

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 642

Ecole doctorale Végétal, Animal, Aliment, Mer, Environnement

Spécialité : Biologie et écologie marine

Par

Simon OIRY

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

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 15 mai 2025

Unité de Recherche: Institut Des Substances et Organismes de la Mer

Rapporteurs avant soutenance :

Antoine Collin	Maitre de conférences	Ecole Pratique des Hautes Etudes, Dinard
Rodney Foster	Professeur	Université de Hull, Royaume-Uni

Composition du Jury :

Président :

Examineurs :	Antoine Collin	Maitre de conférences	Ecole Pratique des Hautes Etudes, Dinard
	Rodney Foster	Professeur	Université de Hull, Royaume-Uni
	Evangelos Spyarakos	Professeur	Université de Stirling, Royaume-Uni
	Barbara Ondiviela	Senior scientist	Université de Cantabrie, Espagne

Dir. de thèse :	Laurent Barillé	Professeur	Nantes Université
-----------------	-----------------	------------	-------------------

Co-dir. de thèse :	Pierre Gernez	Maitre de conférence	Nantes Université
--------------------	---------------	----------------------	-------------------

Invitée :

Federica Braga	Senior Researcher	Conseil Supérieur de la Recherche, Venise, Italie
----------------	-------------------	---

Remerciement

Ce parcours de doctorat a été long, difficile et parfois épuisant, mais il a également été rempli de moments enrichissants et de personnes incroyables qui ont rendu tout cela digne d'intérêt.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse, Laurent Barillé. Merci pour tes conseils, ta patience et ton soutien sans faille tout au long de ce processus. Merci pour toute la liberté que tu m'as accordée pendant ces années. Ton expertise et tes encouragements m'ont poussé à m'améliorer à chaque étape, même lorsque j'avais des doutes. J'ai appris énormément sous ta direction, et je suis vraiment reconnaissant de la confiance que tu m'as accordée. Un merci particulier pour ton aide avec toutes les démarches administratives — je sais que j'ai été paresseux à ce sujet, et j'apprécie sincèrement ta patience !

Un grand merci également à mon co-directeur, Pierre Gernez, pour tes conseils avisés, tes retours constructifs et ton soutien constant. Ta perspective m'a toujours aidé à prendre du recul et à voir les choses plus clairement, et j'ai profondément apprécié nos discussions.

J'ai eu une chance incroyable de travailler aux côtés de Bede Davies, dont la générosité en termes de temps et de connaissances a dépassé tout ce que j'aurais pu espérer d'un collègue. Bede, collaborer avec toi a été l'un des meilleurs aspects de ce doctorat — ta patience et ton dévouement ont rendu même les défis de recherche les plus difficiles plus faciles à gérer.

Je tiens également à remercier sincèrement Philippe Rosa, qui a été un véritable sauveur pendant les travaux de terrain. Philippe, tu étais toujours là, prêt à aider, résoudre des problèmes ou simplement partager un éclat de rire quand les choses allaient inévitablement de travers sur le terrain.

Sur un plan plus personnel, je dois une immense gratitude à Laura Zoffoli. Merci d'avoir supporté les nuits tardives, le stress et les conversations interminables sur les herbiers et la télédétection. Ton soutien et ta patience ont été essentiels pour moi, et je n'aurais pas pu accomplir cela sans toi.

Enfin, à ma famille — merci de m'avoir toujours cru, même lorsque je ne croyais pas en moi. Vos encouragements, votre amour et vos rappels qu'il y a une vie en dehors de la recherche ont été une source constante de force. Je suis tellement chanceux de vous avoir à mes côtés.

À tous ceux qui ont fait partie de ce parcours d'une manière ou d'une autre — merci.

Table of contents

Remerciement	iii
Preface	1
Scientific papers	1
Presentations to International Conferences	2
Project related to the thesis.	3
BiCOME	3
Rewrite	4
InvaSea	4

List of Figures

List of Tables

Liste des abréviations

ASI	A genzia S paziale I taliana
ANOSIM	A nalysis of S imilarity
AHW	A tmospheric H eat w ave
BOA	B ottom of A tmosphere
BPI	B rown P igment I ndex
Chla	C hlorophyll- a
Chlb	C hlorophyll- b
Chlc	C hlorophyll- c
CMEMS	C opernicus M arine E nvironment M onitoring S ervice
dGPS	d ifferential G PS
DHM	D igital H eight M odel
DSM	D igital S urface M odel
DTM	D igital T errain M odel
DPA	D iphenylamine
DISCOV	D rone I ntertidal S ubstrate C lassification O f V egetation
DLS2	D ownwelling L ight S ensor
EO	E arth O bservation
EMR	E lectromagnetic R adiation
EBVs	E ssential B iodiversity V ariables
EOVs	E ssential O cean V ariables
ESA	E uropean S pace A gency
EU	E uropean U nion
EPS	E xtracellular P olymeric S ubstances
IGN	I nstitut N ational de l'information G eographique et forestiere
FO	F ront O verlap
FWHM	F ull W idth at H alf M aximum
GAM	G eneralized A dditive M odel
GLM	G eneralized L inear M odel
GLMM	G eneralized L inear M ixed M odel
GBIF	G lobal B iodiversity I nformation F acility
GOOS	G lobal O cean O bserving S ystem
GLI	G reen L eaf I ndex
GVA	G ross V alue A dded
HSPs	H eat- S hock P roteins
HIDF	H eatwave I ntensity D uration F requency
HPLC	H igh P erformance L iquid C hromatography
HiRI	H igh-resolution I mager
HW	H eat W ave
HYC	H yperspectral C amera
ICE CREAMS	I ntertidal C lassification of E urope: C ategorising R eflectance of E merged A reas of M arine vegetation with S entinel2
IR	I nfrared

IFOV	I ntantaneous F ield of V iew
IGN	I nstitut N ational de l'Information G éographique et F orestiere (2024a)
IPBES	I ntergovernmental S cience- P olicy P latform on B iodiversity and E cosystem S ervices
IAS	I nvasive A lien S pecies
LiDAR	L ight D etection and R anging
MSFD	M arine S trategy F ramework D irective
ML	M achine L earning
MHW	M arine H eatwave
PRISMA	P recursore I perspecttrale della M issione A pplicativa
PAR	P hotosynthetically A ctive R adiation
SST	S ea S urface T emperature

Liste des symboles

FN_i	False negative relative to the class i
FP_i	False positive relative to the class i
h_{sensor}	Sensor dimension (height) in the flight direction
TN_i	True negatives relative to the class i
TP_i	True positives relative to the class i
L_{down}	Downwelling radiance
L_{up}	Upwelling radiance
R_{BOA}	Reflectance at the bottom of atmosphere
$R_i(\lambda)$	Reflectance of spectrum i at a specific wavelength λ
$R_i^*(\lambda)$	Standardised R of spectrum i at wavelength λ
d_{fl}	Distance between two adjacent flight lines
w_{sensor}	Sensor dimension (width) perpendicular to the flight direction
L	Radiance
$\max(R_i)$	Maximum reflectance value at spectrum i
$\min(R_i)$	Minimum reflectance value at spectrum i
h	Flight altitude above the ground
R	Reflectance
$R''(\lambda_i)$	Second derivative at the wavelength λ_i
f	Camera focal length
v_g	Ground speed of the drone
Δt	Time interval between consecutive photos
$\Delta \lambda$	Uniform spectral sampling interval
λ	Wavelength

Preface

This PhD work was carried out at Nantes University between 2022 and 2024, within the “Remote Sensing, Benthic Ecology and Ecotoxicology” (RSBE²) team of the Institute of Marine Substances and Organisms (ISOMer). This thesis was funded by the Ministry of Research and Higher Education and supervised by the doctoral school “Plant, Animal, Food, Sea, Environment” (VAAME).

Scientific papers

- **Oiry, S.**, Davies, B. F. R., Rosa, P., Debly, A., Zoffoli, M. L., Barillé, A.-L., Harin, N., Román, M., Gernez, P., & Barillé, L. (Submitted). Heatwave impacts on intertidal seagrass reflectance: From laboratory experiment to satellite mapping of Seagrass Heat Shock Index.
- **Oiry, S.**, Davies, B. F. R., Stiger-Pouvreau, V., Gernez, P., & Barillé, L. (Submitted). Mapping the distribution of the alien invasive *Gracilaria vermiculophylla* at the site of its First European Observation.
- Barillé, L., Paterson, I. L. R., **Oiry, S.**, Aris, A., Cook-Cottier, E. J., & Nurdin, N. (2025). Variability of *Kappaphycus alvarezii* cultivation in South-Sulawesi (Indonesia) related to the monsoon shift: Water quality, growth and colour quantification. *Aquaculture Reports*, 40, 102557. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102557>
- **Oiry, S.**, Davies, B. F. R., Sousa, A. I., Rosa, P., Zoffoli, M. L., Brunier, G., Gernez, P., & Barillé, L. (2024). Discriminating Seagrasses from Green Macroalgae in European Intertidal Areas Using High-Resolution Multispectral Drone Imagery. *Remote Sensing*, 16(23), 4383. <https://doi.org/10.3390/rs16234383>
- Román, A., **Oiry, S.**, Davies, B. F. R., Rosa, P., Gernez, P., Tovar-Sánchez, A., Navarro, G., Méléder, V., & Barillé, L. (2024). Mapping intertidal microphytobenthic biomass with very high-resolution remote sensing imagery in an estuarine system. *Science of The Total Environment*, 955, 177025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177025>
- Davies, B. F. R., **Oiry, S.**, Rosa, P., Zoffoli, M. L., Sousa, A. I., Thomas, O. R., Smale, D. A., Austen, M. C., Biermann, L., Attrill, M. J., Roman, A., Navarro, G., Barillé, A.-L., Harin, N., Clewley, D., Martinez-Vicente, V., Gernez, P., & Barillé, L. (2024). Intertidal seagrass extent from Sentinel-2 time-series show distinct trajectories in Western Europe. *Remote Sensing of Environment*, 312, 114340. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114340>
- Davies, B. F. R., **Oiry, S.**, Rosa, P., Zoffoli, M. L., Sousa, A. I., Thomas, O. R., Smale, D. A., Austen, M. C., Biermann, L., Attrill, M. J., & others. (2024). A sentinel watching over inter-tidal seagrass phenology across Western

- Europe and North Africa. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 382. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-382>
- Nurdin, N., Alevizos, E., Syamsuddin, R., Asis, H., Zainuddin, E. N., Aris, A., **Oiry, S.**, Brunier, G., Komatsu, T., & Barillé, L. (2023). Precision Aquaculture Drone Mapping of the Spatial Distribution of *Kappaphycus alvarezii* Biomass and Carrageenan. *Remote Sensing*, 15(14), 3674. <https://doi.org/10.3390/rs15143674>
 - Román, A., Prasyad, H., **Oiry, S.**, Davies, B. F. R., Brunier, G., & Barillé, L. (2023). Mapping intertidal oyster farms using unmanned aerial vehicles (UAV) high-resolution multispectral data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 291, 108432. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108432>
 - Davies, B. F. R., Gernez, P., Geraud, A., **Oiry, S.**, Rosa, P., Zoffoli, M. L., & Barillé, L. (2023). Multi- and hyperspectral classification of soft-bottom intertidal vegetation using a spectral library for coastal biodiversity remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 290, 113554. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113554>
 - Zoffoli, M.L., Gernez, P., **Oiry, S.**, Godet, L., Dalloyau, S., Davies, B.F.R. and Barillé, L. (2023), Remote sensing in seagrass ecology: coupled dynamics between migratory herbivorous birds and intertidal meadows observed by satellite during four decades. *Remote Sens Ecol Conserv*, 9: 420-433. <https://doi.org/10.1002/rse2.319>
 - Brunier, G., **Oiry, S.**, Lachaussée, N., Barillé, L., Le Fouest, V., & Méléder, V. (2022). A Machine-Learning Approach to Intertidal Mudflat Mapping Combining Multispectral Reflectance and Geomorphology from UAV-Based Monitoring. *Remote Sensing*, 14(22), 5857. <https://doi.org/10.3390/rs14225857>
 - Brunier, G., **Oiry, S.**, Gruet, Y., Dubois, S. F., & Barillé, L. (2022). Topographic Analysis of Intertidal Polychaete Reefs (*Sabellaria alveolata*) at a Very High Spatial Resolution. *Remote Sensing*, 14(2), 307. <https://doi.org/10.3390/rs14020307>

Presentations to International Conferences

- Effect of Marine and Atmospheric Heatwaves on Reflectance and Pigment Composition of Intertidal *Zostera noltei* (February 2025); BioSpace25 - Biodiversity insight from Space, Frascati, Italy; Oral presentation
- Discriminating Seagrasses From Green Macroalgae in European Intertidal Areas using High Resolution Multispectral Drone Imagery (17 - 21 June 2024); Word Seagrass Conference, Napoli, Italy; Poster
- Remote Sensing discrimination of seagrass and green macroalgae: hyperspectral library and drone-mounted multispectral camera (22 - 24 November 2023); EC-ESA Joint Earth System Science Initiative, Frascati, Italy; Poster
- Precision aquaculture drone mapping of the spatial distribution of *Kappaphycus alvarezii* biomass and carrageenan (20 - 26 August 2023); 8th European Phycological Congress, Brest, France ; Oral presentation

- Remote Sensing discrimination of seagrass and green macroalgae: hyperspectral library and drone-mounted multispectral camera (20 - 26 August 2023); 8th European Phycological Congress, Brest, France ; Poster
- Topographic analysis of intertidal polychaete reefs (*Sabellaria alveolata*) using very high resolution UAV remote sensing (23 - 27 may 2022); Living Planet Symposium, Bonn, Germany ; Poster

Project related to the thesis.

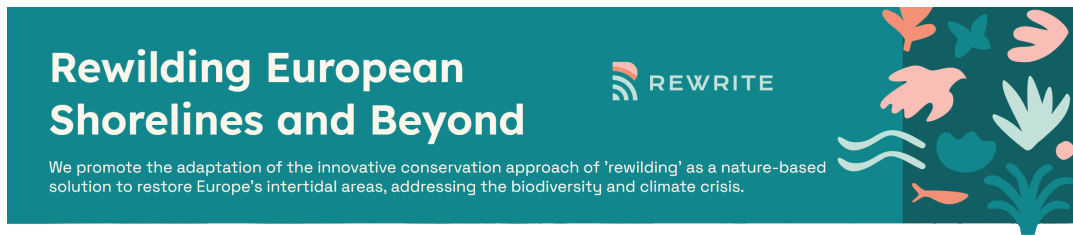
BiCOME



This thesis has been closely related to the european, ESA funded, project BiCOME. This project, led by the Plymouth Marine Laboratory (PML) in collaboration with the University of Nantes, the German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) and HYGEOS has started in october 2021 and has ended before the end of this thesis, in october 2023. It aimed to demonstrate that Essential Biodiversity Variables (EBVs), relevant for scientific and monitoring applications, can be obtained from state-of-the-art remotely sensed reflectance close to the shoreline, and that they can be scalable globally.



Rewrite



Part of the thesis is related to the REWRITE project, led by Nantes University and funded by the European Union. This project involves 24 partners across 14 countries and focuses on 10 demonstration sites. Its aim is to promote the adaptation of the innovative conservation approach known as ‘rewilding’ as a nature-based solution for restoring Europe’s intertidal areas.



Funded by
the European Union

InvaSea

Part of the thesis is related to the InvaSea project, founded by the French National Centre for Space Studies (CNES). It aims to prove the capacity of remote sensing to map the presence of the alien invasive species *Gracilaria vermiculophylla* in french and spanish estuaries.



Titre : Caractérisation de la Végétation Intertidale sur les Côtes Européennes à l'Aide de la Télédétection Multi-Échelle en Réponse aux Pressions Naturelles et Anthropiques

Mots Clés: Télédétection, Drones, Intertidale, Végétation, Multispectral

Résumé: La végétation intertidale joue un rôle clé dans les écosystèmes côtiers en stabilisant les sédiments, en abritant la biodiversité et en contribuant au cycle du carbone. Ce travail examine comment les approches de télédétection multi-échelles peuvent relever les défis de la surveillance et de la gestion de ces écosystèmes soumis à des pressions naturelles et anthropiques. En combinant des données issues de drones et de satellites, cette étude démontre l'efficacité de la télédétection multispectrale et hyperspectrale pour distinguer les zostères et les macroalgues dans les zones intertidales européennes. Les techniques d'apprentissage automatique sont mises en avant pour leur capacité à améliorer la précision des classifications et à relier les schémas de végétation aux gradients environnementaux, tels que l'altitude des marées et la

stabilité des sédiments. Des expériences en laboratoire et des données de terrain soulignent l'impact des vagues de chaleur sur la santé de la végétation, fournissant des informations sur les réponses spectrales associées au stress et des indicateurs potentiels pour une détection précoce. Des analyses historiques révèlent également comment les activités humaines, telles que l'aquaculture, influencent la répartition de la végétation et la dynamique des écosystèmes au fil du temps. Cette approche intégrée souligne le potentiel de la télédétection pour capturer les schémas spatiaux et temporels de la biodiversité intertidale. Les résultats ont des implications majeures pour le suivi de la résilience des habitats, l'orientation des efforts de conservation et l'élaboration de politiques visant à atténuer les impacts du changement climatique et des activités humaines sur les environnements côtiers.

Title : Characterization of Intertidal Vegetation on European Coasts Using Multi-Scale Remote Sensing in Response to Natural and Anthropogenic Pressures

Keywords : Remote Sensing, Drones, Intertidal, Vegetation, Multispectral

Abstract : Intertidal vegetation plays a key role in coastal ecosystems by stabilizing sediments, hosting biodiversity, and contributing to carbon cycling. This work examines how multi-scale remote sensing approaches can address challenges in monitoring and managing these ecosystems under natural and anthropogenic pressures. Combining drone and satellite data, this study demonstrates the effectiveness of multispectral and hyperspectral remote sensing in distinguishing seagrasses, macroalgae, across European intertidal zones. Machine learning techniques are highlighted for their ability to enhance classification accuracy and link vegetation patterns to environmental gradients, such as

tidal elevation and sediment stability. Laboratory experiments and field data emphasize the impact of heatwaves on vegetation health, providing insights into the spectral responses associated with stress and potential metrics for early detection. Historical analyses further reveal how human activities, such as aquaculture, influence vegetation distribution and ecosystem dynamics over time. This integrated approach underscores the potential of remote sensing for capturing spatial and temporal patterns in intertidal biodiversity. The findings have broad implications for monitoring habitat resilience, guiding conservation efforts, and informing policies aimed at mitigating the impacts of climate change and human activities on coastal environments.