



Estimation de la turbidité à partir du traitement des images satellitaires : illustration de l'évaluation de l'état initial au large de Dunkerque

Fabrice PLUQUET¹, Philippe BRYÈRE², Nicolas CHINI¹, Pauline BRANDT³

1. ACRI-IN, Quai de la Douane, immeuble Le Grand Large, 29200 Brest, France.
fabrice.pluquet@acri-in.fr, nicolas.chini@acri-in.fr
2. ARGANS-FR, Quai de la Douane, immeuble Le Grand Large, 29200 Brest, France.
pbryere@argans.eu
3. RTE, Centre Développement Ingénierie Lille - Service Concertation, 62 rue Louis Delos, 59700 Marcq-en-Barœul, France.
pauline.brandt@rte-france.com

Résumé :

Les travaux maritimes sont susceptibles d'induire une altération des conditions environnementales pouvant entre autres entraîner une mise en suspension des sédiments marins présents sur le fond. Suivant la nature des travaux, et les techniques et moyens maritimes mis en œuvre, la concentration des matières remises en suspension peut être plus ou moins importante. D'un point de vue environnemental, il apparaît donc nécessaire de caractériser l'incidence des aménagements envisagés sur la turbidité, facteur susceptible d'impacter la qualité des eaux, la faune et la flore marine. Diverses méthodologies existent pour évaluer et quantifier l'impact des aménagements sur les conditions de turbidité. Ces techniques se fondent généralement sur de la modélisation numérique. Depuis 2016, la disponibilité de données satellitaires gratuites à haute résolution spatiale avec une répétitivité de quelques jours (Sentinel-2/Copernicus) offre la possibilité de caractériser les conditions de turbidité sur l'environnement côtier. La présente étude fournit une illustration de l'utilisation de ces données pour évaluer l'état initial de la turbidité au large de Dunkerque, secteur caractérisé à la fois par de forts enjeux naturels liés à la présence de nombreux bancs de sables, et par l'implantation d'activités industrielles dépendantes du milieu maritime. Les images satellites qui ont été utilisées sont issues des capteurs multispectraux MSI (Multi Spectral Instrument) présents à bord des satellites Sentinel-2 A et B de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), et présentent une résolution spatiale de 10 mètres. L'estimation de la concentration en matières en suspension non algale en grammes par m³ dans la masse d'eau, reflétant la turbidité dans le milieu marin, a été réalisée à partir de l'application d'algorithmes développés par Argans-FR, en collaboration avec le centre Ifremer de Brest. Les images satellitaires ont été calibrées à partir des données REPHY disponibles sur la zone. Les estimations ainsi obtenues sont traitées en vue de fournir une caractérisation des conditions de turbidité pour la période 2016 – 2020 et selon les saisons. Ces données sont

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

par la suite comparées aux données de forçages météo-océaniques afin d’appréhender les causes de la variabilité de la turbidité sur le secteur d’étude. La réalisation d’un tel état des lieux peut alors servir de point de comparaison pour d’estimer l’éventuel impact des travaux maritimes sur l’environnement marin et les activités attenantes, mais aussi pour déterminer la période la plus appropriée à la réalisation de ces travaux.

La méthodologie ici mise en œuvre est applicable à tous types de travaux en mer et dans les principaux champs d’activités concernés par ces travaux : éolien en mer, pose de câbles sous-marins, activités de dragage ou de clapage de sédiments.

Mots-clés :

Imagerie satellitaire, Turbidité, Houle, Tempête, Etat initial, Travaux en mer, Dunkerque.

1. Introduction

Le secteur maritime au large de Dunkerque est un site environnemental sensible, lié à la présence de bancs de sable à faible recouvrement permanent d’eau marine. Ces structures sableuses regroupées sous l’appellation de « Bancs des Flandres » sont classées Natura 2000. Elles sont constituées par l’accumulation de sables coquilliers et parcourues par des dunes hydrauliques. Les sommets des bancs sont recouverts de moins de 5 m d’eau et peuvent même être localement exondés en période de basses mers de vives-eaux exceptionnelles. Ces édifices sableux sont globalement orientés parallèlement à la côte, suivant une direction SW-NE, correspondant à l’axe des courants de marée. Les Bancs des Flandres font l’objet d’un suivi environnemental particulier au regard de l’importance fonctionnelle des habitats et des espèces qui les fréquentent (Phoque veau-marin, Phoque gris, Marsouin commun, diverses espèces d’oiseaux migrateurs...).

Le littoral de la zone concernée est marqué par la présence du complexe industrialoportuaire de Dunkerque qui abrite bon nombre d’activités industrielles dépendantes du milieu maritime. Le Centre Nucléaire de Production d’Electricité de Gravelines, raffineries et terminal méthanier y sont en outre implantés. Ce complexe ayant vocation à se développer, les travaux maritimes en liens avec ces activités, tels que les aménagements de structures portuaires, la pose de câbles ou de conduites sous-marines, les dragages d’entretien des chenaux ou les opérations de clapage contribuent à la vulnérabilité du site. Par ailleurs, la pêche professionnelle, la conchyliculture, les activités de loisir liées au nautisme, à la plongée ou à la pêche récréative sont très présentes sur le territoire. Les plages du littoral comme celle de Malo-les-Bains sont hautement fréquentées en période estivale. Le maintien de la bonne qualité des eaux représente donc ici un enjeu majeur pour la préservation du littoral.

Dans ce contexte, ACRI-IN et Argans-FR ont réalisés une étude visant à estimer l’état initial des matières en suspension dans la masse d’eau au large de Dunkerque à partir de données satellitaires. Cette étude s’inscrit dans le cadre du projet de raccordement électrique du futur parc éolien au large de Dunkerque porté par le gestionnaire du réseau

de transport d'électricité RTE. Il est prévu que la future liaison électrique relie le port de Dunkerque au site d'implantation des éoliennes, en traversant la partie sud des Bancs des Flandres. La méthodologie développée dans cette étude permet d'établir un état des lieux de la turbidité pouvant servir de point de comparaison afin d'estimer l'éventuel impact de la remise en suspension de sédiments lors des travaux maritimes de pose des futurs câbles de raccordement sur l'environnement marin et les activités associées.

2. Méthodologie

La méthodologie mise en œuvre pour estimer l'état initial de la concentration de matières en suspension dans la masse d'eau est basée sur l'utilisation de données satellitaires à haute résolution spatiale dont la répétitivité pour un site donné est de l'ordre de quelques jours, avec une disponibilité sur une période de plusieurs années. Pour chacune des images recueillies, la turbidité est estimée à l'aide d'algorithmes spécifiquement développés pour en extraire les estimations de matière en suspension à partir de la couleur de l'eau. En milieu littoral, le résultat de ces algorithmes doit être calibré et validé avec les données d'observation *in-situ* disponibles. Les résultats obtenus sont ensuite analysés au regard des conditions d'état de mer lors des différents passages des satellites.

2.1 Données satellitaires

Dans le cadre de cette étude, les images satellites collectées sont issues des capteurs multispectraux MSI (Multi Spectral Instrument) présents à bord des satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Lancés respectivement en juin 2015 et mars 2017, les satellites Sentinel-2 du programme « Copernicus » permettent de surveiller la végétation, le sol et les cours d'eau en zones terrestres, mais également d'observer les masses d'eau en zones côtières. Le capteur multispectral échantillonne 13 bandes spectrales : quatre bandes à 10 m, six bandes à 20 m et trois bandes à 60 m de résolution spatiale. Deux produits mis à disposition par l'ESA sont disponibles pour les utilisateurs : le niveau 1C (L1C) et le niveau 2A (L2A). Le produit L1C fournit, par pixel, des mesures radiométriques de la réflectance de la couche supérieure de l'atmosphère. Le produit L2A fournit des images de réflectance au bas de l'atmosphère, dérivées des produits L1C associés. Le produit L2A est généré avec une correction atmosphérique prédéfinie (Sen2Cor) spécifique aux données en zone terrestre, et donc peu adaptée à l'environnement marin. Pour améliorer les images, la méthodologie que nous proposons consiste à utiliser les données de niveau L1C auxquelles nous appliquons une correction atmosphérique mieux adaptée aux eaux côtières. La correction atmosphérique utilisée est « Polymer » développé par la PME française HYGEO. Polymer est un algorithme visant à récupérer la radiance diffusée et absorbée par les eaux océaniques (également appelée couleur de l'océan) à partir du signal mesuré par les capteurs satellites dans le spectre visible. L'un des points forts de cet algorithme est la possibilité de récupérer la couleur de l'océan en présence de reflets solaires. Les données brutes de haute résolution L1C sans

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

correction atmosphérique des satellites Sentinel-2 sont téléchargées depuis un serveur de données (CTEP : Coastal Thematic Exploitation Platform, <https://www.coastal-tep.eu/>). La correction atmosphérique Polymer est ensuite appliquée aux bandes pour fournir des données de niveau L2A en projection satellite (figure 1). L'extraction sur la région d'intérêt est ensuite effectuée, et les bandes sont projetées sur une grille de 10 x 10 mètres en degrés décimaux. Un masquage est enfin appliqué pour exclure les nuages et les pixels suspects.

En Mer du Nord, la répétitivité (délai entre 2 images correspondant aux différents passages de satellites) se situe entre 2 et 3 jours. Cependant, les images fournies par les satellites sont susceptibles d'être impactées par la présence de nuages. En conséquence, les images comportant une couverture nuageuse trop importante ne peuvent être utilisées et ont été écartées. Ainsi, une série de 142 images satellites jugées exploitables a pu être constituée au large de Dunkerque sur une période de mai 2016 à novembre 2020.

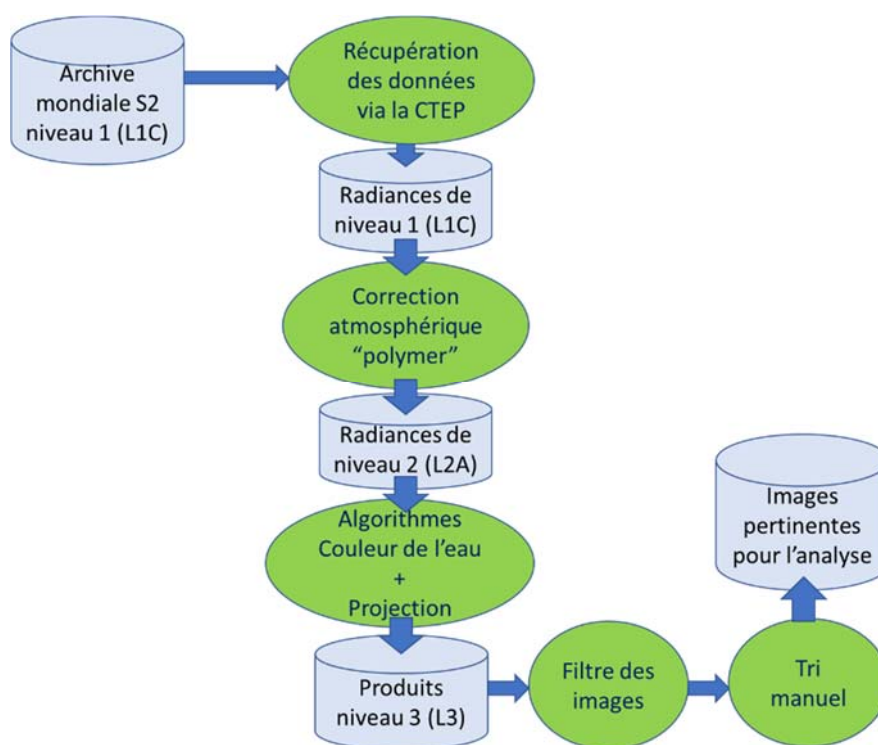


Figure 1. Diagramme de la chaîne de traitement des données haute résolution S2 pour obtenir des images exploitables en vue de l'analyse de la turbidité dans la masse d'eau.

2.2 Estimation de la turbidité

La matière en suspension non algale est composée principalement de particules minérales provenant d'apports continentaux (e.g. apports fluviaux, érosion des côtes). Ce paramètre exclu la présence de particules d'origine biologique (algues, plancton...). La matière en suspension non algale dans la masse d'eau est donc le paramètre le plus approprié en vue

d'évaluer l'impact sur le milieu physique et naturel de la remise en suspension de particules lors des travaux de pose ou de maintenance des futurs câbles de raccordement. L'estimation de la concentration en matières en suspension (MES) non algale en grammes par m³ dans la masse d'eau a été réalisée à partir de l'application d'algorithmes développés par ARGANS-FR, en collaboration avec le centre IFREMER de Brest (GOHIN *et al.*, 2002 et GOHIN, 2011). Un algorithme développé au Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences UMR 8187 LOG (HAN *et al.*, 2016) est également utilisé pour les fortes concentrations en MES. Les différents algorithmes sont appliqués sur les données L2A après correction atmosphérique pour obtenir des images de niveau L3 pertinentes en vue de l'analyse de la turbidité (figure 1). Les valeurs de turbidité obtenues doivent alors être validées avec des mesures *in-situ*. Sur le site de Dunkerque, elles ont été calibrées à partir des données REPHY (Réseau d'Observation et de Surveillance du Phytoplancton et des Phycotoxines) et SOMLIT (Service d'Observation du Milieu Littoral) disponibles.

Par temps calme, les algorithmes utilisés ont parfois tendance à surévaluer la concentration en matières en suspension non algale dans la frange la plus côtière en raison de la transparence des eaux (par intégration du signal du fond). Par ailleurs, le déferlement des vagues est aussi susceptible d'amplifier l'estimation de la concentration en matières en suspension en haut de plage (par intégration du signal des petites vagues crêtées d'écume). Pour ces raisons, il est nécessaire de réaliser un contrôle visuel du résultat obtenu à l'issue du traitement informatique, pour ne conserver que les résultats pertinents en vue de l'analyse des valeurs de turbidité.

2.3 Conditions d'état de mer

Les hauteurs de Basse Mer, de Pleine Mer et la valeur du marnage observées au marégraphe de Dunkerque ont été collectées aux dates de chacune des 142 images satellites exploitables. Les valeurs de Basse Mer et de Pleine Mer sont exprimées en mètre et référencées par rapport au Zéro Hydrographique du marégraphe du port de Dunkerque (source SHOM). Par ailleurs, la hauteur significative des vagues à l'instant du cliché fournit une indication sur les conditions d'état de mer lors du passage du satellite. Ces données sont extraites de la base de données du Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS UMR CNRS/Ifremer/UBO/IRD), constituée de rejeu de conditions de vagues issues de modélisation Wave Watch 3 à une résolution spatiale de 200m dans le secteur étudié.

3. Résultats

3.1 Observation de la turbidité

Deux images sont obtenues à chaque passage d'un satellite (figure 2). La première correspond à l'image satellite en vrai/fausse couleurs (RGB) sans post-traitement autre

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

que la correction atmosphérique. Devant le port de Dunkerque, elle permet d'identifier les zones de fortes turbidités (de couleur jaune-beige) et les zones moins chargées en particules correspondant à des eaux plus claires. La seconde image est issue de la chaîne de traitement permettant de cartographier la concentration en matières en suspension non algale en grammes par m³ (SPM) dans la masse d'eau. Dans l'étude réalisée, les informations issues des données satellites permettent de mettre en évidence une turbidité plus marquée dans les petits fonds littoraux et à proximité des sommets des bancs de sable. Les structures turbides observées s'étendent perpendiculairement au rivage suivant une direction globalement SW-NE, indicatrices de la direction des courants au large de Dunkerque.

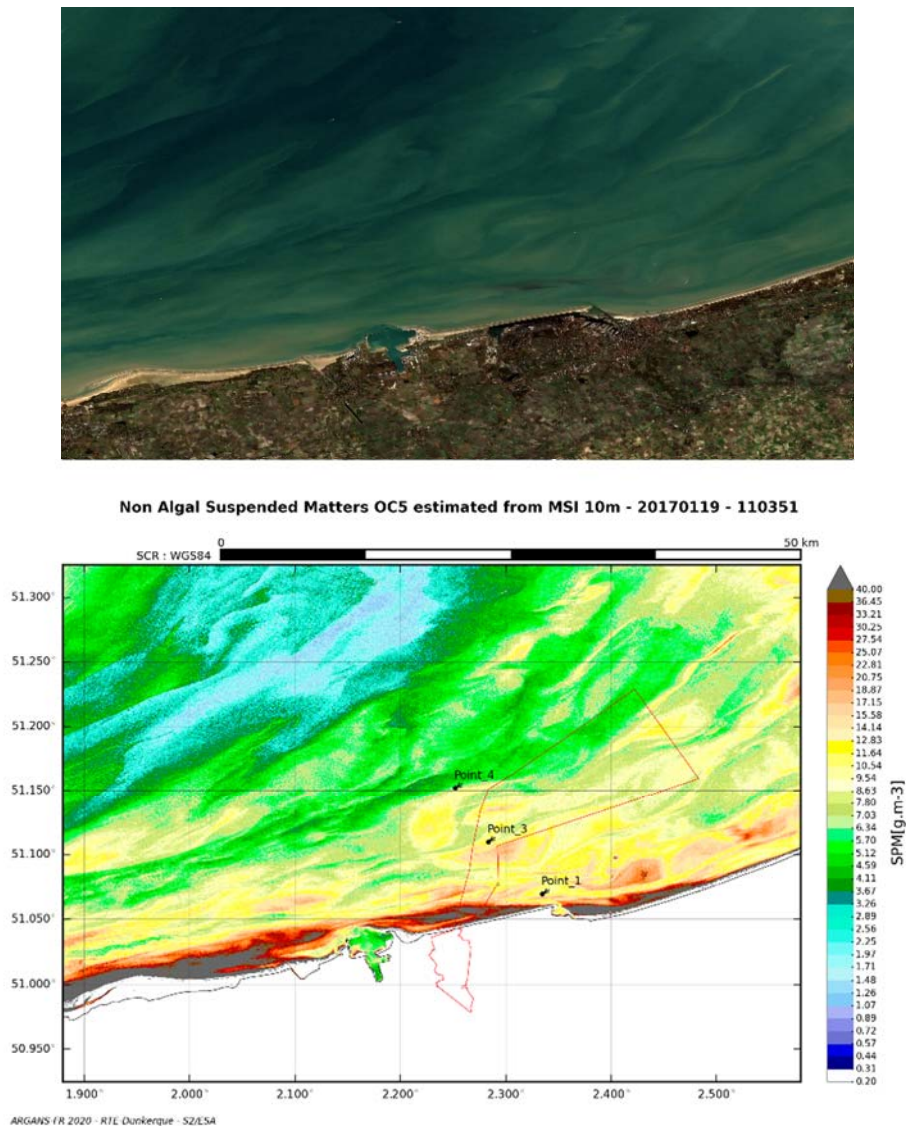


Figure 2. Image satellite RGB sans post-traitement et estimation de la concentration en matières en suspension non algale en grammes par m³ le 19 janvier 2017 devant le port de Dunkerque. Les points 1, 2 et 4 sont les stations de prélèvement du REPHY.

3.2 Variabilité et statistiques saisonnières

Pour chaque image satellite exploitable, les teneurs minimale, maximale et moyenne estimées de particules en suspension non algales en grammes par m³ dans la masse d'eau ont été collectées à l'intérieur de l'aire d'étude. Il apparaît que la turbidité moyenne sur la période mai 2016 – novembre 2020 est de l'ordre de 11,6 g/m³ sur l'ensemble de la zone d'étude (tableau 1). Il existe cependant des disparités, qui se traduisent par une variabilité spatiale et temporelle des matières particulaires en suspension. Ainsi, la teneur moyenne de particules en suspension non algales est nettement plus élevée en hiver (~17 g/m³) qu'au cours des autres saisons. L'été apparaît être la saison durant laquelle la teneur moyenne de particules en suspension non algales est la plus faible (~10 g/m³).

Tableau 1. Valeurs annuelles et saisonnières moyennes de SPM en g/m³ au large de Dunkerque sur la période mai 2016 – novembre 2020.

Année	SPM moy (g/m ³)	Saison	SPM moy (g/m ³)
2016	11,31	Été	9,68
2017	11,18	Automne	11,62
2018	10,19	Hiver	16,94
2019	12,92	Printemps	10,79
2020	12,54		
2016-2020	11,63		

3.3 Corrélation avec les états de mer

La corrélation des teneurs estimées de particules en suspension non algales en grammes par m³ dans la masse d'eau avec les données d'état de mer collectées montre que les valeurs maximales de turbidité observées en hiver sont le reflet de la survenue des grandes tempêtes hivernales, qui se produisent de décembre à début mars sur les côtes de la Manche et de la Mer du Nord. L'action de la houle joue alors un rôle prépondérant dans la remise en suspension des sédiments meubles à proximité du littoral. Un traitement statistique intégrant la totalité des 142 journées étudiées entre mai 2016 et novembre 2020 a été réalisé (figure 3). Il met en évidence un gradient de turbidité depuis la côte vers le large. Sur le très proche littoral, les valeurs moyennes de turbidité sont comprises entre 20 et 30 g/m³. Ces valeurs élevées reflètent l'influence des courants de marée et l'action de la houle dans les très petits fonds en bordure de l'estran. Les valeurs moyennes de turbidité décroissent ensuite progressivement vers le large, pour atteindre environ 4 à 8 g/m³ à une dizaine de kilomètres du trait de côte. L'écart-type correspondant (Figure 4) met en évidence une très faible variabilité dans le temps de la turbidité au sein de la portion la plus au large (± 3 à 6 g/m³). En revanche, la variabilité est beaucoup plus importante à la côte (± 15 à 40 g/m³), confirmant l'action prépondérante de la houle à la côte sous l'influence des tempêtes. Par ailleurs, la survenue des tempêtes est habituellement corrélée à une couverture nuageuse importante réduisant ainsi le nombre

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

d'images satellitaires exploitables certains hivers. Ceci peut donc parfois contribuer à sous-estimer les valeurs de turbidité. Néanmoins, la répétitivité des passages de satellites et le lissage sur une durée d'observation sur plusieurs années tend à minimiser ce phénomène.

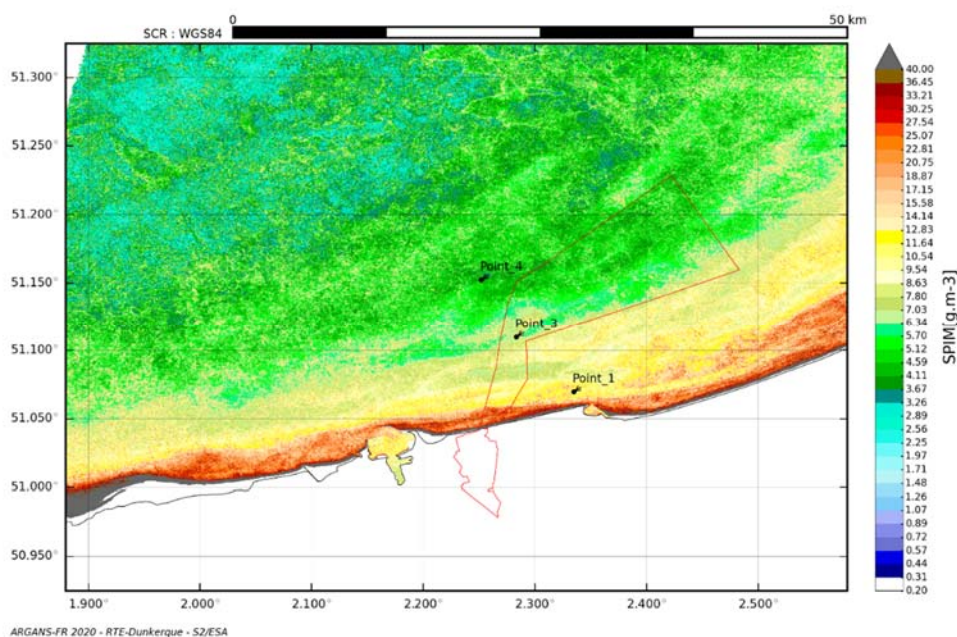


Figure 3. Estimation de la concentration moyenne en matières en suspension non algale en grammes par m³ dans la masse d'eau sur la période 2016 – 2020 devant le port de Dunkerque.

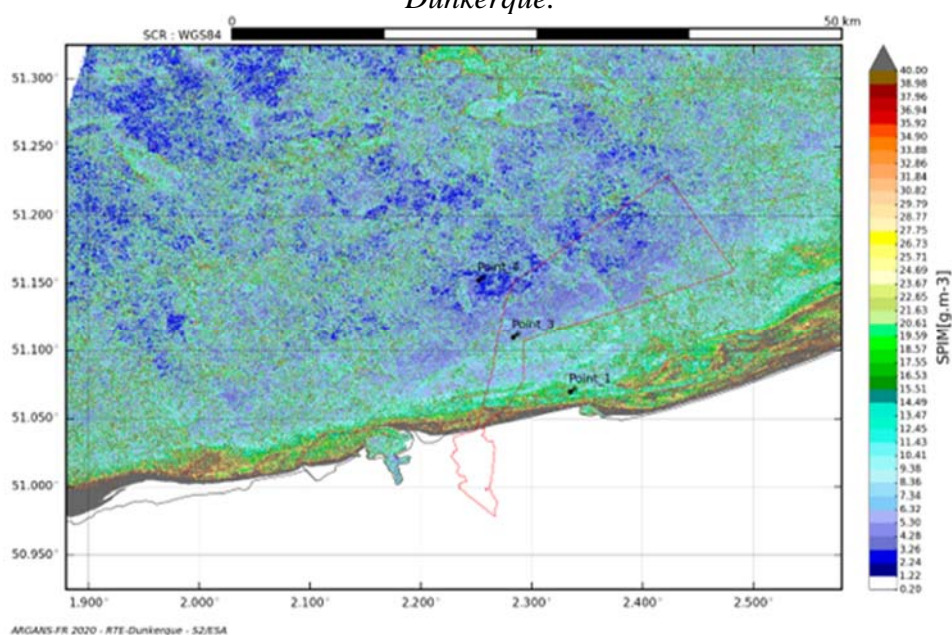


Figure 4. Ecart-type sur la concentration moyenne en matières en suspension non algale en grammes par m³ dans la masse d'eau sur la période 2016 – 2020 devant le port de Dunkerque.

3.4 Apports à la démarche d'évaluation environnementale

Dans le cadre du projet de raccordement électrique du futur parc éolien au large de Dunkerque, les résultats de cette étude ont permis d'établir un état des lieux relativement précis de la turbidité, indexé à l'état initial de l'Etude d'Impact Environnementale nécessaire à l'instruction du dossier d'autorisation des travaux. Une étude de modélisation de la turbidité induite par la remise en suspension des sédiments lors des travaux de pose de la liaison électrique a par la suite été réalisée pour RTE. Les statistiques annuelles et saisonnières de turbidité estimées grâce à l'apport des images satellitaires ont été utilisées pour établir les seuils limites de dépassements de concentration de MES. Plusieurs sites à enjeux industriels, récréatifs ou environnementaux ont été identifiés dans ou à proximité de l'aire d'étude : bancs de sable abritant des espèces sensibles, zones de baignade, spots de plongée, parcs conchylicoles et prise d'eau de la centrale de production d'électricité de Gravelines. Ces sites ont été sélectionnés en raison de leur sensibilité potentielle à une éventuelle élévation de la turbidité en phase travaux. Pour chacun des sites, un seuil de dépassement spécifique a été établi, correspondant à la teneur moyenne de particules en suspension non algales en g/m^3 estimée à partir du traitement des images satellitaires sur l'ensemble de la période 2016 – 2020. Ce seuil peut être interprété comme correspondant à la turbidité naturelle moyenne. Un intervalle de confiance (IC) correspondant à un écart-type a également été pris en considération. Le seuil le plus élevé peut ainsi être interprété comme représentatif de la turbidité maximale naturelle. Basés sur l'observation satellitaire en condition réelle, les seuils ainsi définis s'adaptent au plus juste à la réalité de la turbidité sur chacun des sites sensibles. A proximité de la zone de baignade de Malo-les-Bains, les valeurs retenues sont ainsi plus élevées (moyenne SPM = 25 g/m^3 , IC $\pm 25 \text{ g/m}^3$) que celles estimées plus au large sur la zone d'activité conchylicole (moyenne SPM = 10 g/m^3 , IC $\pm 12 \text{ g/m}^3$). Les différentes valeurs de seuil ont été reportées sur le résultat des simulations numériques de remise en suspension des sédiments réalisées pour différentes techniques de travaux de pose envisagées. Il est ainsi possible de visualiser de manière réaliste l'impact des travaux dans différentes configurations de pose et conditions de mer (figure 5). Dans le cadre de la démarche d'évitement, de réduction, et de compensation des effets négatifs notables du projet sur l'environnement et les activités humaines, l'étude réalisée sur le site de Dunkerque fournit au porteur du projet une aide à la décision lui permettant d'adapter les techniques de pose et de choisir la période la plus appropriée à la réalisation de ses travaux pour limiter les dépassements de seuils de concentration de MES simulés. A l'avenir, il est envisagé de prendre davantage en compte la saisonnalité des teneurs de particules estimées à partir du traitement des images satellitaires, ainsi que les seuils d'impact biologiques sur les espèces (lorsqu'ils seront disponibles), afin d'adapter plus finement les seuils limites de dépassement spécifique.

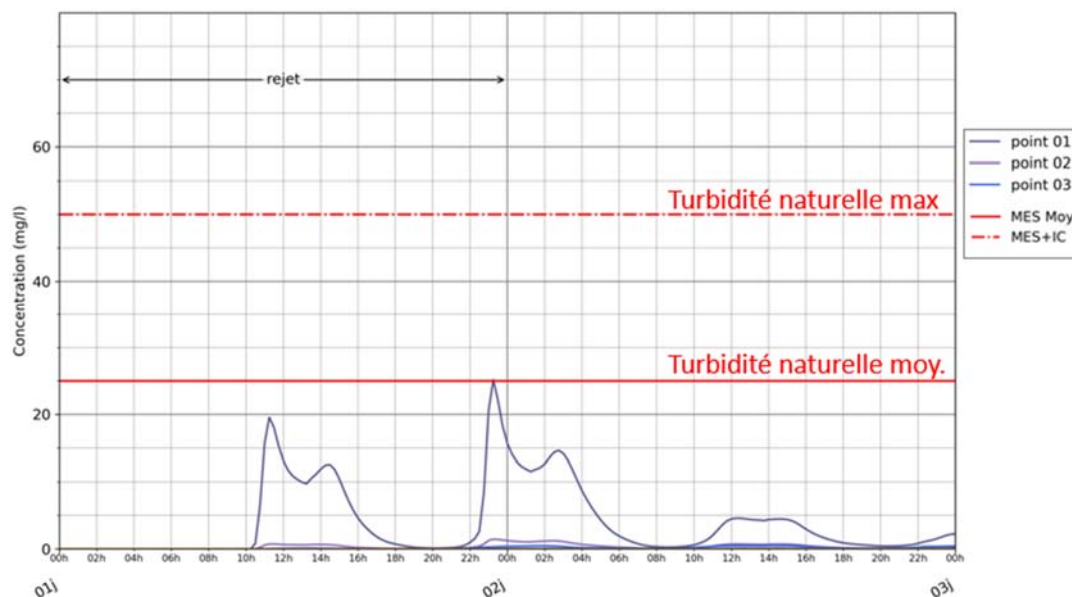


Figure 5. Exemple de résultats de turbidité simulée en phase travaux au large de la plage de Malo-les-Bains, avec indication des seuils de turbidité moyenne et maximale naturelle estimée à partir du traitement des images satellitaires sur la période 2016 – 2020. Les points 01 à 03 correspondent aux différents points de rejet simulés au cours de l’avancement des travaux.

4. Conclusions

La méthodologie que nous proposons au travers de l’utilisation des images satellitaires permet d’obtenir des estimations de turbidité. Les données obtenues permettent une couverture spatiale étendue et sur une période de plusieurs années. Bien qu’une validation par l’utilisation de mesures *in-situ* disponibles soit nécessaire, l’application de cette démarche apparaît néanmoins beaucoup moins coûteuse que la mise en œuvre d’une campagne de suivi de la turbidité sur une période équivalente. Les valeurs estimées de particules en suspension non algales en grammes par m³ dans la masse d’eau à partir du traitement des images satellitaires permettent d’établir un état des lieux de la turbidité, et ainsi d’évaluer l’état initial de la qualité des eaux dans le cadre de la démarche d’évaluation environnementale préalable à tout projet d’aménagement en milieu marin et littoral. Couplés à de la modélisation numérique, les résultats (teneurs moyenne et maximale de particules en suspension) peuvent alors servir de point de comparaison afin d’estimer l’éventuel impact des travaux maritimes sur l’environnement marin et les activités attenantes. Les statistiques saisonnières de turbidité obtenues apportent une aide précieuse à la décision dans le choix de la période la plus appropriée à la réalisation de ces travaux en fonction des contraintes environnementales et de celles liées aux usages et activités en mer. La méthodologie proposée est applicable à tous types de travaux en mer et dans les principaux champs d’activités concernés par ces travaux : éolien en mer, pose de câbles sous-marins, activités de dragage ou de clapage de sédiments.

5. Références bibliographiques

GOHIN F., DRUON J.N., LAMPERT L. (2002). *A five-channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, pp1639-1661.

<https://doi.org/10.1080/01431160110071879>

GOHIN F. (2011). *Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters*. Ocean Science, Vol. 7, pp 705-732. <https://doi.org/10.5194/os-7-705-2011>

HAN B., LOISEL H., VANTREPOTTE V., MERIAUX X., BRYERE P., OUILLON S., DESSAILLY D., XING Q., ZHU J. (2016). *Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters*. Remote Sensing, Vol. 8(3), 211. <https://doi.org/10.3390/rs8030211>

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection