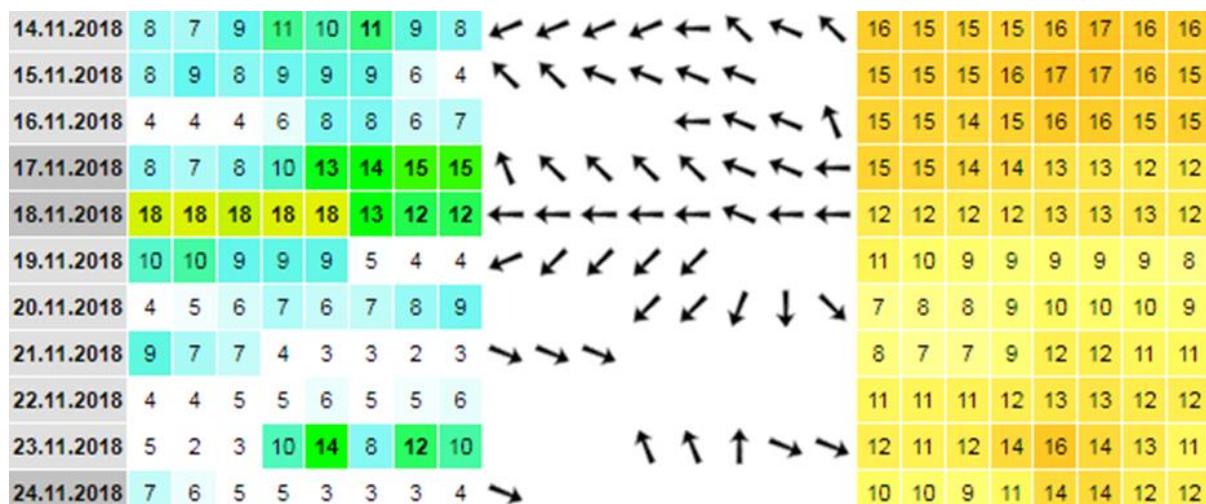


Figure 77 : archives météorologiques Windguru du 14 au 24 novembre 2018. Pour rappel, la force du vent est ici exprimée en nœuds (à gauche du tableau) toutes les 3 h de chaque journée ; au milieu la flèche donne la direction des vents et à droite se trouve les températures de l'air.

Les archives windguru indiquent qu'il n'y a pas eu de vent les jours précédents cet événement turbide majeur, mais il est possible que la courantologie dominante vers l'ouest dans la partie nord du Golfe du Lion (apportant la turbidité du Rhône vers l'Hérault) ait été amorcé par l'épisode de vent marin d'est du 18 novembre 2018, mais il est probable que les courants eut été amorcés simplement par des différences de densité et des pressions.

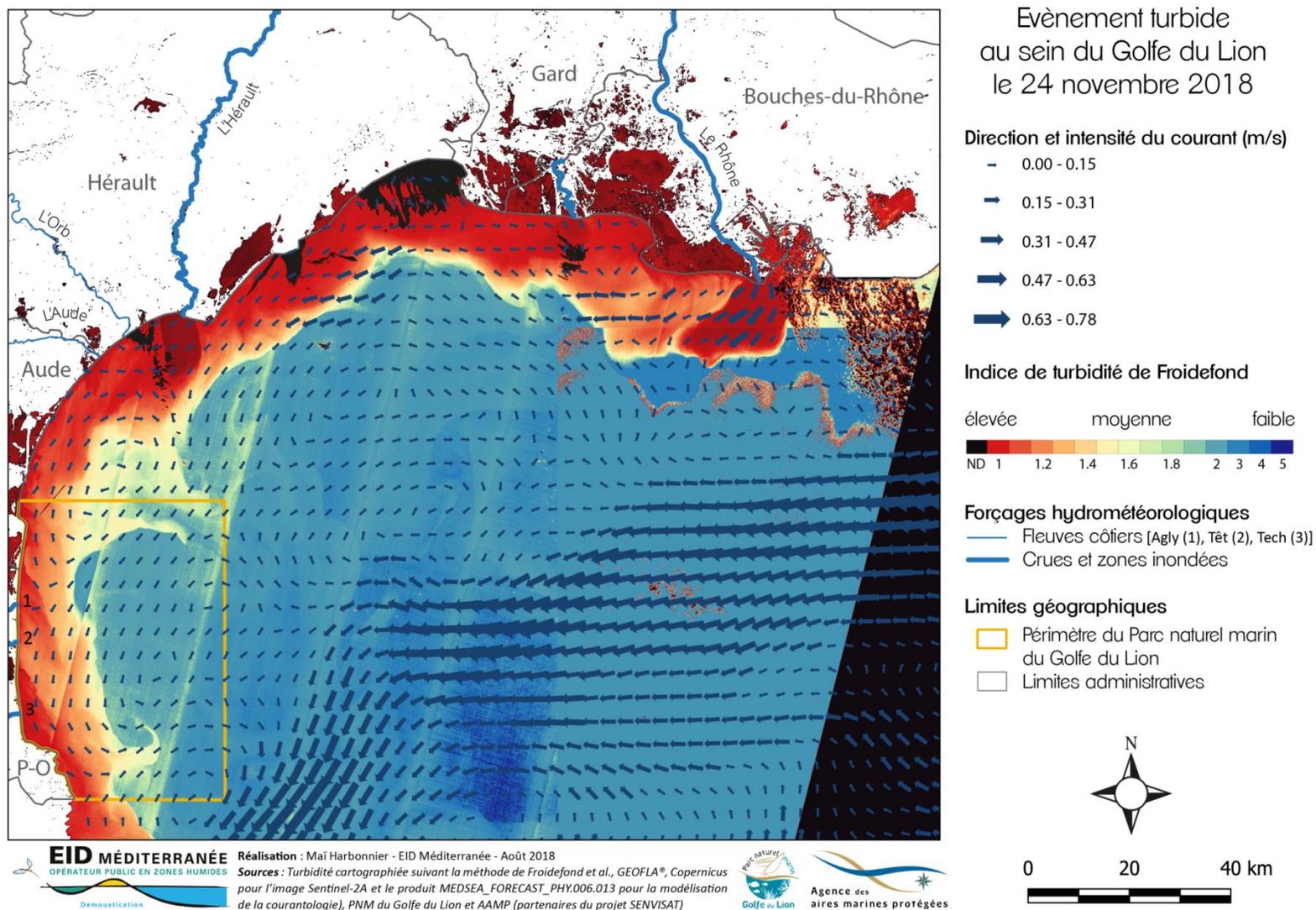


Figure 78 : superposition de la turbidité interprétée des images S-2 et de la courantologie de Copernicus lors des panaches de crue le 24 novembre 2018

II.1.4 – Bilan sur les évènements turbides d'octobre à novembre 2018

La forme et la limite des panaches est essentiellement conditionnée par l'action des courants méso-échelle sur le plateau continental (tailles ordre de ~10 km)

Pour résumé, le 5 octobre 2018 se développent des panaches de micro-algues sous l'effet des vents violents NO (Tramontane avec upwelling ?) et non en raison de panaches turbides provenant des fleuves côtiers comme c'est le cas pour le 25 octobre et le 24 novembre 2018. En revanche, tous les évènements étudiés présentent une activité chlorophyllienne importante. **Ainsi, boom phytoplanctonique ne rime pas toujours avec panache turbide des fleuves**

Certaines formes semblent revenir régulièrement, elles sont dues aux courants d'arrachements et structures tourbillonnaires de courant au large, souvent localisés apparemment dans les mêmes zones d'un évènement à un autre. Ces courants diluent la turbidité vers le large alors qu'ailleurs elle reste piégée sur la côte. Elle limite parfois la superposition des panaches des fleuves successifs depuis le Rhône jusqu'à l'Espagne en longeant la côte dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Conclusion et discussion

Conclusion générale

Dans cette étude, les épisodes de turbidité et leur phénoménologie sont expliqués par une consultation inédite de nouvelles images à haute résolution fournies par les capteurs Sentinel-2. Cette observation est croisée avec des observations plus basiques mais plus fréquentes des plateformes Copernicus/MARC utilisant les capteurs MERIS/MODIS et S3-OLCI. Les observations de panaches ou de blooms phytoplanctoniques sont corrélées avec un suivi très poussé des conditions météo-marines et de l'hydrologie des 6 fleuves côtiers occitans pris en compte, dont les 3 petits fleuves du Parc naturel marin.

Si les valeurs brutes de turbidité sur **les images Sentinel-2** ne sont pas exploitables pour un suivi numéraire de la turbidité, en particulier en raison des bandes liées aux prétraitements effectués qui ne permettent pas d'avoir une homogénéité suffisante entre les images, elles demeurent **un outil puissant pour observer précisément la répartition des lentilles turbides, présentant des formes et contours extrêmement complexes..** La cohérence de répartition des lentilles turbides avec Copernicus ou MARC est constatée, autant pour les situations d'eaux claires, comme c'est le cas pour le 10/10/2017 avec des eaux ouvertes claires et une turbidité concentrée sur la côte, que pour les périodes où le GdL présente une turbidité générale plus élevée comme au 23/01/2018 (**voir toutes les images en annexes A et B à la fin de ce rapport**).

Concernant le ratio RrsBleu/RrsVert (indice de Froidefond, 2002), il est facilement applicable et peut être mis en œuvre sans difficultés par les agents du PNM pour faire apparaître plus clairement le contour des panaches. Malgré de nombreux tests, il n'est pas possible d'isoler la part de la production primaire (chl-a) générant une part de la turbidité sur les images Sentinel-2, ceci en raison des limites du capteur.

L'hiver on peut espérer observer statistiquement une image S-2 exploitable tous les 10 jours environ afin de suivre les effets en mer après une crue. Heureusement, le temps de délai est parfois moindre si le beau temps le permet (images disponibles tous les 5 jours).

Le lien entre l'intensité de la turbidité des panaches et les débits ne semble pas toujours parfaitement évidents. Dans certains cas de débits faibles à modérés, les eaux apportées par les fleuves étaient très troubles, davantage que dans d'autres cas de forts débits. Il semblerait que le type de précipitation, plus ou moins torrentiel, et surtout la répartition des pluies sur le bassin versant ont de l'importance. Il s'avère par exemple que des précipitations sur les plaines agricoles de l'Aude génèrent davantage de ruissellement et de turbidité que des pluies sur les montagnes plus en amont sur le bassin versant.

D'autre part, la chl-a suit un comportement parfois détaché et indépendant des « crises » de panaches turbides et des autres composés de MES venus des fleuves, même si ce cas reste moins fréquent et que souvent les deux paramètres sont associés. Il a été vu par

exemple qu'il existe une saisonnalité plus marquée, et apparemment une rémanence plus forte de la chl-a. Un bloom va parfois se développer en marge (spatiale) d'un panache, perdurer plus longtemps, ou se produire un peu après l'évènement de forte MES minérale. Aussi, des blooms sont possibles sans la présence simultanée de panache en condition particulière d'*upwelling*.

D'après la bibliographie spécialisée, on distingue trois couches dans les lentilles d'eaux turbides : une première couche fine de surface principalement présente aux embouchures des fleuves, un panache intermédiaire où a lieu la sédimentation et une couche néphéloïde combinant les particules en sédimentation et celles remises en suspension. Ody et al. (2016) ont observé sur des images MODIS/Terra, OLI/LandSat8 et SEVIRI que la cartographie de la turbidité était sensible à la composition variée des MES composant ces lentilles turbides, et que la superposition de ces trois couches peut fausser l'estimation de la turbidité. Comme vu avec les erreurs de détection de la chl-a par Copernicus dans certaines situations (d'après les rares mesures disponibles), il est important de rappeler que les données satellites doivent être prises simplement et avec prudence car elles ne sont qu'une observation indirecte et incomplète (vue de la surface) de la réalité de la situation.

Ce rapport présente un travail poussé sur le **déplacement des structures turbides le long des côtes** ainsi que les conditions d'apparition ou d'entrée d'eaux troubles dans le territoire du PNMGL. La courantologie de surface a ensuite été superposée dans un SIG grâce aux données issues de la modélisation hydrodynamique de la Méditerranée de la plateforme Copernicus. Des chaînes de traitement et des tutoriels ont été mis en place afin d'automatiser certaines étapes de traitements à l'aide du modèleur de traitement du module OTB de QGIS 2.18. Aussi, de nombreuses autres images MODIS/Sentinel-3 ont été consultées pour recadrer les épisodes de turbidité dans un cadre temporel mieux décrit par un plus grand nombre d'images.

Les 3 scénarios de turbidité d'octobre-novembre 2018 montrent que **l'influence des vents apparait comme relativement secondaire face à la courantologie de surface** sur le plateau interne du Golfe du Lion dans la dispersion et la trajectoire des panaches. La circulation montre systématiquement des structures complexes de tourbillons proche des côtes. Ces tourbillons provoquent parfois, dans leurs **rouages, des « courants d'arrachement »** localement forts vers le large qui **expulsent les matières en suspension hors de la zone côtière**. Cette zone concentre la majorité du temps l'essentiel de la turbidité du fait d'une dominance : 1) de courants longitudinaux sur la côte ; et 2) d'un plaquage des panaches par des courants venant de l'est (parfois est/sud-est) plus au large. Les épisodes de forte turbidité sont liés aux crues des fleuves, mais **il est fondamental d'étudier tout le Golfe du Lion et de suivre attentivement l'effet des fleuves Aude, Orb et Hérault** (ou des graus du Narbonnais) qui peuvent facilement « contaminer » les eaux du Parc. Les apports du Rhône sont également à surveiller de près car ils semblent clairement responsables d'une

part parfois significative d'apports de MES, nutriment et de futurs développement de blooms dans la zone du PNM.

La déviation vers le Sud et l'Espagne des panaches semble majoritaire, mais elle n'est pas systématique, puisque dans les différents cas étudiés il y a fréquemment un contre-courant le long des côtes qui apparaît, le long du trajet des panaches venant des fleuves successifs (habituellement dans l'ordre du nord-est vers le sud-ouest). Ce contre-courant peut durer plusieurs jours et ainsi expulser et diluer la turbidité avant qu'elle ne rentre dans le périmètre du parc. A ce titre, la côte à l'ouest du cap d'Agde et dans le Narbonnais est généralement plus turbide que celle du Roussillon qui est habituellement plus claire.

Il été prouvé que les conditions de Tramontane répétées pendant de nombreux jours amorcent des courants forts sur le plateau, et des conditions qui semblent favorables aux **blooms phytoplanctoniques en l'absence totale de crues**, très certainement à cause de la remontée de nutriments depuis le fond grâce aux upwellings côtiers.

Perspectives

Les apports fluviaux sont marqués par une température différente de celle de l'EDM. De nombreux auteurs (Guillén et al., 2006; Millot, 1990; Palanques et al., 2008, 2006) s'appuient sur l'imagerie satellite infrarouge pour suivre la répartition spatiale de la température de la couche de surface. Le mélange des eaux chaudes de surface et des eaux froides plus profondes s'accompagnerait de la dilution et/ou de la sédimentation des MES terrigènes. De plus, l'étude des températures d'eau de surface permettrait de localiser les zones d'upwelling : les vents de nord-ouest s'accompagnent d'upwellings côtiers, principalement localisés sur la côte narbonnaise, dont le centre est visible sur les images satellites par une différence de température (Millot, 1990).

D'une manière plus globale, ce document montre le nécessité pour les gestionnaires et les scientifiques d'avoir une vision intégrée des processus hydrodynamiques marins de moyennes et petites échelles (tourbillons de courants de petites tailles < 10 km proche des côtes), des débits des fleuves, du suivi de leurs paramètres physico-chimiques (MES, matières organiques, nutriments,...) etc. Cela afin de mieux comprendre à l'avenir les conditions favorables à un bon état écologique et au développement de la vie au cœur du Parc naturel marin du Golfe du Lion.

Au sujet des courants, il n'a pas été possible de travailler sur la genèse des blooms lors des épisodes d'upwelling et d'étudier notamment la courantologie tridimensionnelle des masses d'eau sur le plateau (afin de poursuivre les travaux de Schaeffer A., 2011, par exemple). Travailler avec le modèle MARS-3D Méditerranée de l'Ifremer serait une perspective intéressante au suivi simultané des images satellites pour mieux comprendre et expliquer les

finesses côtières représentées parfois par des petites boucles de courant que la trace des panaches dessine également en surface.

Aujourd'hui, il semble pertinent de pousser le lien entre les types de précipitations (torrentielles, ruissellement, inondations) et la présence des panaches, ainsi que la possibilité de prévoir le déplacement des panaches avec une technique simple basée sur la consultation des prévisions des courants de surface des jours à venir. Néanmoins, cette étude promeut l'idée que **les panaches ne sont pas une menace, mais une constituante essentielle et nécessaire de l'écosystème du PNM.**

Il faudra enfin corréliser la concentration des panaches en chl-a avec des variables d'ensoleillement et des échantillonnages des composants nutritifs de l'eau (et minéraux). Tous les fleuves n'ont certainement pas le même impact en termes de quantité de matière apportée et d'aspects bénéfiques ou néfastes de leurs panaches. Pour cela des analyses physico-chimiques et le suivi des réseaux de mesure devraient être menés de pair avec de nouvelles observations des images satellites.

Applications pour le PNM

Le résultat majeur de ce travail est sans aucun doute d'avoir montré que le traçage des panaches est une technique simple à réaliser, et qu'il est possible de le faire à haute résolution et près de la côte avec les images Sentinel-2. La consultation d'autres plateformes (Copernicus et MARC), et la consultation d'autres types d'images (que l'on peut voir en même temps que les images Sentinel sur les sites EO-Browser, sentinel-Hub) permet de convenablement « tracker » les panaches à plus haute fréquence. La consultation des débits des fleuves du GDL permet de déclencher un suivi au moment opportun.

L'autre point essentiel est d'avoir démontré que la zone du parc est influencée grandement par les courants dont les limites dépassent largement les frontières du périmètre de gestion du Parc. C'est en majorité les courants qui vont porter la turbidité sur la zone. En outre, cette dernière conditionne l'écosystème et est en grande partie responsable de la qualité des eaux qui est connectée de manière très forte aux apports terrigènes provenant des fleuves côtiers localisés au nord du PNM.

Une approche multi-méthode (télédétection et mesures autres) et surtout la **répétition des observations**, permettrait de comprendre d'autres indicateurs pertinents pour de futurs suivis sur le sud du Golfe du Lion.

Le lien entre la turbidité et la vie

Selon notre dernière hypothèse de travail, tous les fleuves ont un impact majeur sur la composition des panaches et le développement de blooms phytoplanctoniques. Ces blooms de micro-algues sont à la base de la chaîne alimentaire. C'est pourquoi on peut s'interroger sur les impacts de ses apports de nourriture sur les organismes marins tels que les herbiers, les récifs de coralligènes, les poissons et les mammifères marins.

Par exemple, depuis 2018, des opérations de comptages des cétacés sont organisées (cf. Figure 79) au printemps et à l'automne. Elles sont effectuées par le Parc naturel marin afin de déterminer la présence des cétacés et la ou les raisons de celle-ci (nourriture, déplacement, autre). Les agents du parc cherchent à comprendre à quelle période de l'année vient telle ou telle espèce et leur répartition géographique. « Une fois analysées, toutes ces données compilées sur trois années devraient permettre de mieux comprendre les trajectoires et les comportements de ces cétacés migrants afin de leur offrir les meilleures conditions de vie possible, notamment en limitant et en adaptant les activités humaines dans le périmètre du Parc marin du Lion » d'après un agent du Parc interrogé par les médias. Par ailleurs, il existe une plateforme collaborative qui recense les observations en mer à partir de l'application OBSenMER et dont les résultats sont consultables sur le site : <https://www.obsenmer.org/maps>.



Figure 79 : Photographie de Grands Dauphins (*Tursiops truncatus*) observés entre Leucate et Le Barcarès par *Cybelle Planète* le 24 février 2019.

Lorsqu'on relève les différentes observations de mammifères marins dans le Golfe du Lion, on remarque qu'il y a une certaine corrélation entre la présence de cétacés et le taux de chlorophylle-*a*. Les mois où sont observés des cétacés correspondent généralement à ceux où le taux de [chl-*a*] est élevé.

Tableau 7 : Observations de cétacés et présence de chlorophylle-a

Année	Mois	Observations des cétacés ¹			Chlorophylle-a mensuelle observée par satellite dans le Golfe du Lion ²	
		en Méditerranée	dans le Golfe du Lion	au sein du Parc	Moyenne (µg/L)	Maximum (µg/L)
2018	Janvier	8	0	0	-	-
	Février	3	0	0	0.27	2.47
	Mars	14	0	0	0.39	3.99
	Avril	80	4	1	0.97	5.03
	Mai	34	4	0	0.33	6.77
	Juin	72	7	2	0.23	9.97
	Juillet	303	13	7	0.15	5.64
	Août	178	9	5	0.13	6.13
	Septembre	93	11	7	0.13	4.68
	Octobre	13	0	0	0.18	4.41
	Novembre	5	2	1	0.22	3.42
	Décembre	11	7	7	0.25	2.86
2019	Janvier	11	0	0	0.34	2.66
	Février	11	1	1	0.37	2.86
	Mars	19	5	0	0.53	3.17
	Avril	9	1	1	0.50	4.47
	Mai	34	8	2	0.37	5.39
	Juin	118	28	26	0.23	10.28
	Juillet	328	35	28	0.16	6.00

¹Attention = nombre d'observations, pas nombre de cétacés observés.

²calculée selon l'algorithme Ifremer OC5

Sources : d'après les comptages déclarés sur le portail d'OBSenMER.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

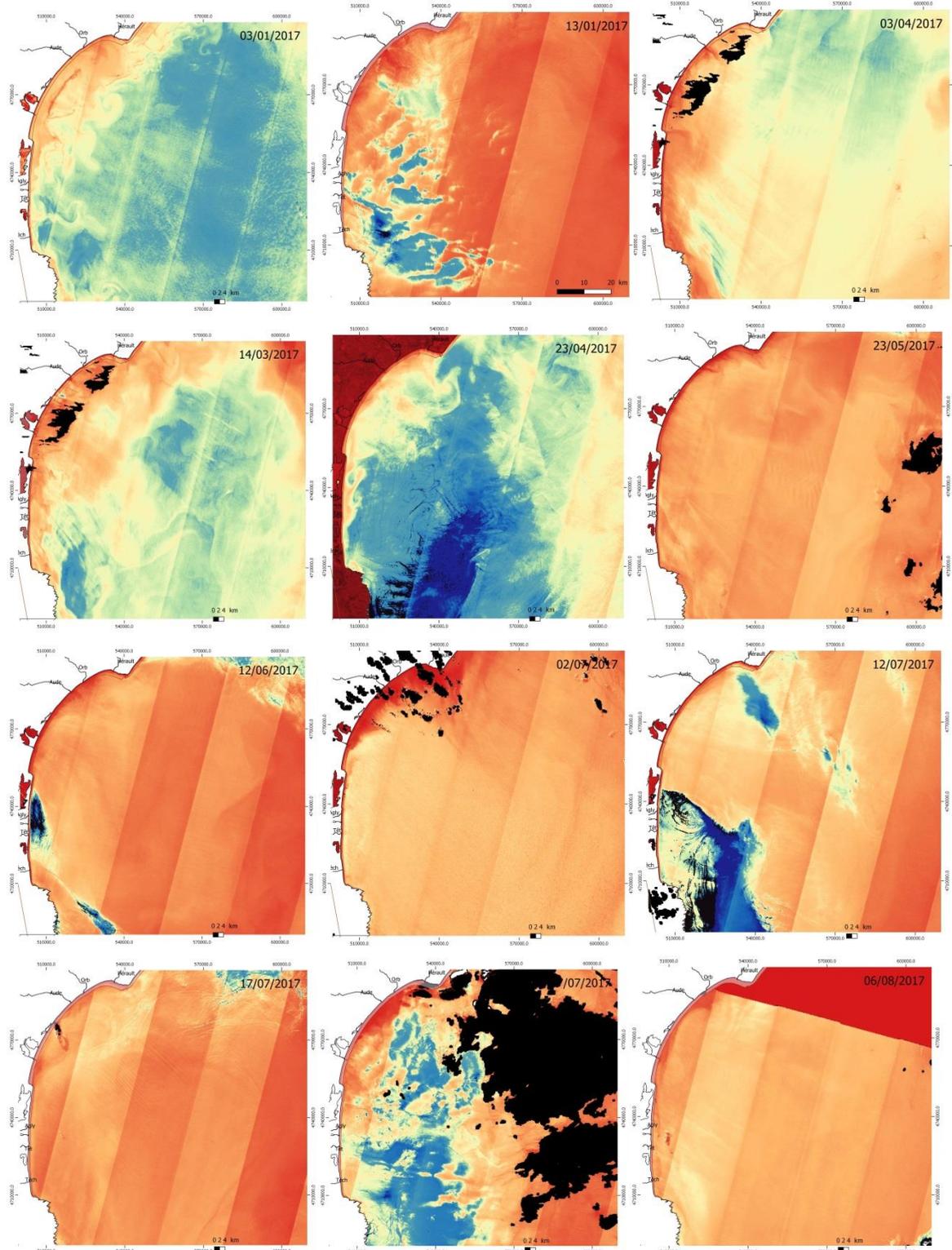
- Aleman, N., Robin, N., Certain, R., Anthony, E.J., Barousseau, J.-P., 2015.** Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment. *Geomorphology* 241, 175-191.
- Bourrin, F., 2007.** Université de Perpignan, Variabilité et devenir des apports sédimentaires par les fleuves côtiers : cas du système Têt-littoral roussillonnais dans le golfe du Lion, thèse, 305 p.
- Doglioli, A.M., 2014.** Université d'Aix-Marseille, Notes sur la Circulation Générale en Méditerranée pour le cours d'Océanographie Générale, 64 p.
- D'Ortenzio, F., Ribera d'Alcalà, M., 2009.** On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: a satellite analysis. *Biogeosciences* 6, 139–148. <https://doi.org/10.5194/bg-6-139-2009>
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Castaing, P., 2002.** A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *Int. J. Remote Sens.* 23, 5079–5085. <https://doi.org/10.1080/0143116021000009912>
- Doxaran, D., Cherukuru, R.C.N., Lavender, S.J., 2005.** Use of reflectance band ratios to estimate suspended and dissolved matter concentrations in estuarine waters. *Int. J. Remote Sens.* 26, 1763–1769. <https://doi.org/10.1080/01431160512331314092>
- Durand, P., 1999.** Université Lumière Lyon 2, L'évolution des plages de l'Ouest du Golfe du Lion au vingtième siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle, thèse de doctorat, 461 p.
- Froidefond, J.-M., Lavender, S., Laborde, P., Herbland, A., Lafon, V., 2002.** SeaWiFS data interpretation in a coastal area in the Bay of Biscay. *Int. J. Remote Sens.* 23, 881–904. <https://doi.org/10.1080/01431160110040332>
- Gangloff, A., 2017.** Université de Bretagne Occidentale, Devenir des apports solides du Rhône dans le Golfe du Lion : étude de la dynamique du panache turbide du Rhône en réponse aux forçages hydrométéorologiques, 207 p.
- Ganzin, N., Mangin, A., Fiandrino, A., Demaria, J., Coudray, S., Garreau, P., Tomasino, C., 2010.** Optimisation de la surveillance des masses d'eau DCE en Méditerranée - Compléments d'utilisation d'imagerie satellite et application d'outils hydrodynamiques (No. 2008– 0720). IFREMER.
- Garcia, N., 2014a.** SOMLIT Service d'Observation en Milieu Littoral - Chlorophylle [WWW Document]. SOMLIT. URL <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/spip.php?article378> (accessed 7.6.18).

- Garcia, N., 2014b.** SOMLIT Service d'Observation en Milieu Littoral - Matière en suspension ou Seston [WWW Document]. SOMLIT. URL <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/spip.php?article377> (accessed 7.9.18).
- Garvine, R., 1987.** Estuarine plumes and fronts in shelf waters : A layer model. *Journal of Physical Oceanography* 17, 1877–1896.
- Gervais, M., 2012.** Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Perpignan.
- Gervais, M., Balouin, Y., Belon, R., 2012.** Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions Coastline, France. *Geomorphology* 143–144, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.035>
- Gervais, M., Trmal, C., à paraître.** Chapitre 3 : Facteurs hydrodynamiques, in: *Dynamiques et évolution du littoral : Synthèse des connaissances des côtes françaises de la frontière espagnole à Port de Bouc*. CEREMA.
- Gohin, F., Loyer, S., Lunven, M., Labry, C., Froidefond, J.-M., Delmas, D., Huret, M., Herbland, A., 2005.** Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sens. Environ.* 95, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
- Guillén, J., Bourrin, F., Palanques, A., Durrieu de Madron, X., Puig, P., Buscail, R., 2006.** Sediment dynamics during wet and dry storm events on the Têt inner shelf (SW Gulf of Lions). *Mar. Geol.* 234, 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.09.018>
- Hagolle, O., 2018.** THEIA's L2A product format | Séries Temporelles. CesBio.
- Harbonnier, M., 2019.** Définition d'indicateurs de suivi des dynamiques côtières via l'imagerie satellite --- Etude des panaches de turbidité et de la chlorophylle-a dans le Parc naturel marin du Golfe du Lion. Rapport de stage de Master 2, université de Nantes – EID Méditerranée, IGARUN, 94 p.
- Holm-Hansen, O., Lorenzen, C.J., Holmes, R.W., Strickland, J.D.H., 1965.** Fluorometric Determination of Chlorophyll. *ICES J. Mar. Sci.* 30, 3–15. <https://doi.org/10.1093/icesjms/30.1.3>
- Johns, B., Marsaleix, P., Estournel, C., Véhil, R., 1992.** On the wind-driven coastal upwelling in the Gulf of Lions. *J. Mar. Syst.* 3, 309–320. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(92\)90008-V](https://doi.org/10.1016/0924-7963(92)90008-V)
- Kutser, T., 2009.** Passive optical remote sensing of cyanobacteria and other intense phytoplankton blooms in coastal and inland waters. *Int. J. Remote Sens.* 30, 4401–4425. <https://doi.org/10.1080/01431160802562305>
- Lacaux, J.P., Tourre, Y.M., Vignolles, C., Ndione, J.A., Lafaye, M., 2007.** Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever

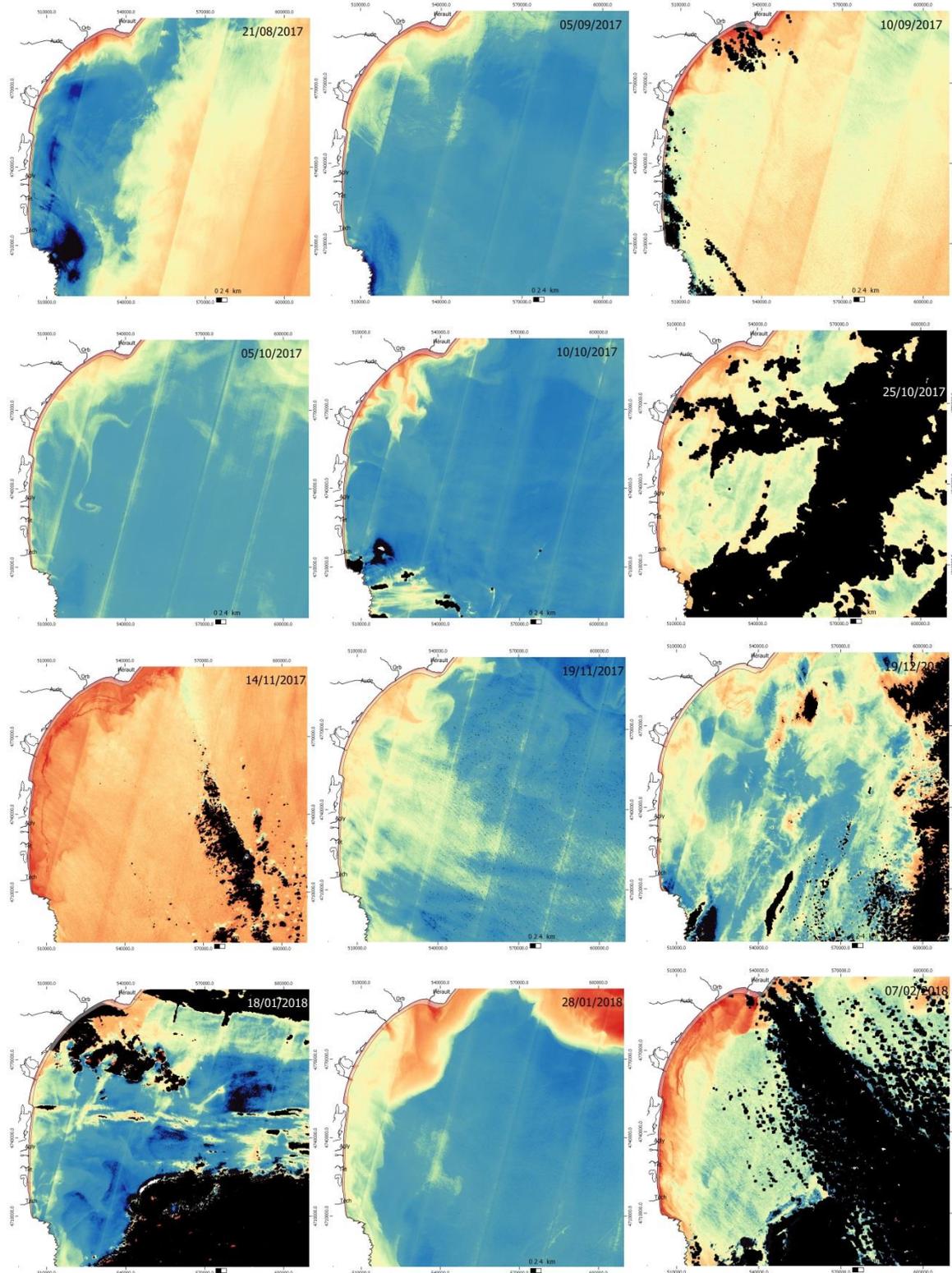
- epidemics in Senegal. *Remote Sens. Environ.* 106, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>
- Lee, Z., Carder, K.L., Arnone, R.A., 2002.** Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Appl. Opt.* 41, 5755–5772. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>
- Miller, R.L., McKee, B.A., 2004.** Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 93, 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.012>
- Millot, C., 1990.** The Gulf of Lions' hydrodynamics. *Cont. Shelf Res.* 10, 885–894. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(90\)90065-T](https://doi.org/10.1016/0278-4343(90)90065-T)
- Nechad, B., Dogliotti, A., Ruddick, K., Doxaran, D., 2016.** Particulate backscattering and Suspended Matter Concentration retrieval from remote-sensed turbidity in various coastal and riverine turbid waters. 7.
- Ody, A., Doxaran, D., Vanhellefont, Q., Nechad, B., Novoa, S., Many, G., Bourrin, F., Verney, R., Pairaud, I., Gentili, B., 2016.** Potential of High Spatial and Temporal Ocean Color Satellite Data to Study the Dynamics of Suspended Particles in a Micro-Tidal River Plume. *Remote Sens.* 8, 245. <https://doi.org/10.3390/rs8030245>
- Palanques, A., Guillén, J., Puig, P., Durrieu de Madron, X., 2008.** Storm-driven shelf-to-canyon suspended sediment transport at the southwestern Gulf of Lions. *Cont. Shelf Res.* 28, 1947–1956. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.020>
- Paris, M., 2018.** Définition d'indicateurs de suivi des dynamiques côtières via l'imagerie satellite, étude des panaches de turbidité et de la chlorophylle a dans le Parc naturel marin du Golfe du Lion, mémoire de master 2 – EID Méditerranée, 46 p.
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Sagarminaga, Y., 2010.** Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Cont. Shelf Res.* 30, 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>
- Potes, M., Costa, M.J., Salgado, R., 2012.** Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1623–1633. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1623-2012>
- Radakovitch, O., Roussiez, V., Ollivier, P., Ludwig, W., Grenz, C., Probst, J.-L., 2008.** Input of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lion continental shelf. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 77, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.09.028>
- Schaeffer, A., 2010.** Université du Sud Toulon Var, Impact du vent sur la circulation hydrodynamique dans le Golfe du Lion : modélisation haute résolution, Thèse d'océanographie physique, 246 p.

- Siokou-Frangou, I., Christaki, U., Mazzocchi, M.G., Montresor, M., Ribera d'Alcalá, M., Vaqué, D., Zingone, A., 2010.** Plankton in the open Mediterranean Sea: a review. *Biogeosciences* 7, 1543–1586. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1543-2010>
- Ulses, C., 2005.** Dynamique océanique et transport de la matière particulaire dans le Golfe du Lion : Crue, tempête et période hivernale (phdthesis). Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Ulses, C., Estournel, C., Durrieu de Madron, X., Palanques, A., 2008.** Suspended sediment transport in the Gulf of Lions (NW Mediterranean): Impact of extreme storms and floods. *Cont. Shelf Res.* 28, 2048–2070. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.01.015>
- Volpe, G., Colella, S., Forneris, V., Tronconi, C., Santoleri, R., 2012.** The Mediterranean Ocean Colour Observing System – system development and product validation. *Ocean Sci.* 8, 869–883. <https://doi.org/10.5194/os-8-869-2012>
- Yentsch, C.S., Menzel, D.W., 1963.** A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence 11.
- Zhang, T., Fell, F., 2007.** An empirical algorithm for determining the diffuse attenuation coefficient K_d in clear and turbid waters from spectral remote sensing reflectance. *Limnol. Oceanogr. Methods* 5, 457–462. <https://doi.org/10.4319/lom.2007.5.457>

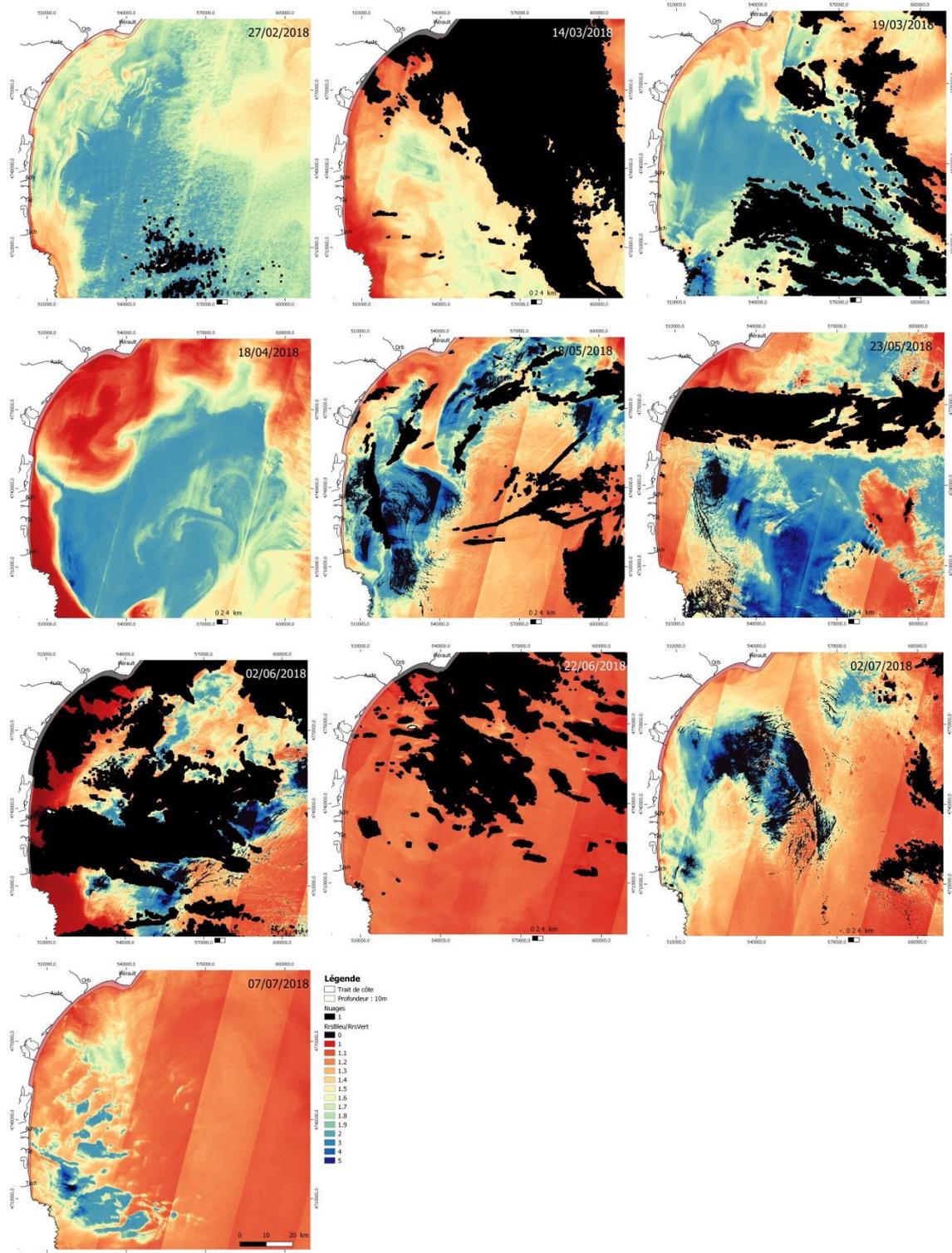
Annexe A – l'ensemble des événements turbides étudiés



SENVISAT – Phase 3 & 5 : Suivi des panaches turbides post-événement de crue ; Suivi de l'évolution de la chlorophylle a et de la production primaire



SENVISAT – Phase 3 & 5 : Suivi des panaches turbides post-événement de crue ; Suivi de l'évolution de la chlorophylle a et de la production primaire





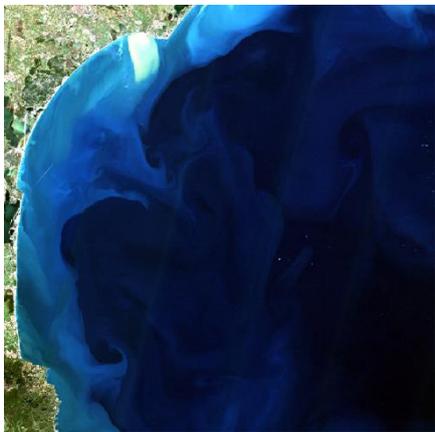
03/01/2019



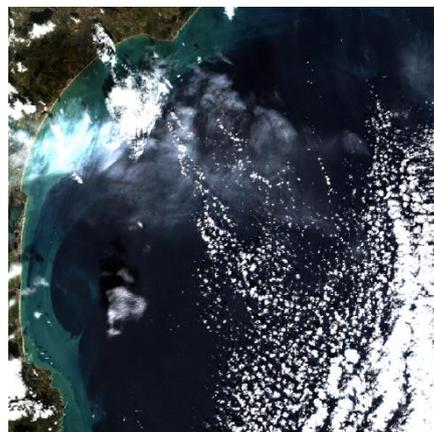
12/02/2019



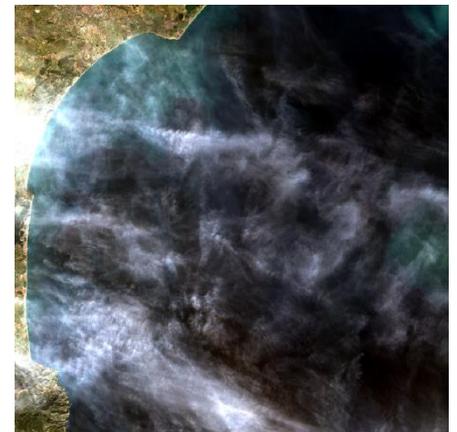
22/02/2019



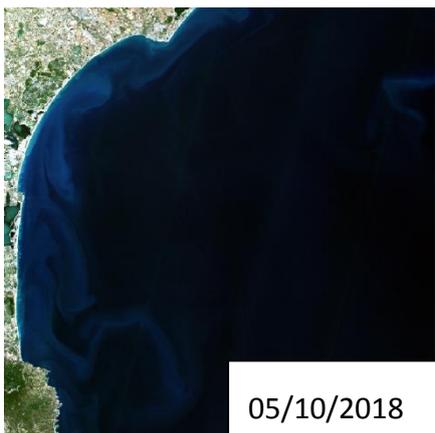
24/11/2018



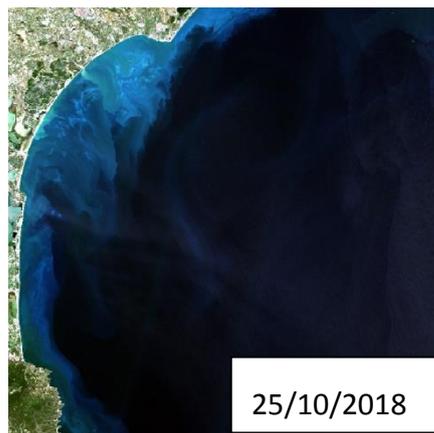
14/12/2018



24/12/2018



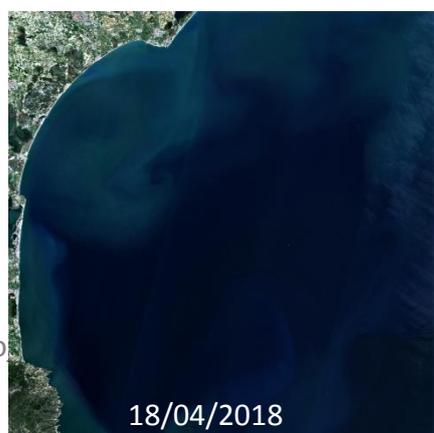
05/10/2018



25/10/2018



28/01/2018



18/04/2018

Annexe B : Images S2 disponibles et sélectionnées

NB. D'autres annexes techniques sur le téléchargement et le traitement des images sont fournis dans des documents séparés joints à ce rapport

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27

2017

SENVISAT – Phase 3 & 5 : Suivi des panaches turbides post-événement de crue ; Suivi de l'évolution de la chlorophylle a et de la production primaire

28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	
29		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	
30		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
31		31		31		31	31		31		31	
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	2018
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	

SENVISAT – Phase 3 & 5 : Suivi des panaches turbides post-événement de crue ; Suivi de l'évolution de la chlorophylle a et de la production primaire

29		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
31		31		31		31	31		31		31
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
29		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29

2019

SENVISAT – Phase 3 & 5 : Suivi des panaches turbides post-évènement de crue ; Suivi de l'évolution de la chlorophylle a et de la production primaire

30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
31	31		31		31	31		31		31	

Les dates surlignées correspondent à une image disponible et téléchargée, les dates surlignées et encadrées correspondent aux évènements turbides pris en compte dans cette étude.



Rapport de Phase 3 & 5

SENVISAT



EID Méditerranée

165, avenue Paul-Rimbaud
34184 Montpellier Cedex 4
Tél. 04 67 63 67 63



LMUSCA

CEFREM – UPVD
52 avenue Paul Alduy
66860 Perpignan Cedex 9
Tél : 04 68 66 20 57



Parc Naturel Marin du Golfe du Lion

2 impasse Charlemagne
66700 Argelès-sur-Mer
Tél : 04 68 68 40 20



OBSCAT

Agence d'urbanisme catalane (AURCA)
19 Espace Méditerranée
66000 Perpignan
Tél : 04.68.87.75.52