

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

1. Titre du sujet de thèse

Caractérisation par télédétection multi-échelle de la végétation intertidale des côtes européennes en réponses aux pressions naturelles et anthropiques

Mots-clés : angiospermes, analyse multi-capteurs, macroalgues, microphytobenthos, pressions anthropiques, saisonnalité, variations interannuelles, zones intertidales

2. Unité de Recherche –équipe d'accueil

Laboratoire Mer Molécules Santé EA2160

Le laboratoire Mer Molécules Santé (MMS) de l'Université de Nantes est membre de l'Institut Universitaire Mer Littoral (IUML – FR CNRS 3473). Ce laboratoire compte 130 chercheurs (75 permanents) situés sur différentes universités de la Région des Pays de la Loire (<http://www.mms.univ-nantes.fr/>). Au sein de MMS, l'équipe Remote Sensing & Benthic Ecology (RSBE) travaille sur la télédétection multi- et hyperspectrale des zones côtières à différentes échelles d'observation. Les activités de recherche concernent l'étude de la structure et du fonctionnement des écosystèmes à macro-échelle, mais également l'analyse des processus à micro-échelle (quelques centimètres) appréhendée à l'aide de spectromètres imageurs de terrain, aéroportés, ou de laboratoire. L'analyse des séries temporelles des missions satellites multispectrales à haute (10 – 20 m avec SPOT et Sentinel-2) et moyenne (300 m avec MERIS et Sentinel-3) résolution spatiale permet d'acquérir des données complémentaires de la haute résolution spectrale et spatiale (1 m) des missions hyperspectrales aéroportées. L'équipe RSBE étudie la production primaire et secondaire des zones côtières dans le cadre de projets en relation avec l'aquaculture (projets ANR-GIGASSAT et H2020 TAPAS), met en place des campagnes en mer pour la mesure des propriétés optiques de l'eau de mer (projets INSU TURBO et CNES LASHA) et a été impliqué dans des projets européens et nationaux via les programmes de télédétection à haute résolution spatiale : Pléiades User Group (PUG), SPOT4 Take5 (en collaboration avec le GIPLÉ), MyGIC-SPOT6 et Venµs.

Equipe d'accueil Remote Sensing & Benthic Ecology (RSBE)
<https://mms.univ-nantes.fr/fr/rsbe-remote-sensing-benthic-ecology>

3. Encadrement

Directeur de thèse : Laurent Barillé – Pr

Co-encadrant : Pierre Gernez – MC

<https://www.univ-nantes.fr/laurent-barille>

<https://www.univ-nantes.fr/pierre-gernez>

L'encadrement est composé de deux chercheurs de l'équipe RSBE au Laboratoire MMS de l'Université de Nantes, Pierre Gernez (MC) et Laurent Barillé (Pr). L'équipe RSBE étudie depuis une vingtaine d'année les zones intertidales à l'aide de la télédétection multi- et hyperspectrale, notamment à travers la collaboration avec le Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de l'Université de Nantes qui possède des caméras hyperspectrales Hypspx et réalise des campagnes aéroportées. L'équipe RSBE a publié des travaux sur la plupart des

habitats des écosystèmes intertidaux, en particulier le microphytobenthos, les herbiers de zostères, les récifs d'huîtres sauvages, dans des revues comme *Remote Sensing of Environment* ou *Remote Sensing* et cinq thèses ont été soutenues sur ces sujets. Plus récemment, nous nous sommes intéressés aux méthodes de type machine-learning, que nous souhaitons mettre en œuvre pour cartographier les habitats à une échelle nationale et européenne. Nous sommes actuellement impliqués dans le projet européen H2020 CoastObs (<https://coastobs.eu/>) qui repose sur l'utilisation de l'imagerie satellite à haute résolution spatiale et temporelle pour cartographier les environnements côtiers.

4. Coordonnées

Laurent.barille@univ-nantes.fr 0251125655

Pierre.Gernez@univ-nantes.fr 0251125654

Laboratoire MMS, Faculté des Sciences et des Techniques, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 03

5. Contexte général, objectifs, intérêt général, plan

Les habitats structurés par des végétaux marins dans les zones intertidales qui découvrent à marée basse (herbiers d'angiospermes marines, microphytobenthos, macroalgues) sont fortement impactés par les activités humaines: les herbiers d'angiospermes marines sont menacés par de nombreuses activités anthropiques (McKenzie et al., 2020), le microphytobenthos est affecté par la diminution mondiale des vasières intertidales (Murray et al., 2019), les surfaces colonisées par les macroalgues pourraient être réduite par l'expansion des huîtres sauvages (Le Bris et al., 2016). Ces habitats remplissent des fonctions écologiques reconnues : protection contre l'érosion côtière, atténuation des effets de l'eutrophisation, fixation du CO₂ atmosphérique, hotspots de biodiversité abritant une flore et une faune spécifique. Les zones intertidales sont néanmoins difficiles d'accès, notamment les zones de vasières, et les échantillonnages traditionnels de terrain demanderaient trop de temps et d'effort pour observer de manière répétée l'ensemble des surfaces considérées. Cependant, la demande réglementaire de suivi du bon état écologique des habitats marins côtiers nécessite des cartographies régulières. C'est le cas de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) ou de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) qui utilisent la diversité des habitats marins comme bioindicateur de la qualité des eaux côtières ou estuariennes (Borja et al. 2013 ; Zoffoli et al., Submitted). La télédétection spatiale est un outil novateur pour étudier les variables essentielles pour la biodiversité de ces habitats (Peirera et al. 2013 ; Skidmore et al. 2015), mais les missions satellite passées et présentes n'ont pas les caractéristiques techniques optimales (résolution spatiale, spectrale et temporelle) pour être pleinement opérationnelles (Muller-Karger et al., 2018). Pour certains habitats, une résolution multispectrale peut suffire sous certaines conditions (Zoffoli et al. 2020), mais des risques de confusion demeurent. Pour d'autres, une résolution spectrale plus importante est indispensable pour permettre de distinguer des classes d'organismes distincts du point de vue taxonomique (Fyfe et al., 2003 ; Launeau et al. 2018, Méléder et al., 2018). Le principe d'identification repose en effet en partie sur la présence de bandes d'absorption dans le visible liées à la présence de pigments photosynthétiques et accessoires, qu'il est possible de détecter et de quantifier par chromatographie liquide à haute performance (Méléder et al. 2003, 2005 ; Bargain et al. 2013 ; Jesus et al., 2014). L'analyse de la phénologie de ces organismes pourrait également être exploitée pour aider à leur discrimination. Grâce à son temps de revisite de 2 à 5 jours, le satellite Sentinel 2, peut également permettre d'identifier des cycles saisonniers de végétaux

marins (Zoffoli et al. 2020). Les variations temporelles de la végétation intertidale ont été beaucoup moins documentées que les variations spatiales, notamment en raison de la disponibilité réduite d'images satellites à haute résolution spatiale (*e.g.* SPOT, LANDSAT) et des contraintes d'acquisition des images à marée basse liées à l'objet d'étude. Même depuis le lancement de Sentinel 2 en 2015, il n'existe actuellement pas de capteur permettant à la fois d'avoir des résolutions spatiale/spectrales/temporelles élevées (Figure 1). Cette thèse va donc faire appel à une analyse multi-capteurs (MSI/Sentinel 2 ; OLCI/Sentinel 3 ; Terra/MODIS) et utiliser notamment la cartographie à très-haute résolution spatiale par drone.

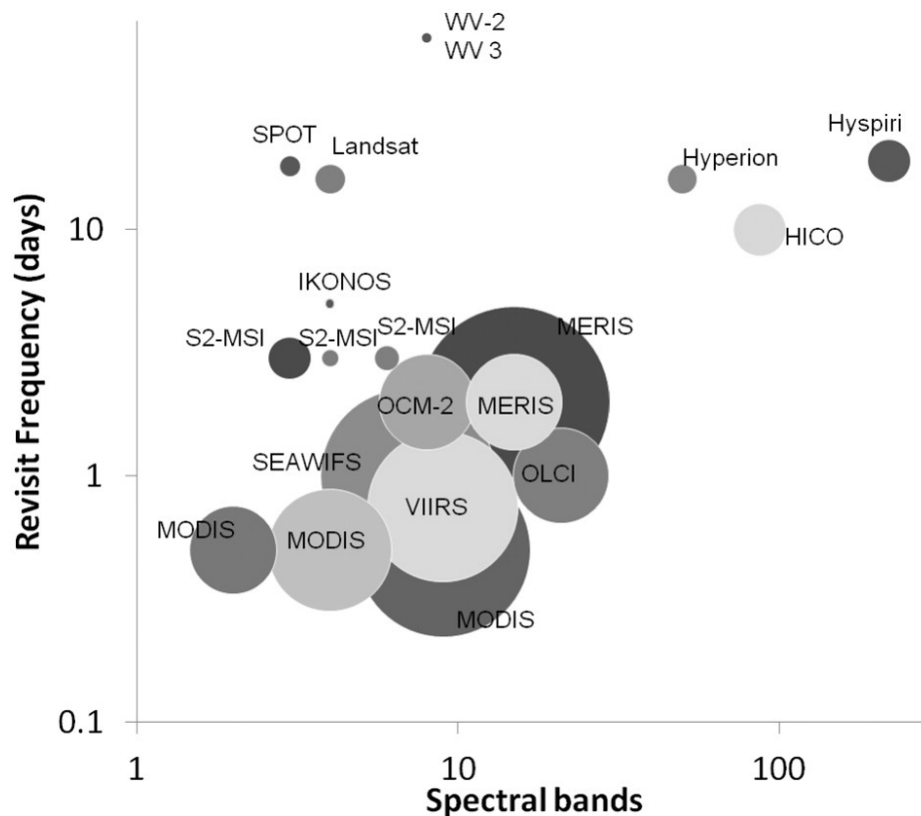


Fig. 1. Croisement des caractéristiques spectrales (axe des abscisses), temporelles (axes des ordonnées) et spatiales (Taille des cercles) des principaux capteurs satellites utilisés pour observer les zones côtières. Les capteurs hyperspectraux (Hyperion, HICO, Hypispi) possèdent une centaine de bandes spectrales mais ont une fréquence de revisite faible et une résolution spatiale insuffisante. Les capteurs ayant le temps de revisite le plus court (MODIS, VIIRS, OLCI) ont une résolution spectrale moindre (entre 2 – 20 bandes spectrales) et une faible résolution spatiale (250 m – 1 km) (Hestir *et al.* 2015). Avec une dizaine de bandes spectrales, une résolution de 10 m, et un temps de revisite < 5 jours, Sentinel 2 (S2-MSI) propose un compromis intéressant.

Le projet de thèse va se concentrer sur les trois principaux producteurs primaires des zones intertidales de substrat meuble: les herbiers d'angiospermes marines, les macroalgues et le microphytobenthos (Fig. 2). Les plantes du schorre ne seront pas considérées. Le déroulement de la thèse est prévu de façon graduelle avec une progression de la micro-échelle (résolution centimétrique) permettant d'aborder des processus à partir d'observations stationnelles d'un habitat donné, puis à méso échelle (résolution décamétrique) dans une zone côtière avec des séries temporelles permettant de couvrir 2 à 4 décades, pour finir par la macro-échelle (emprise kilométrique) pour plusieurs sites des côtes françaises et européennes.

Les objectifs sont liés à la cartographie des variations spatio-temporelles de la biodiversité des végétaux des zones intertidales par télédétection, notamment avec le satellite Sentinel 2, puis à l'analyse des principaux facteurs naturels et anthropiques responsables des changements (en termes de diversité, distribution spatiale, et dynamique temporelle). L'enjeu sera enfin de montrer que la télédétection peut répondre à la demande réglementaire de suivi de l'état écologique des habitats d'intérêt communautaires (Papathanasopoulou et al. 2019) et que le microphytobenthos pourrait être utilisé comme indicateur de la qualité de l'eau, au même titre que les angiospermes marines et les macroalgues (Ribeiro et al. 2018 ; Oiry & Barillé 2021).

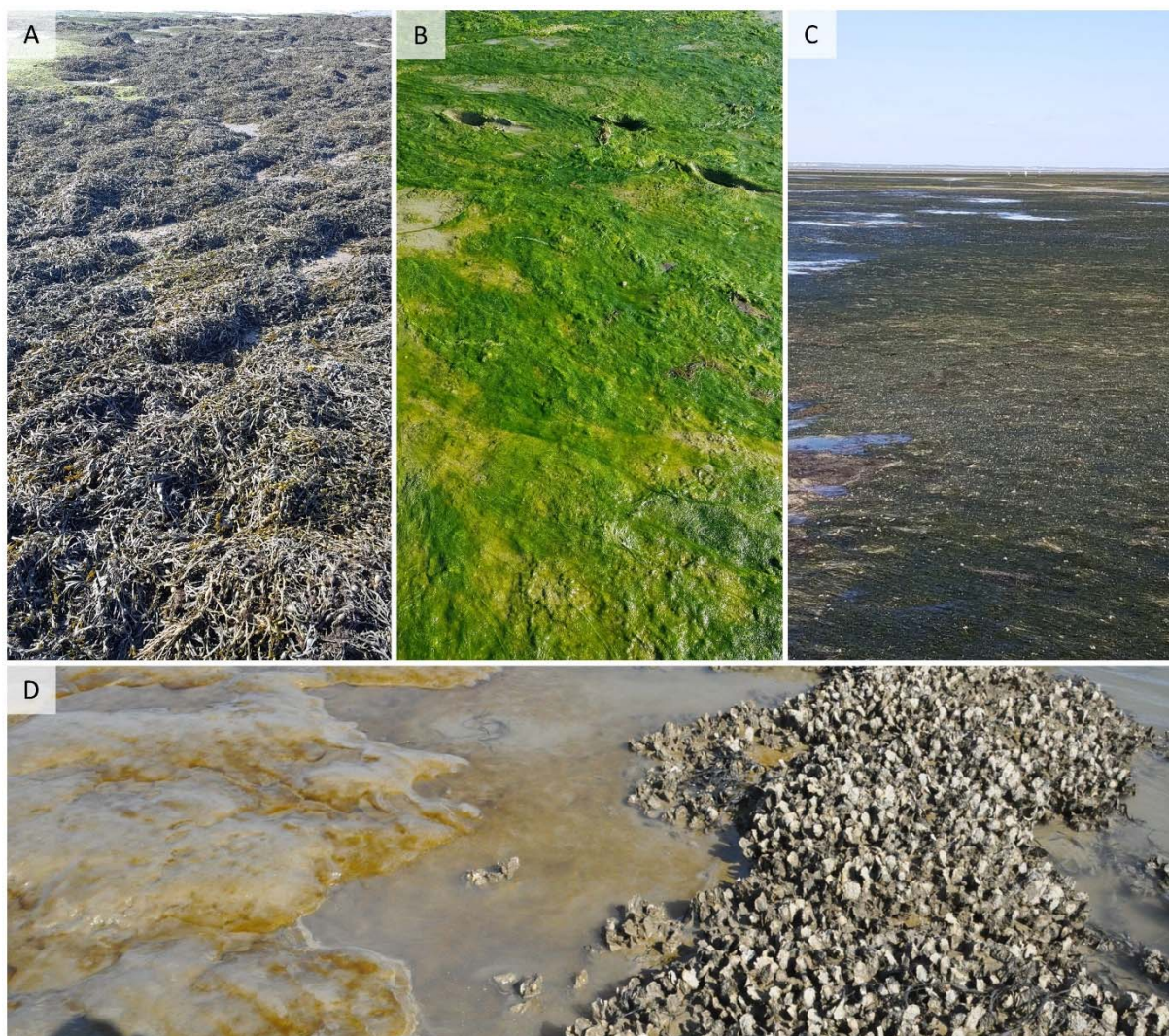


Fig. 2. Principaux producteurs primaires des zones intertidales pris en compte dans ce projet: les macroalgues, en particulier les ceintures d'algues brunes médiolittorale (A), les macroalgues vertes opportunistes (B), les herbiers d'angiospermes marines notamment de *Zostera noltei* (C), et le microphytobenthos qui forme des biofilms à la surface des sédiments vaseux et les huîtres sauvages qui peuvent interagir avec ces habitats (D).

Plan de la thèse

Très haute résolution spatiale & temporelle : étude de processus à microéchelle (Année 1)

La très haute résolution spatiale sera exploitée à partir de drones équipées de capteurs multispectraux pour analyser deux sources de pressions spécifiques mais majeures qui s'exercent sur deux des habitats intertidaux. La première source est le rôle des concentrations élevées de nutriments (en particulier azote et phosphore) sur le développement du microphytobenthos. La question n'a toujours pas été résolue et conditionne le développement d'un bioindicateur des apports azotés basé sur le microphytobenthos (Oiry & Barillé 2021). Une expérimentation d'enrichissement in situ de vase en nutriments est envisagée avec un suivi de la biomasse des microalgues benthiques par drone. La seconde est l'estimation de l'impact de la pêche à pied sur les herbiers de *Zostera noltei* qui n'est pour l'instant pas quantifiable même avec la haute résolution spatiale (2 m) de capteurs comme Pléiades ou Worldview. L'objectif est d'exploiter à la fois la très haute résolution spatiale (1 cm) et temporelle (plusieurs mesures au cours d'un cycle de marée) pour quantifier ces impacts. Ces deux expérimentations permettront également d'acquérir des données de validation pour les cartographies réalisées à meso- et macroéchelle. Ce sera aussi l'occasion de faire le point sur les bibliothèques spectrales disponibles et pour l'étudiant d'intégrer les limites de discrimination spectrale de végétaux partageant un cortège de pigments chlorophylliens et accessoires.

Evolution de quatre habitats intertidaux sur deux décades (2000-2020) dans un site pilote : variations saisonnières et interannuelles (mésoséchelle) (Année 2)

Avant l'arrivée des données du satellite Sentinel 2 en 2015 et sa fréquence d'acquisition de 3 à 5 jours, les variations temporelles des habitats intertidaux ont été peu documentées à l'aide de la télédétection (Brito et al., 2013 ; van der Wal et al., 2010 ; Benyoucef et al., 2014). Cette absence générale de données temporelles explique qu'il n'existe pas de séries temporelles couvrant une ou deux décennies qui puissent être utilisées pour décrire l'évolution de la végétation intertidale soumises aux changements globaux et aux pressions anthropiques. Pourtant dans les eaux côtières et estuariennes, il existe une demande venant des agences en charge de la mise en place des directives européennes (Directive Cadre sur l'Eau-DCE ; Directive Cadre Stratégie Milieu Marin-DCSMM) pour mettre en relation ces habitats avec les pressions. Nous souhaitons ainsi analyser les variations saisonnières et interannuelles des macroalgues, angiospermes, microphytobenthos et récifs d'huîtres sauvages dans un même site pilote comprenant la baie de Bourgneuf et l'estuaire de la Loire à partir d'images Sentinel 2 (10 m, 2015 – présent) acquises tous les 3-5 jours complétées par des images MODIS (2002 – présent), MERIS (300 m, 2002 – 2012) et Sentinel 3 (300 m, 2017 – présent) acquises tous les 1 - 2 jours. L'analyse simultanée des habitats pourrait permettre de détecter des interactions possibles notamment entre les huîtres sauvages (*Crassostrea gigas*) une espèce invasive depuis une vingtaine d'année, et les macroalgues qui semblent en régression sur plusieurs sites (Le Bris et al. 2016). Les variations saisonnières et les tendances issues des séries temporelles seront analysées à l'aide de Modèles Linéaires Dynamique (DLM) (Hernandez-Farinas 2015).

Les relations avec les variables de pressions seront étudiées grâce à des données collectées sur la période d'étude (2000-2020). Le laboratoire MMS possède une base de données des variables

environnementales sur le site d'étude (contrat avec Météo France et données du site donneespubliques.meteofrance.fr). Des données de pressions complémentaires seront obtenues auprès de la plateforme Naiades (naiades.eaufrance.fr) de l'Office Français pour la Biodiversité (OFB) et du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Cette dernière plateforme compile les données issues des agences de l'eau. Les données de concentration en polluants dans l'eau seront recueillies sur la plateforme Surval de l'Institut Français de Recherche pour l'exploration de la mer (IFREMER). Cette plateforme permet de consulter et de télécharger les données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux marines et littorales, issues de la base de données Quadrige. Cette base de données a été désignée système d'information de référence sur les eaux littorales par le ministère de l'environnement dans le cadre du Système d'Information sur l'Eau. Elle regroupe des données de concentration des principaux polluants des eaux continentales (métaux et organoétains, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles...) dans les sédiments.

Cartographie à macroéchelle des habitats intertidaux (Année 3)

Dans cette dernière partie, il s'agira de cartographier les habitats intertidaux à l'échelle nationale et européenne à l'aide du satellite Sentinel 2. Nous pensons que Google Earth Engine pourrait être un bon outil, permettant de traiter facilement un nombre important de données satellite. En raison de la résolution spectrale réduite de Sentinel 2, nous prévoyons d'utiliser des méthodes de classification de type machine learning (Support Vector Machine, k-Nearest Neighbor, Random Forest) qui ont été appliquées avec succès pour identifier la végétation intertidale avec des capteurs multispectraux (Murray et al. 2019 ; Martin 2020 ; Oiry & Barillé 2021 ; Traganos & Reinartz, 2018). Ces méthodes sont basées sur les réflectances des bandes spectrales dans le visible et le proche infrarouge, les indices multispectraux, les données radar, ainsi que les variables utilisées par les techniques de segmentation d'images (Poursanadis et al. 2018). Le microphytobenthos, les macroalgues, les herbiers marins, peuvent être grossièrement identifiés avec des indices multispectraux basés sur des seuils appliqués aux indices de végétation (Méléder et al. 2003; Echappé et al. 2018, Zoffoli et al. 2020). Cependant, des informations supplémentaires telles que le type de substrat ou la bathymétrie sont souvent nécessaires pour faciliter la discrimination (Barillé et al. 2011). L'ajout de données radar pourrait également être utile pour identifier les récifs d'huîtres sauvages (Wang et al. 2021).

Deux sites pilotes intertidaux (Fig. 3), à savoir la baie de Bourgneuf et l'estuaire de la Penzé le long de la côte atlantique française, seront utilisées pour développer les algorithmes car (i) ils abritent une diversité d'habitats et (ii) sont déjà documentés avec des données *in situ* de cartographie et de spectroradiométrie. Trois sites de validation sont envisagés du nord au sud de l'Europe : les zones intertidales de la mer des Wadden en Allemagne, la baie du Mont Saint-Michel, la baie d'Aveiro au Portugal. La structure de la végétation intertidale entre les différents sites sera interprétée en fonction des gradients climatiques et des pressions anthropiques.

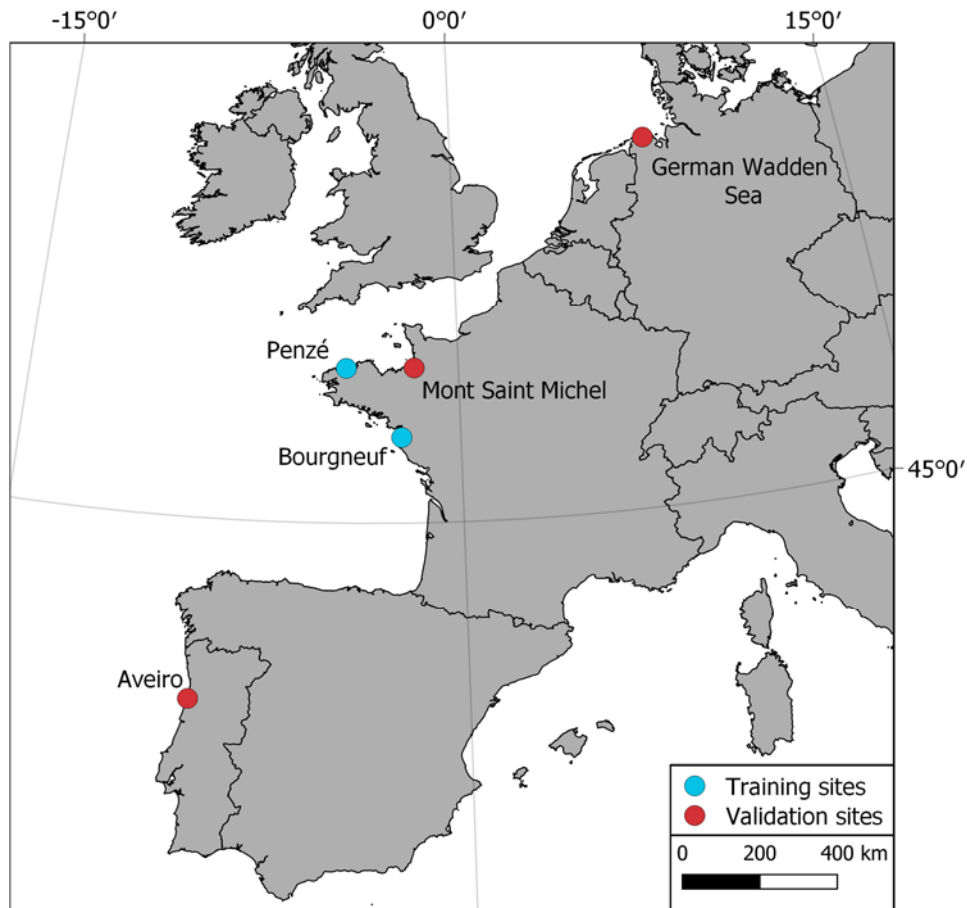


Fig. 3. Sites d'entraînement et de validation des algorithmes d'identification des habitats intertidaux à partir des images Sentinel 2.

6. Partenariat, financement du projet, matériels à disposition

Partenariat national : Debaine MCF CR – IGARUN (Université de Nantes)

Les travaux de thèse bénéficieront d'une collaboration avec Françoise Debaine de l'Institut de Géographie et d'Aménagement- IGARUN (Université de Nantes) pour son expertise en analyse de texture avec le logiciel E-cognition. Cette analyse des formes pourrait compléter celle basée sur les propriétés spectrales pour des habitats structurés comme les récifs d'huîtres sauvages.

Partenariat international:

Martin Gade (Lecturer) Université de Hambourg pour l'obtention de données radar et de validation sur le site de la mer des Wadden.

Joao Serodio (Professeur) Université d'Aveiro, pour les données de validation de la baie d'Aveiro

Dimosthenis Traganos (Dr) (Centre Allemand en Sciences Aéroportées et Spatiales) pour son expertise en Machine Learning et en traitement de données sous Google Earth Engine.

Victor Martinez-Vicente (Dr) (Plymouth Marine Laboratory) pour les interactions avec le projet BiCOME (voir ci-dessous).

Financement pour le fonctionnement du projet

Un projet européen porté par le Plymouth Marine Laboratory (PML) en collaboration avec l'Université de Nantes et le Centre Allemand en Sciences Aéroportées et Spatiales (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) a été soumis en 2021 à l'Agence Spatiale Européenne en réponse à l'appel BIODIVERSITY + PRECURSORS: COASTAL ECOSYSTEMS (<https://down2earth.esa.int/opportunities/biodiversity-precursors/>).

Le projet s'intitule "Biodiversity of the Coastal Ocean : Monitoring with Earth Observation (BiCOME)" et a pour objectifs principaux d'identifier et caractériser le potentiel de la télédétection pour étudier la biodiversité sur plusieurs sites pilotes côtiers et d'évaluer les capacités des capteurs présents et futurs sur les sites pilotes. La thèse pourra s'articuler avec le projet et bénéficier de 10 Keuros en frais de fonctionnement (échanges et accueil chez les partenaires européens).

Matériels à disposition

Images d'archives SPOT, Landsat, MERIS, images hyperspectrales Hypspx, DESIS

Spectroradiomètres ASD FieldSpec, Ocean Optics

Drones Phantom IV et Matrice 200 avec capteurs multispectraux

Librairie spectrale de microalgues benthiques

Chromatographie Liquide Haute Performance (HPLC) pour l'analyse des pigments

Collection de microalgues benthiques et dispositifs pour la réalisation de mesures expérimentales.

Logiciels de traitements d'images satellites ENVI

Logiciels de Système d'Information Géographique MapInfo, ArcGis, eCognition

Logiciels de traitement de données PRIMER, CANOCO

7. Publications des encadrants en relation avec le sujet

Bargain, A., Robin, M., Méléder, V., Rosa, P., Menn, E. Le, Harin, N., & Barillé, L. (2013). Seasonal spectral variation of *Zostera noltii* and its influence on pigment-based Vegetation Indices. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 446. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.04.012>

Barillé, L., Mouget, J.-L., Méléder, V., Rosa, P., & Jesus, B. (2011). Spectral response of benthic diatoms with different sediment backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 115(4). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.008>

Benyoucef, I., Blandin, E., Lerouxel, A., Jesus, B., Rosa, P., Méléder, V., Launeau, P., & Barillé, L. (2014). Microphytobenthos interannual variations in a north-European estuary (Loire estuary, France) detected by visible-infrared multispectral remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 136, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.007>

Brito, A. C., Benyoucef, I., Jesus, B., Brotas, V., Gernez, P., Mendes, C. R., Launeau, P., Dias, M. P., & Barillé, L. (2013). Seasonality of microphytobenthos revealed by remote-sensing in a South European estuary. *Continental Shelf Research*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.07.004>

- Echappé, C., Gernez, P., Méléder, V., Jesus, B., Cognie, B., Decottignies, P., Sabbe, K., & Barillé, L. (2018). Satellite remote sensing reveals a positive impact of living oyster reefs on microalgal biofilm development. *Biogeosciences*, 15(3), 905–918. <https://doi.org/10.5194/bg-15-905-2018>
- Jesus, B., Rosa, P., Mouget, J. L., Méléder, V., Launeau, P., & Barillé, L. (2014). Spectral-radiometric analysis of taxonomically mixed microphytobenthic biofilms. *Remote Sensing of Environment*, 140, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.040>
- Launeau, P., Méléder, V., Verpoorter, C., Barillé, L., Kazemipour-Ricci, F., Giraud, M., Jesus, B., & Le Menn, E. (2018). Microphytobenthos Biomass and Diversity Mapping at Different Spatial Scales with a Hyperspectral Optical Model. *Remote Sensing*, 10(5), 716. <https://doi.org/10.3390/rs10050716>
- Le Bris, A., Rosa, P., Lerouxel, A., Cognie, B., Gernez, P., Launeau, P., Robin, M., & Barillé, L. (2016). Hyperspectral remote sensing of wild oyster reefs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 172, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.039>
- Méléder, Barillé, L., Launeau, P., Carrère, V., & Rincé, Y. (2003). Spectrometric constraint in analysis of benthic diatom biomass using monospecific cultures. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 386–400. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.08.009>
- Méléder, V., Barillé, L., Rincé, Y., Morançais, M., Rosa, P., & Gaudin, P. (2005). Spatio-temporal changes in microphytobenthos structure analysed by pigment composition in a macrotidal flat (Bourgneuf Bay, France). *Marine Ecology Progress Series*, 297, 83–99.
- Méléder, V., Jesus, B., Barnett, A., Barillé, L., & Lavaud, J. (2018). Microphytobenthos primary production estimated by hyperspectral reflectance. *PLOS ONE*, 13(5), e0197093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197093>
- Oiry S., Barillé L., 2021. Using Sentinel-2 satellite imagery to develop microphytobenthos-based water quality indices in estuaries. *Ecological Indicators* 121 107184 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107184>
- Zoffoli, M. L., Gernez, P., Rosa, P., Le Bris, A., Brando, V. E., Barillé, A. L., Harin, N., Peters, S., Poser, K., Spaias, L., Peralta, G., & Barillé, L. (2020). Sentinel-2 remote sensing of *Zostera noltei*-dominated intertidal seagrass meadows. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112020>
- Zoffoli, M. L., Gernez, P., Godet, L., Peters, S., & Barillé, L. (Submitted). Decadal increase in the ecological status of a North-Atlantic intertidal seagrass meadow observed with multi-mission satellite time-series. *Ecological Indicators*

Bibliographie générale

- Borja, A., Elliott, M., Andersen, J. H., Cardoso, A. C., Carstensen, J., Ferreira, J. G., Heiskanen, A.-S., Marques, J. C., Neto, J. M., Teixeira, H., Uusitalo, L., Uyarra, M. C., & Zampoukas, N. (2013). Good Environmental Status of marine ecosystems: What is it and how do we know when we have attained it? *Marine Pollution Bulletin*, 76(1), 16–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.042>
- Hernandez Farinas, T. (2015). Analyse et modélisation des évolutions à long terme de la biodiversité phytoplanctonique dans les zones côtières sous l'effet des pressions environnementales et anthropiques: Vol. PhD [Université Nantes], pp.353, <http://archimer.ifremer.fr/doc/00315/42648/>
- Fyfe, S. K. (2003). Spatial and temporal variation in spectral reflectance: Are seagrass species spectrally distinct? *Limnology and Oceanography*, 48(1 II), 464–479.

https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0464

- Hestir, E. L., Brando, V. E., Bresciani, M., Giardino, C., Matta, E., Villa, P., & Dekker, A. G. (2015). Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission. *Remote Sensing of Environment*, 167, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.023>
- McKenzie, L. J., Nordlund, L. M., Jones, B. L., Cullen-Unsworth, L. C., Roelfsema, C., & Unsworth, R. K. F. (2020). The global distribution of seagrass meadows. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074041. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7d06>
- Martin, R. D. (2020). Determining estuarine seagrass density measures from low altitude multispectral imagery flown by remotely piloted aircraft. PhD thesis of the University of Waikato, pp.342 <https://researchcommons.waikato.ac.nz/handle/10289/13663>.
- Muller-Karger, F. E., Hestir, E., Ade, C., Turpie, K., Roberts, D. A., Siegel, D., Miller, R. J., Humm, D., Izenberg, N., Keller, M., Morgan, F., Frouin, R., Dekker, A. G., Gardner, R., Goodman, J., Schaeffer, B., Franz, B. A., Pahlevan, N., Mannino, A. G., ... Jetz, W. (2018). Satellite sensor requirements for monitoring essential biodiversity variables of coastal ecosystems. *Ecological Applications*, 28(3), 749–760. <https://doi.org/10.1002/eap.1682>
- Murray, N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D., & Fuller, R. A. (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738), 222–225. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>
- Papathanasopoulou, E., Simis, S., Alikas, K., Ansper, A., Anttila, S., Jenni, A., Barillé, A.-L., Barillé, L., Brando, V., Bresciani, M., Bučas, M., Gernez, P., Giardino, C., Harin, N., Hommersom, A., Kangro, K., Kauppila, P., Koponen, S., Laanen, M., Neil, C., Papadakis, D., Peters, S., Poikane, S., Kathrin Poser, K., Pires, M.D., Riddick, C., Spyrakos, E., Tyler, A., Vaičiūtė, D., Warren, M., Zoffoli, M.L., 2019. Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive. EOMORES white Pap. 28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3463051>
- Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., ... Wegmann, M. (2013). Essential biodiversity variables. In *Science* (Vol. 339, Issue 6117, pp. 277–278). American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
- Poursanidis, D., Topouzelis, K., & Chrysoulakis, N. (2018). Mapping coastal marine habitats and delineating the deep limits of the Neptune’s seagrass meadows using very high resolution Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(23), 8670–8687. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1490974>
- Skidmore, A. K., Pettorelli, N., Coops, N. C., Geller, G. N., Hansen, M., Lucas, R., Múcher, C. A., O’Connor, B., Paganini, M., Pereira, H. M., Schaeppman, M. E., Turner, W., Wang, T., & Wegmann, M. (2015). Environmental science: Agree on biodiversity metrics to track from space. *Nature*, 523(7561), 403–405. <https://doi.org/10.1038/523403a>
- Traganos, D., & Reinartz, P. (2018). Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery. *Marine Pollution Bulletin*, 134, 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.075>
- Wang, W., Gade, M., Stelzer, K., Kohlus, J., Zhao, X., & Fu, K. (2021). A Classification Scheme for Sediments and Habitats on Exposed Intertidal Flats with Multi-Frequency Polarimetric SAR. *Remote Sensing*, 13(3), 360. <https://doi.org/10.3390/rs13030360>