
Cartographie des fonds marins au Domaine du Rayol

Travail réalisé par :
CARPENTIER Lucas, CHERIF Enzo, GUIVARCH Ewen
Étudiants à Seatech en Promo 2025
2A, filière SYSMER

Supervisé par :
M. Audrey MINGHELLI, Professeure des universités, SEATECH

Projet de deuxième année

Avril 2024



Remerciements

Au terme de ce projet passionnant de cartographie marine au Domaine du Rayol, nous désirons exprimer notre gratitude profonde à l'ensemble des acteurs qui ont contribué à sa réalisation et à son succès.

Un remerciement particulier est rendu à notre encadrante, Mme Audrey Minghelli, dont le soutien, les conseils éclairés et l'accompagnement continu ont été des atouts inestimables durant ce parcours. Sa passion pour la recherche et son engagement pour l'excellence académique ont nourri notre inspiration et consolidé notre travail à chaque phase du projet. Grâce à son expertise et à sa méthodologie, nous avons pu aborder les défis techniques et théoriques avec assurance et persévérance.

Nous tenons également à remercier chaleureusement le Domaine du Rayol pour leur accueil et leur collaboration. La rencontre du 8 avril 2024 restera gravée comme un jalon mémorable de notre projet, marquant une occasion de présenter nos recherches et d'approfondir notre compréhension du domaine lors d'un échange enrichissant.

Nos remerciements s'étendent aux équipes du Centre National d'Études Spatiales (CNES) et de Airbus, qui ont mis à notre disposition des images satellites de haute qualité, essentielles pour la précision et la profondeur de notre analyse.

Un merci sincère également à nos camarades de la filière SYSMER (Mécatronique et Robotique) ainsi qu'à l'ensemble du corps enseignant pour leur soutien, leurs encouragements et leurs conseils avisés durant toute la durée de ce projet. Leur intérêt et leur curiosité pour notre travail ont constamment stimulé notre motivation.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à nos familles et amis pour leur soutien constant, leur patience et leur compréhension tout au long de cette aventure. Leur encouragement a été un pilier de notre persévérance et de notre réussite.

Ce projet a constitué une véritable aventure collective, riche en apprentissages, partages et découvertes. Chaque contribution a été précieuse et a joué un rôle déterminant dans la réussite de nos objectifs. Nous sommes fiers de nos accomplissements et reconnaissants envers tous ceux qui ont participé à cette expérience exceptionnelle.

Abstract

In this project, we demonstrate how we mapped *Posidonia* seagrass in the ocean at the Domaine du Rayol site using satellite imagery. We begin by defining the importance of *Posidonia* for marine seabeds and particularly its role in combating climate change, given its capacity as a carbon dioxide absorber. We also introduce the Domaine du Rayol and its commitment to the preservation of marine seabeds and its efforts to raise awareness among both the young and old about nature conservation.

Our approach starts with obtaining Pléiades satellite images of the marine area around the Domaine du Rayol. It is essential to select images that completely cover the area of the town of Rayol-Canadel-sur-Mer, with good resolution and no cloud cover. Next, we retrieve all the bathymetric surveys for the Rayol Canadel area from Litto3D, thanks to data from SHOM and IGN.

Once these data are collected, we create an assembly of tiles that we obtained from Litto3D for bathymetry. This assembly, meticulously carried out on QGIS through georeferencing, gives us a coherent and detailed representation of the seabed. After merging and adjusting these bathymetric data in QGIS, we analyze the bathymetry of the area.

We apply logarithmic coloring for a better representation of the bathymetry and filter out all data above zero. We then overlay the satellite image with the bathymetric data to create depth lines at 2m, 4m, 7m, and 10m. Once the lines are obtained, we create Regions of Interest (ROI) for these, only in a sandy area. This step is fundamental for the rest of the project, otherwise, all our applied corrections would be useless.

After creating these four zones, we define one last ROI offshore in a sandy area for differentiation. Then, using our algorithm, we adjust the bathymetry according to the correct projection, the green and blue bands, and the mask. We also correct the water attenuation because the color of marine habitats changes, thus, we need to correct this to obtain an image where the depth and water would have been "removed".

Once this image is obtained, we create crucial interest regions to classify only one type of habitat at a time, including rocks, different types of sand, *Posidonia*, and marine meadows. For this, we need to calculate the average value of each sample for each spectral band to be able to differentiate the elements on the image. Then, using the Euclidean distance formula, we associate each pixel of the image with its closest class in terms of distance.

These statistics will also help us identify areas most affected by human activities or the most preserved areas, providing a solid basis for targeted interventions such as habitat restoration or strengthening protective measures. Moreover, by comparing this data over time, we will be able to monitor the health trends of marine ecosystems and measure the effectiveness of various conservation strategies implemented.

In conclusion, this project is not limited to producing a detailed map of the marine seabeds of the Domaine du Rayol; it also establishes a methodology for ongoing environmental monitoring and sustainable development of marine resources. It is envisioned that the results of this project will serve as a model for other similar initiatives, extending the impact of our work well beyond the studied domain's borders, thus significantly contributing to the preservation of marine biodiversity on a larger scale.

Resumé

Dans ce projet, nous montrons comment nous avons cartographié la posidonie dans l'océan sur le site du domaine de Rayol via imagerie satellite. Nous commençons par définir l'importance de la posidonie pour les fonds marins et surtout son rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique, étant donné qu'elle est un absorbeur de dioxyde de carbone. Nous présentons également le domaine de Rayol et son engagement pour la préservation des fonds marins et sa contribution à la sensibilisation des jeunes et des moins jeunes à la préservation de la nature.

Notre démarche commence par l'obtention d'images satellites Pléiades dans la zone marine du domaine de Rayol. Il faut choisir des images qui couvrent entièrement la zone de la ville de Rayol-Canadel-sur-Mer, avec une bonne résolution et sans couverture nuageuse. Ensuite, nous récupérons sur Litto3D, grâce aux données du SHOM et de l'IGN, tous les relevés bathymétriques de la zone de Rayol Canadel.

Une fois ces données récupérées, nous créons un assemblage de tuiles que nous avons obtenues sur Litto3D pour la bathymétrie. Cet assemblage, réalisé minutieusement sur QGIS grâce au géoréférencement, nous donne une représentation cohérente et détaillée du fond marin. Après avoir fusionné et ajusté ces données bathymétriques dans QGIS, nous analysons la bathymétrie de la zone.

Nous appliquons une coloration logarithmique pour une meilleure représentation de la bathymétrie et filtrons toutes les données supérieures à zéro. Ensuite, nous superposons l'image satellite avec les données issues de la bathymétrie pour créer des lignes de profondeur de 2m, 4m, 7m, 10m. Une fois les lignes obtenues, nous créons des régions d'intérêt (ROI) pour celles-ci, uniquement dans une zone de sable. Cette étape est fondamentale pour la suite du projet, sinon, toutes nos corrections appliquées seraient inutiles.

Après avoir créé ces quatre zones, nous définissons une dernière ROI au large dans une zone de sable pour la différenciation. Ensuite, à l'aide de notre algorithme, nous corrigeons la bathymétrie en fonction de la bonne projection, des bandes vertes et bleues, et du masque. Nous corrigeons aussi l'atténuation de l'eau, car la couleur des habitats marins change ; il faut donc corriger cela afin d'obtenir une image sur laquelle la profondeur et l'eau auraient été « enlevées ».

Une fois cette image obtenue, nous réalisons des régions d'intérêt crucial pour classer un seul type d'habitat à chaque fois, notamment les rochers, les différents types de sable, la posidonie et les herbiers marins. Pour cela, il faut calculer la valeur moyenne de chaque échantillon sur chaque bande spectrale pour pouvoir différencier les éléments sur l'image. Puis, avec la formule de la distance euclidienne, nous associons chaque pixel de l'image à sa classe la plus proche en termes de distance.

Ces statistiques nous aideront également à identifier les zones les plus affectées par les activités humaines ou les zones les plus préservées, fournissant une base solide pour des interventions ciblées telles que la restauration des habitats dégradés ou le renforcement des mesures de protection. De plus, en comparant ces données au fil du temps, nous pourrions surveiller les tendances de la santé des écosystèmes marins et mesurer l'efficacité des différentes stratégies de conservation mises en œuvre. Cette cartographie permettra également d'entreprendre des actions de conservation des fonds marins. Nous verrons comment nos cartes pourront aider dans différents domaines comme l'intégration avec les applications nautiques, sensibilisation et éducation, politiques et réglementations.

En conclusion, le projet ne se limite pas seulement à la production d'une carte détaillée des fonds marins du Domaine du Rayol ; il établit également une méthodologie pour la surveillance environnementale continue et le développement durable des ressources marines. Il est envisagé que les résultats de ce projet servent de modèle pour d'autres initiatives similaires, étendant l'impact de notre travail bien au-delà des frontières du domaine étudié, et contribuant ainsi de manière significative à la préservation de la biodiversité marine à une échelle plus large.

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Contexte et Importance du Domaine du Rayol	5
1.2	L'importance de la Posidonie	5
1.3	Objectifs du Projet	6
2	Notre Équipe	6
3	Le Domaine du Rayol : Un Engagement pour la Nature	7
3.1	Histoire du domaine	7
3.2	Présentation du domaine	8
3.3	Education et Sensibilisation	9
4	Méthodologie	10
4.1	Acquisition et Préparation des Données	10
4.1.1	Imagerie Satellite Pléiades	10
4.1.2	Données Bathymétriques de Litto3D	12
4.2	Traitement et Analyse des Données	13
4.2.1	Traitement des Données avec QGIS	13
4.2.2	Analyse Bathymétrique dans ENVI	14
4.3	Définition et Sélection des Régions d'Intérêt (ROI)	16
4.4	Calcul et Correction de la Bathymétrie	17
4.4.1	Calcul de la Bathymétrie	17
4.4.2	Correction de l'Atténuation de l'Eau	18
4.5	Analyse Finale et Classification	18
4.5.1	Sélection Finale des ROI	18
4.5.2	Réalisation de la Classification	19
5	Résultats	19
5.1	Distribution de la Posidonie au Domaine du Rayol	19
5.2	Statistiques sur la classification	21
6	Discussion	22
6.1	Analyse des Résultats	22
6.2	Défis Rencontrés et Solutions Apportées	23
6.3	Contribution du Projet à la Conservation Marine	23
7	Conclusion et Perspectives	25
7.1	Résumé des Contributions Clés	25
7.2	Suggestions pour les Recherches ou Actions de Conservation Futures	25
A	Script IDL pour la correction de l'image	26
B	Données Brutes et Traitées	30

1 Introduction

1.1 Contexte et Importance du Domaine du Rayol

Niché au cœur de la Côte d'Azur, le Domaine du Rayol [1], aussi célèbre sous l'appellation Jardin des Méditerranées, se dresse comme un sanctuaire de la diversité biologique face à la mer Méditerranée. Ce joyau de la nature, sous l'égide du Conservatoire du littoral [2] depuis 1989, incarne l'excellence en matière de conservation de la biodiversité et d'éducation à l'environnement. Couvrant une superficie d'environ 20 hectares, il déploie un spectacle naturel saisissant, représentatif des milieux méditerranéens et subtropicaux, et se présente comme un terrain de recherche et d'exploration de premier ordre.

Le Domaine du Rayol va bien au-delà d'une simple merveille naturelle ; il constitue un véritable laboratoire en plein air, fusionnant la préservation de l'environnement et la sensibilisation à la problématique écologique contemporaine. Conçu comme un prisme à travers lequel observer la flore de zones au climat similaire, il permet aux visiteurs et aux scientifiques d'appréhender les interactions subtiles au sein des écosystèmes méditerranéens, cruciaux pour le bien-être écologique global.

Le rôle du domaine s'étend à la protection des écosystèmes marins, notamment les précieux herbiers de Posidonie, essentiels au stockage de carbone et pour le maintien de l'écosystème des fonds marins. L'objectif de ce projet est d'étudier la distribution de ces habitats vitaux, fondamentaux à la richesse de la vie marine et à la lutte contre le changement climatique et la sauvegarde de la biodiversité.

L'implication du Domaine du Rayol dans la préservation de la diversité biologique et la promotion d'un développement soutenable témoigne de son engagement envers une conservation environnementale intégrale. Ce projet de cartographie s'inscrit dans cette vision, visant à enrichir notre connaissance et protection de ces écosystèmes distinctifs. Par cette démarche, nous aspirons à sauvegarder l'héritage naturel exceptionnel du domaine et à encourager l'émergence de projets analogues le long des rivages méditerranéens et au-delà.

1.2 L'importance de la Posidonie

La posidonie, ou "*Posidonia oceanica*" (voir Figure 1), est une plante marine propre à la Méditerranée et joue un rôle essentiel pour l'environnement marin ainsi que pour les sociétés humaines. Sa préservation est cruciale, en raison de ses contributions majeures à la biodiversité, à la lutte contre le changement climatique, et à la protection des côtes.



FIGURE 1 – Posidonie sous l'eau

Formant des habitats complexes, les herbiers de posidonie abritent une grande variété d'espèces et fonctionnent comme des nurseries pour de nombreux poissons et invertébrés, y compris des espèces importantes pour la pêche. On estime que ces herbiers soutiennent environ un quart de la biodiversité méditerranéenne et sont vitaux pour la survie de nombreuses espèces menacées, telles que certaines tortues marines et poissons. [3]

Les prairies de posidonie se distinguent également comme d'importants puits de carbone, capturant le carbone à un taux bien supérieur à celui des forêts terrestres—jusqu'à quinze fois plus par hectare. Ils peuvent

séquestrer jusqu'à 83 000 tonnes de carbone par kilomètre carré [4] dans leurs racines et le sol, contribuant significativement à la mitigation des effets du changement climatique.

En stabilisant les fonds marins et en réduisant l'érosion, les herbiers jouent un rôle crucial dans la protection des littoraux. Le réseau de racines et de rhizomes de la posidonie maintient le sable et les sédiments, atténuant ainsi l'impact des vagues et protégeant les plages, notamment dans des régions vulnérables comme la Côte d'Azur.[5]

En France et dans toute la Méditerranée, la posidonie fait face à des menaces telles que la pollution, l'urbanisation des côtes, les activités nautiques et le changement climatique. Le gouvernement français et diverses ONG intensifient leurs efforts pour protéger ces herbiers, notamment par la création de zones marines protégées où la navigation et l'ancrage sont strictement régulés. [6]

La préservation des herbiers de posidonie est donc indispensable non seulement pour maintenir la biodiversité marine mais aussi pour lutter contre le réchauffement climatique et protéger nos côtes. Ces efforts sont des étapes essentielles pour sauvegarder ces écosystèmes précieux, qui sont vitaux tant pour la Méditerranée que pour la santé globale de notre planète.

1.3 Objectifs du Projet

Ce projet est dédié à la réalisation d'une cartographie exhaustive des zones sous-marines du Domaine du Rayol, en mettant un accent particulier sur la posidonie. Cette plante marine, protégée et pilier de la diversité biologique régionale, est au centre de nos efforts de cartographie en raison de son importance cruciale pour le maintien des écosystèmes côtiers méditerranéens. Son rôle est primordial dans la préservation de la qualité de l'eau, la lutte contre l'érosion, et comme refuge pour une multitude d'espèces marines. À l'aide des données satellites haute résolution fournies par Pléiades, le projet se fixe les objectifs suivants :

1. **Estimation Bathymétrique** : Élaborer et mettre en œuvre une technique précise pour évaluer la bathymétrie de la zone littorale de Rayol Canadel. Cette première étape est fondamentale pour décrypter la topographie des fonds marins et repérer les habitats potentiels de la posidonie dans les eaux peu profondes, de 0 à 30 mètres.
2. **Compensation de l'Atténuation Aquatique** : Appliquer une procédure correctrice de l'atténuation lumineuse due à l'eau pour renforcer la fidélité des images satellites sous-marines. Cette amélioration est vitale pour obtenir des représentations précises et exploitables du relief sous-marin, facilitant ainsi une classification plus rigoureuse.
3. **Cartographie Précise de la Posidonie via Classification Supervisée** : Adopter une démarche de classification supervisée pour détecter et cartographier avec exactitude les zones habitées par la posidonie, en se basant sur les images satellites traitées. Cette technique permettra de différencier la posidonie d'autres substrats et végétations aquatiques.
4. **Conception de Programmes Analytiques** : Concevoir des programmes d'analyse de données performants, opérationnels sous Matlab ou Python. Ces instruments seront indispensables pour le traitement des données satellites, l'évaluation bathymétrique, la correction de l'atténuation lumineuse et la réalisation de la classification supervisée.
5. **Apports Scientifiques et Pédagogiques** : Apporter une contribution notable à la connaissance scientifique sur la répartition de la posidonie au sein du Domaine du Rayol Canadel et promouvoir la sensibilisation à sa conservation. Le projet ambitionne aussi d'enrichir les supports pédagogiques destinés au grand public et à la communauté scientifique sur les thématiques de conservation marine.

Le projet s'appuie sur l'accès aux images Pléiades via l'EO Browser et le portail Copernicus, ainsi que l'utilisation des équipements informatiques(logiciel ENVI). Sous la direction de notre encadrante Mme Audrey Minghelli, l'initiative vise à cartographier un écosystème marin d'une grande valeur tout en forgeant des outils et méthodologies réutilisables pour le suivi environnemental et la gestion des aires marines protégées.

2 Notre Équipe

Nous formons un trio d'étudiants en ingénierie à SEATECH, spécialisés dans la filière SYSMER, englobant la mécanique et la robotique. Notre institution fait partie du prestigieux réseau de l'Institut National Polytechnique, réputé pour son approche éducative centrée sur les sciences marines, intégrant des technologies avancées et des principes de développement durable dans ses programmes.



FIGURE 2 – De gauche à droite : Lucas CARPENTIER, Enzo CHERIF, et Ewen GUIVARCH devant l'école SEATECH Toulon.

Nous, Enzo CHERIF, Lucas CARPENTIER, et Ewen GUIVARCH (voir Figure 2), avons une passion initiale pour les technologies, mais ce projet de cartographie de la posidonie nous a ouvert à un nouveau domaine passionnant : l'environnement marin. Cette immersion a été une révélation pour chacun de nous, enrichissant considérablement notre parcours académique et personnel. Notre visite au Domaine du Rayol a été particulièrement instructive, nous permettant de constater les impacts potentiels de notre travail. Cette expérience nous a non seulement donné l'occasion d'appliquer nos compétences techniques en traitement d'images et en géoréférencement, mais a également approfondi notre compréhension des enjeux écologiques contemporains.

Ce projet collaboratif a renforcé nos aptitudes en résolution de problèmes, en gestion de projets et en communication technique. Nous sommes extrêmement fiers de notre contribution à la cartographie des écosystèmes marins et espérons que notre travail incitera d'autres à participer à la conservation marine. Plus qu'un simple jalon académique, ce projet a éveillé en nous un nouvel intérêt pour les défis environnementaux, ouvrant la voie à un engagement futur dans ce domaine vital.

3 Le Domaine du Rayol : Un Engagement pour la Nature

3.1 Histoire du domaine

Dès 1910, Alfred Théodore Courmes, un homme d'affaires parisien séduit par le charme de la côte, acquiert un terrain pour y ériger sa résidence secondaire (voir Figure 3). Il fait construire la demeure principale sur une colline surplombant la baie de Figuiers, entourée d'un jardin luxuriant peuplé de palmiers, dattiers, eucalyptus, agaves, et mimosas. Non loin, un potager et un verger prennent place sur les pentes de la colline, complétant ce tableau pastoral par une petite ferme pittoresque.



FIGURE 3 – Photographie historique du Domaine du Rayol

La donne change en 1925 quand les Courmes cèdent leur maison, transformée en l'Hôtel de la Mer, dans le cadre du développement d'une station balnéaire à Rayol. Ils se retirent alors dans la villa « Le Rayolet », située à l'extrémité de la propriété.

L'avènement de la Seconde Guerre mondiale représente un point de bascule pour le domaine. En janvier 1940, Madame Courmes vend la propriété à Henri Potez, un renommé constructeur aéronautique. Durant le conflit, Potez et sa famille trouvent refuge au Rayol, où les bâtiments sont rénovés et un somptueux jardin est maintenu. Toutefois, après la guerre, le domaine se mue en simple résidence estivale et, vers la fin des années soixante, est progressivement abandonné faute d'entretien jardinier.

L'année 1989 marque une étape cruciale avec l'achat du Domaine du Rayol par le Conservatoire du littoral, un organisme public créé en 1975. Le projet vise à protéger les dernières étendues sauvages de la corniche des Maures et à les rendre accessibles au public, tout en préservant la diversité biologique, esthétique et culturelle de la côte. Le Conservatoire charge alors le paysagiste Gilles Clément [7] de réimaginer les jardins du domaine, évoquant les flores des régions du monde de climat méditerranéen.

Aujourd'hui, le Domaine du Rayol est transformé en un jardin remarquable qui reflète les ambiances végétales de diverses régions méditerranéennes du monde, telles que le bassin méditerranéen, le sud-est californien, le Chili central, la région du Cap en Afrique du Sud, et l'Australie méridionale. Ce renouveau illustre l'engagement du Conservatoire du littoral à adapter le littoral aux évolutions climatiques et aux menaces naturelles, favorisant autant que possible le libre jeu de la nature.

3.2 Présentation du domaine

S'étendant sur 20 hectares, ce site est dédié à la préservation et à l'éducation environnementale, reflétant une gestion exemplaire des espaces naturels (voir Figure 4).



FIGURE 4 – Photo du Domaine de Rayol

Gilles Clément, le paysagiste renommé qui a conçu le domaine, a méticuleusement aménagé cette vaste superficie pour évoquer les diverses ambiances végétales caractéristiques des régions méditerranéennes à travers le monde. Cette initiative crée un lien visuel et écologique puissant entre les plantes et leur milieu naturel, enrichissant ainsi l'expérience des visiteurs.

Au-delà de son design impressionnant, le Domaine du Rayol abrite une collection de plus de 2 000 espèces de plantes, dont beaucoup sont endémiques à leurs écosystèmes d'origine. Cette diversité illustre l'engagement du domaine envers la conservation de la flore rare et menacée, contribuant significativement à la biodiversité régionale et mondiale.

Chaque année, environ 65 000 visiteurs sont attirés par le domaine, non seulement pour admirer ses paysages uniques mais aussi pour participer à des programmes éducatifs qui promeuvent la sensibilisation à la biodiversité et à la conservation environnementale. Ces initiatives éducatives sont essentielles pour accroître la conscience écologique et encourager la préservation active de notre environnement naturel.

La gestion du Domaine du Rayol est assurée par le Conservatoire du littoral, qui veille à la protection des espaces côtiers français. Le domaine bénéficie également du soutien de diverses organisations écologiques, nationales et internationales, qui reconnaissent et renforcent ses efforts de conservation.

Sur le plan des ressources humaines, le domaine emploie une équipe dévouée d'environ dix personnes à temps plein. Cette équipe est épaulée par des volontaires et des stagiaires qui participent activement à la maintenance des jardins, à l'organisation des visites guidées, et à l'exécution des programmes éducatifs. Cette dynamique collaborative assure le maintien des standards élevés de gestion et d'éducation que le domaine s'est fixé.

En outre, le Domaine du Rayol sert de refuge à une multitude d'espèces fauniques, notamment certaines qui sont spécifiques à la région méditerranéenne. La protection de ces espèces endémiques est au cœur des efforts continus du domaine pour préserver l'intégrité écologique de la région.

En conclusion, le Domaine du Rayol est un exemple éminent de gestion durable et de conservation proactive des espaces naturels. Grâce à l'expertise de Gilles Clément et au soutien du Conservatoire du littoral, le domaine continue de jouer un rôle crucial dans la préservation du patrimoine naturel et culturel, fournissant un espace vital pour l'éducation et la sensibilisation à l'environnement.

3.3 Education et Sensibilisation

Le Domaine du Rayol est conçu pour allier la préservation de la biodiversité à une vocation pédagogique, contribuant activement à la formation environnementale de ses visiteurs. Engagé dans une multitude d'initiatives éducatives, il vise à sensibiliser le public aux enjeux cruciaux de la conservation environnementale. À travers des ateliers thématiques et des activités interactives, ces programmes éducatifs enrichissent la compréhension des visiteurs, jeunes et adultes, sur les principes de durabilité et les meilleures pratiques en matière de conservation.

Au cœur de ce cadre pédagogique, la Bibliothèque Jean Olivaux, nommée d'après un éminent passionné de botanique et de la Méditerranée, offre un accès à une riche collection de plus de 2000 ouvrages spécialisés. Ces

ressources couvrent des domaines variés tels que la botanique, l'écologie et la gestion durable des écosystèmes, soutenant ainsi les programmes éducatifs du domaine et facilitant les recherches approfondies pour tous les publics.

Le domaine organise aussi régulièrement des visites guidées, telles que "Les Jardins du Monde Tour", où des experts comme Sophie Martin, botaniste renommée, partagent leurs connaissances sur les biomes méditerranéens. Ces visites offrent une exploration détaillée des méthodes par lesquelles ces écosystèmes sont intégrés et préservés, enrichissant l'expérience éducative des visiteurs.

De plus, les écoles sont fréquemment invitées au Domaine du Rayol, permettant aux étudiants de tous les âges de bénéficier de programmes éducatifs sur mesure. Le projet "Éco-Écoliers", par exemple, engage les élèves de l'École Primaire de Rayol-Canadel-sur-Mer "Lou Calen" dans des ateliers qui abordent la biodiversité et les pratiques environnementales durables, supervisés par des éducateurs spécialisés du domaine.

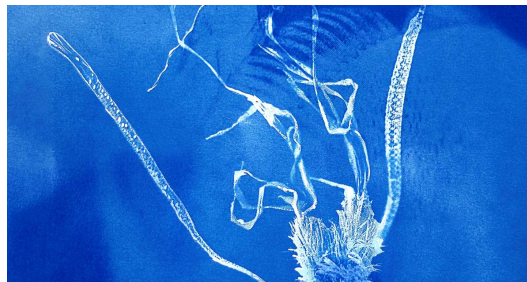


FIGURE 5 – Oeuvre de l'exposition Posidonia d'Aurélié Trabaud

Au-delà de son rôle éducatif, le Domaine du Rayol accueille également des expositions d'art, telles que l'exposition « Posidonia » (voir Figure 5) qui s'est déroulée du 2 décembre 2023 au 17 mars 2024. Ces œuvres, centrées sur des thèmes environnementaux, comme celles d'Aurélié Trabaud, permettent une exploration artistique et pédagogique de la posidonie, plante sous-marine essentielle du bassin méditerranéen. À travers des peintures, des cartographies, des aquarelles et des cyanotypes, cette exposition illustre le rôle écologique vital de la posidonie en tant qu'habitat naturel pour de nombreuses espèces. Les visiteurs peuvent découvrir des œuvres qui mettent en lumière la biodiversité des herbiers de posidonies, leur impact sur la stabilisation des côtes, et les transformations écologiques des sites comme les îles du Gaou. Cette exposition combine art et éducation pour enrichir la sensibilisation à l'importance de ces écosystèmes sous-marins.

En conclusion, le Domaine du Rayol est non seulement un sanctuaire pour la biodiversité mais également une plateforme active pour l'éducation environnementale. Grâce à ses ressources éducatives, ses visites guidées, et ses initiatives culturelles, le domaine joue un rôle essentiel dans l'enrichissement de la compréhension publique des enjeux écologiques, inspirant ainsi les générations actuelles et futures à s'engager pour la préservation de notre patrimoine naturel.

4 Méthodologie

4.1 Acquisition et Préparation des Données

4.1.1 Imagerie Satellite Pléiades

Tout d'abord, les satellites Pléiades 1A et 1B (voir Figure 6) sont des systèmes d'imagerie de la Terre à très haute résolution qui ont été lancés respectivement le 17 décembre 2011 et le 2 décembre 2012. Ils sont utilisés tant au niveau civil que militaire, incluant la cartographie, l'agriculture, la surveillance des forêts et la gestion des ressources hydriques.

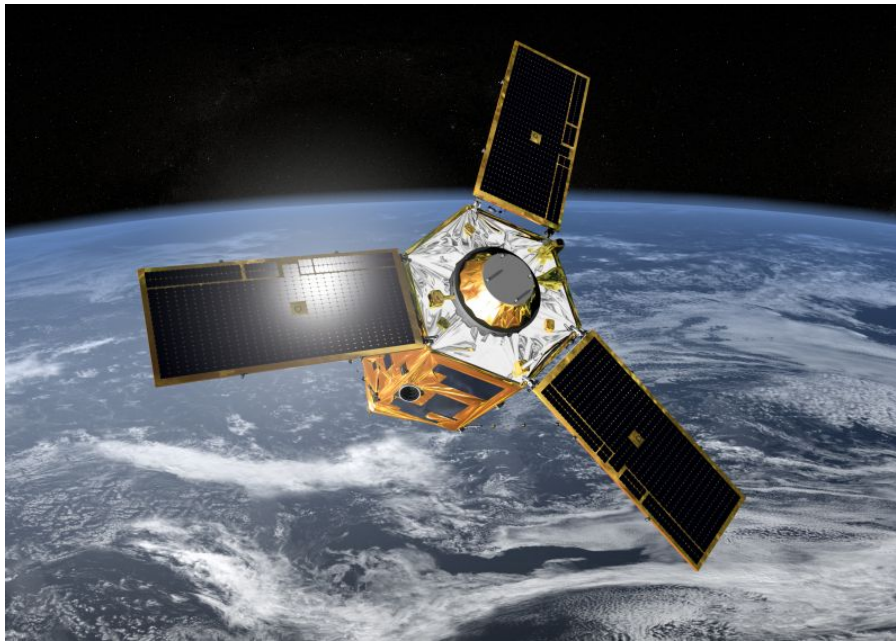


FIGURE 6 – Photographie du satellite Pléiades en orbite

Ces satellites opèrent depuis une orbite héliosynchrone à 694 km d'altitude, avec un cycle de répétition de 26 jours, ce qui permet une couverture complète de la Terre. Chaque satellite peut acquérir jusqu'à 500 images par jour avec une résolution au sol pouvant atteindre 50 cm. Ils ont une durée de vie prévue d'au moins 15 ans.

Le système d'imagerie des Pléiades utilise un télescope de type Korsch avec un miroir principal de 65 cm. Les images sont capturées à la fois en panchromatique avec une résolution de 70 cm et en multispectral avec une résolution de 2 mètres.

Nous nous intéresserons principalement à ses quatre bandes spectrales pour l'imagerie multispectrale :

- Bande bleue (430-550 nm)
- Bande verte (490-610 nm)
- Bande rouge (600-720 nm)
- Bande proche infrarouge (750-950 nm)

En plus de ces bandes spectrales, ils peuvent aussi capturer des images en panchromatique, qui couvre une bande plus large du spectre visible et proche-infrarouge.

Pour obtenir les images des satellites Pléiades, nous avons dû nous adresser, au site DINAMIS (Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellitaire) géré par AIRBUS [8] et le CNES [9]. Une fois que nos comptes ont enfin été ouverts, nous avons concentré notre attention sur la zone du domaine de Rayol, en traçant un rectangle sur les zones marine et terrestre (voir Figure 7). Ensuite, nous avons pu visualiser les images satellites prises sur cette zone au cours des 12 dernières années (depuis le lancement des satellites en 2012). Parmi ces images disponibles, aucune ne répondait entièrement à notre demande. En effet, plusieurs images ne couvraient que certaines parties du rectangle que nous avons tracé, d'autres avaient une couverture nuageuse non négligeable, et certaines étaient de qualité inférieure à d'autres.

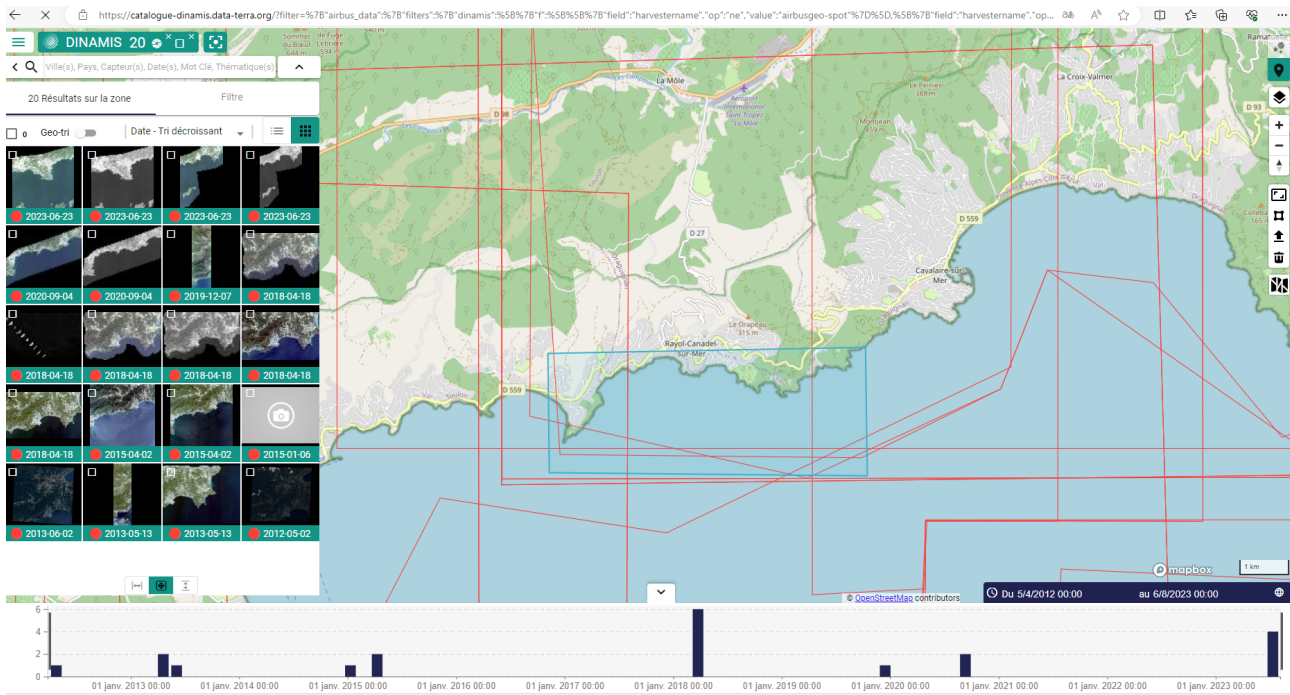


FIGURE 7 – Interface du catalogue Dinamis

Une fois notre première image choisie (la plus récente, datant du 23 juin 2023, convenait le mieux), nous avons pu en faire la demande de téléchargement. Nous avons alors reçu deux fichiers : le fichier IMG, où se trouve notre image, et le fichier HDR qui contient toutes les informations. Une fois ces données obtenues, après de nombreuses complications, nous avons pu les traiter pour essayer de cartographier la posidonie.

4.1.2 Données Bathymétriques de Litto3D

Le site Litto3D [10] du SHOM [11] (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) propose une base de données altimétrique intégrée, qui cartographie les zones côtières françaises à travers des relevés lidar topographiques et bathymétriques. Ce programme, co-géré par le SHOM et l'IGN (Institut Géographique National), vise à fournir des données précises pour diverses applications telles que la protection du littoral, la prévention des risques naturels, l'aménagement territorial, et la gestion des ressources.

Les données de Litto3D® sont accessibles gratuitement via le portail data.shom.fr et sont disponibles sous deux formats principaux : des semis de points en 3D et des modèles numériques de terrain maillés, disponibles dès que l'on télécharge des zones sur le portail de diffusion du SHOM. Ce programme est particulièrement utile pour la prévision des submersions marines, l'amélioration de la navigation, et le suivi des changements dans les habitats marins et terrestres.

On a donc, après la création d'un compte SHOM, d'abord sélectionné sur le site toutes les zones qui étaient dans le domaine du Rayol. On a ainsi pu télécharger une grande quantité de données bathymétriques. Les données bathymétriques que nous avons utilisées datent, pour l'étude bathymétrique la plus récente en zone PACA, de 2015 (voir Figure 8).

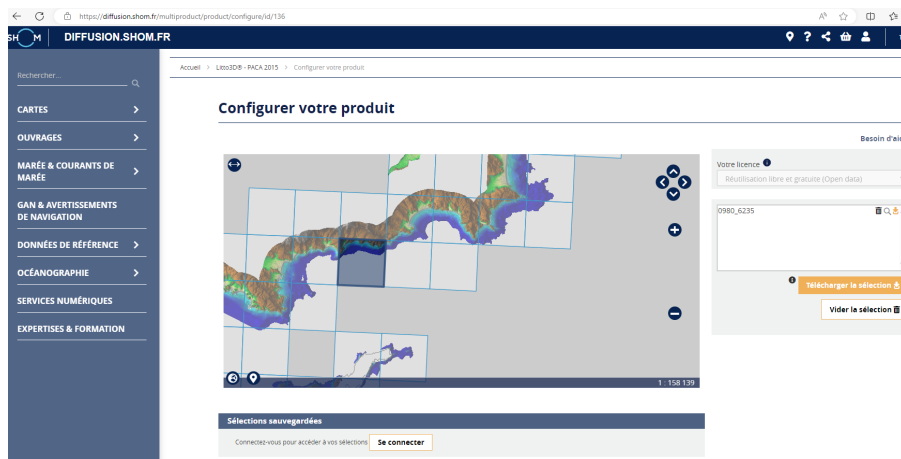


FIGURE 8 – Interface de Litto3D

Une fois nos données obtenues, pour pouvoir faire une synthèse bathymétrique légendée, nous avons dû utiliser le logiciel QGIS que nous expliquerons dans la prochaine partie.

4.2 Traitement et Analyse des Données

4.2.1 Traitement des Données avec QGIS

Dans le cadre de notre projet de cartographie marine, le logiciel QGIS s'est révélé indispensable pour le traitement rigoureux des données bathymétriques fournies par Litto3D. Nous avons documenté méthodiquement les étapes suivies, enrichies par des captures d'écran pour une compréhension approfondie des techniques utilisées.

Importation des Données

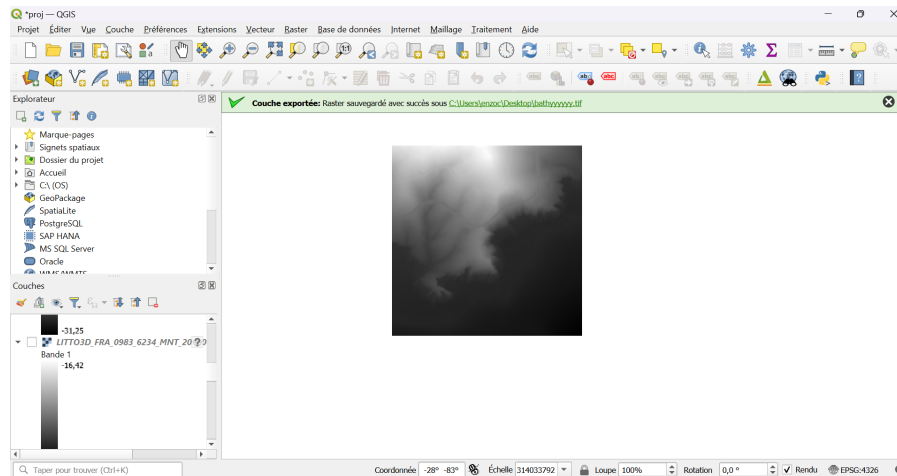


FIGURE 9 – Visualisation d'une tuile avant assemblage

Nous avons importé les données MNT1 (Modèle Numérique de Terrain à 1 mètre) dans QGIS en utilisant l'option « Ajouter une couche Raster » (voir Figure 9). Cette procédure nous a permis de manipuler avec précision chaque section des données bathymétriques).

Assemblage des Tuiles

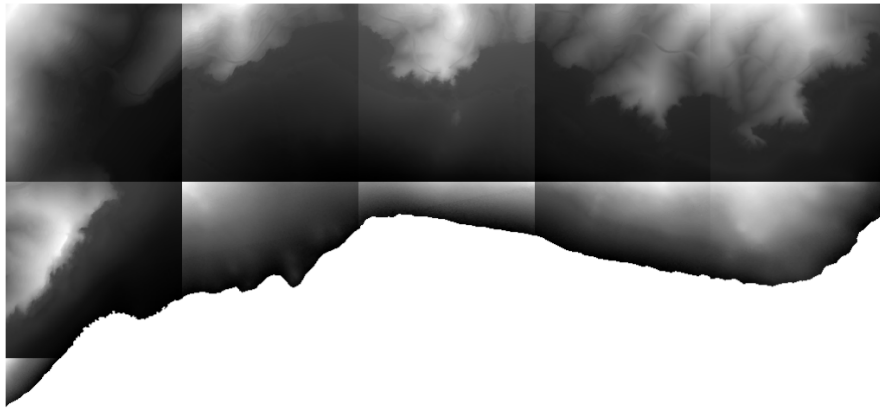


FIGURE 10 – Processus de fusion des tuiles dans QGIS

Chaque tuile a été minutieusement positionnée afin de garantir un alignement correct, évitant tout chevauchement ou vide (voir Figure 10). Cet alignement est crucial pour assurer l'intégrité spatiale de notre représentation bathymétrique et il a été rendu possible grâce au géoréférencement.

Uniformisation des Niveaux



FIGURE 11 – Fusion des tuiles à la bonne échelle dans QGIS

Avant de procéder à leur fusion, il a été nécessaire d'harmoniser les niveaux altimétriques de chaque tuile pour assurer une continuité sans faille du modèle numérique de terrain final (voir Figure 11).

Fusion des Tuiles

Les tuiles, une fois ajustées, ont été fusionnées à l'aide de l'outil de fusion raster de QGIS [12], résultant en une couche raster unique et continue. Cette étape a été essentielle pour créer une représentation cohérente et détaillée du fond marin.

Ce processus méticuleux dans QGIS a non seulement facilité une préparation précise des données bathymétriques pour des analyses ultérieures mais a aussi garanti que la base de notre étude était robuste et fiable. En suivant ces procédures rigoureuses, nous avons optimisé l'efficacité de notre travail de cartographie, essentiel pour atteindre les objectifs de conservation et d'étude écologique du projet. Les captures d'écran intégrées servent à illustrer le processus technique et à valider les méthodes employées pour réaliser une cartographie précise des habitats marins.

4.2.2 Analyse Bathymétrique dans ENVI

Suite à la fusion et à l'ajustement des données bathymétriques dans QGIS, une analyse détaillée a été entreprise dans ENVI, afin de perfectionner la visualisation et l'analyse de ces données pour notre projet de cartographie marine au Domaine du Rayol.

Importation et Ajustement des Données

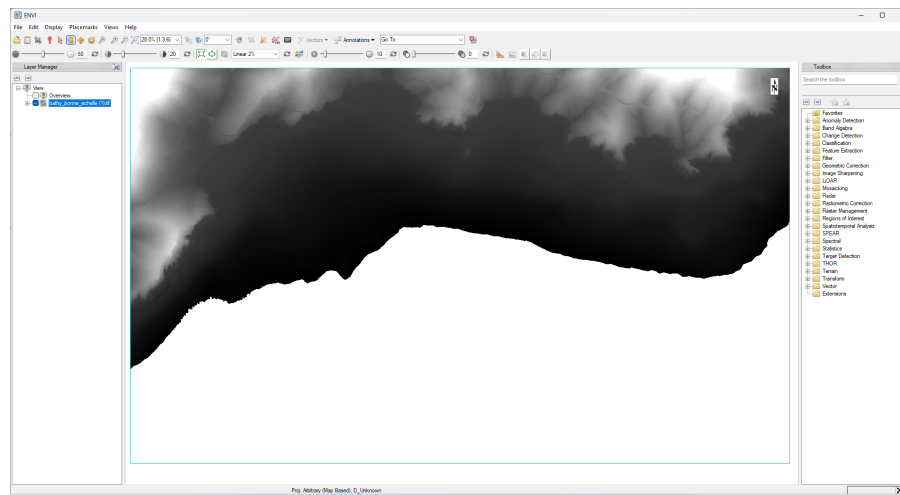


FIGURE 12 – Importation et ajustement des données bathymétriques dans ENVI

Les données bathymétriques préparées dans QGIS ont été importées dans ENVI. Cette étape a inclus l'adaptation de l'échelle des données pour correspondre aux exigences spécifiques d'une analyse spatiale précise dans ENVI (voir Figure 12).

Application d'une table de couleur

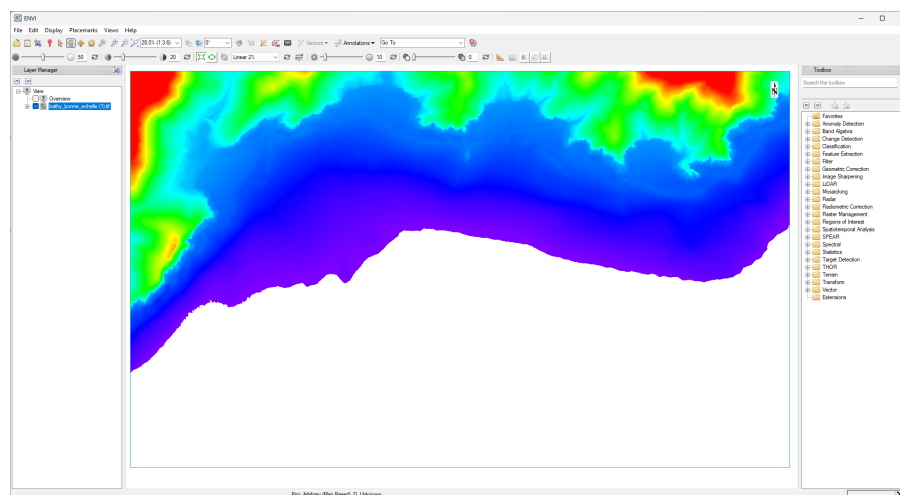


FIGURE 13 – Application d'une table de couleur dans ENVI

Dans ENVI, nous avons transformé la représentation visuelle des données en passant d'un affichage en niveaux de gris à une échelle de couleurs (voir Figure 13). Cette modification a amélioré la distinction des variations de profondeur, chaque couleur étant assignée à des intervalles spécifiques de profondeur, facilitant ainsi l'interprétation des caractéristiques bathymétriques.

Filtration des Données de Surface

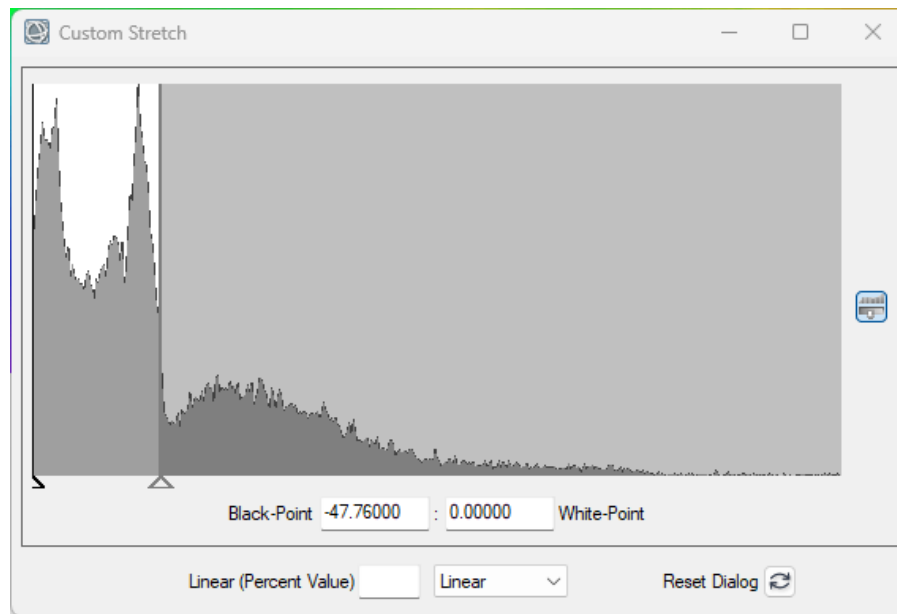


FIGURE 14 – Filtrage des valeurs supérieures à 0 dans ENVI

Nous avons également procédé à un filtrage minutieux des données, en éliminant toutes les valeurs bathymétriques supérieures à zéro (voir Figure 14). Cette opération a permis de concentrer notre analyse uniquement sur les données sous-marines, excluant ainsi les données terrestres et les eaux peu profondes qui ne sont pas pertinentes pour notre étude des habitats marins (voir Figure 15).

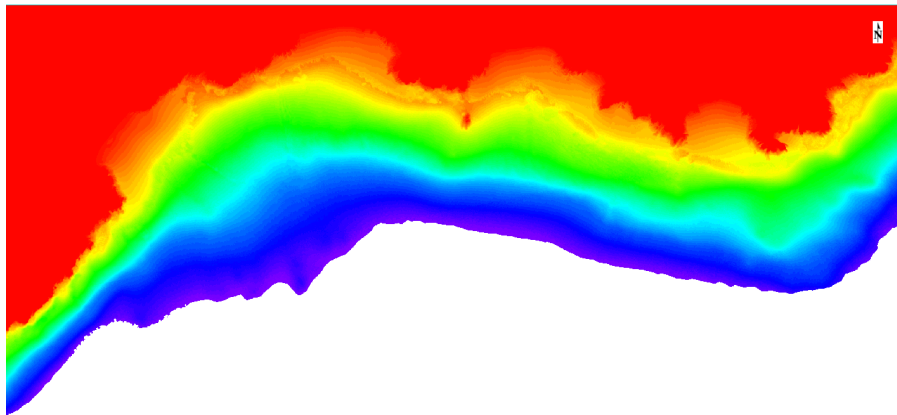


FIGURE 15 – Cartographie bathymétrique colorimétrique du Domaine du Rayol

Cette phase approfondie d'analyse dans ENVI [13] a enrichi notre compréhension de la distribution spatiale des profondeurs marines. L'utilisation avancée de techniques de visualisation et de filtrage a affiné notre focus sur les zones critiques, optimisant nos efforts de cartographie marine en vue de la conservation et de l'étude écologique des habitats sous-marins du domaine.

4.3 Définition et Sélection des Régions d'Intérêt (ROI)

En premier lieu, nous superposons l'image satellite avec les données issues de la bathymétrie, notre objectif est de pouvoir créer des lignes de profondeurs pour une valeur de 2m, 4m, 7m et enfin 10m. Une fois les lignes obtenues, nous créons des ROIs pour les quatre profondeurs et ce uniquement dans une zone de sable (voir Figure 16). Il est crucial de ne pas se tromper ici car cela fausserait totalement la correction que nous appliquerons par la suite. Une fois nos quatre zones trouvées, il ne nous reste plus qu'à prendre un élément de

sable mais cette fois-ci au large. Nous enregistrons enfin tous ces ROIS dans un fichier que l'on exportera avec l'extension *.ROI*. Ce fichier nous servira à réaliser le calcul de la bathymétrie avec le script IDL.

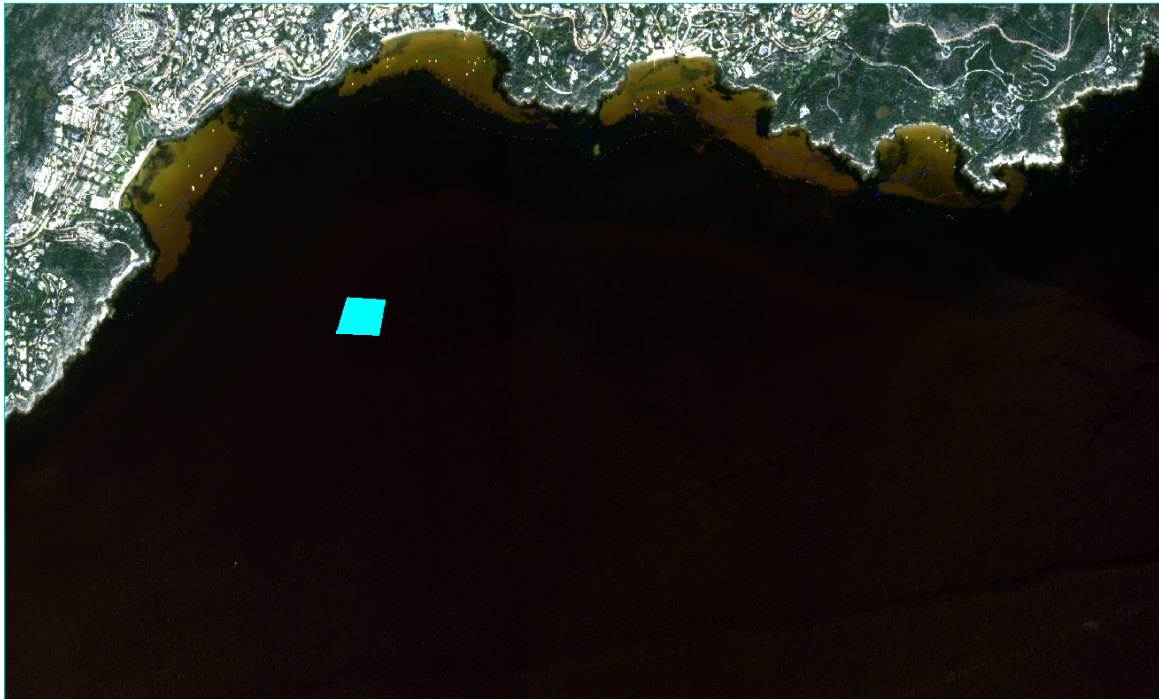


FIGURE 16 – Image pléiade avec lignes bathymétriques

4.4 Calcul et Correction de la Bathymétrie

4.4.1 Calcul de la Bathymétrie

Ensuite, pour réaliser le calcul de la bathymétrie nous exécutons le script dans l'environnement IDL. Nous choisissons premièrement l'image source, dans notre cas il s'agit de l'image pléiade. Nous sélectionnons les bandes bleues et vertes et nous spécifions le masque utilisé. Enfin nous chargeons le fichier contenant la bathymétrie et cela nous donne donc un fichier *.img* (voir Figure 17).

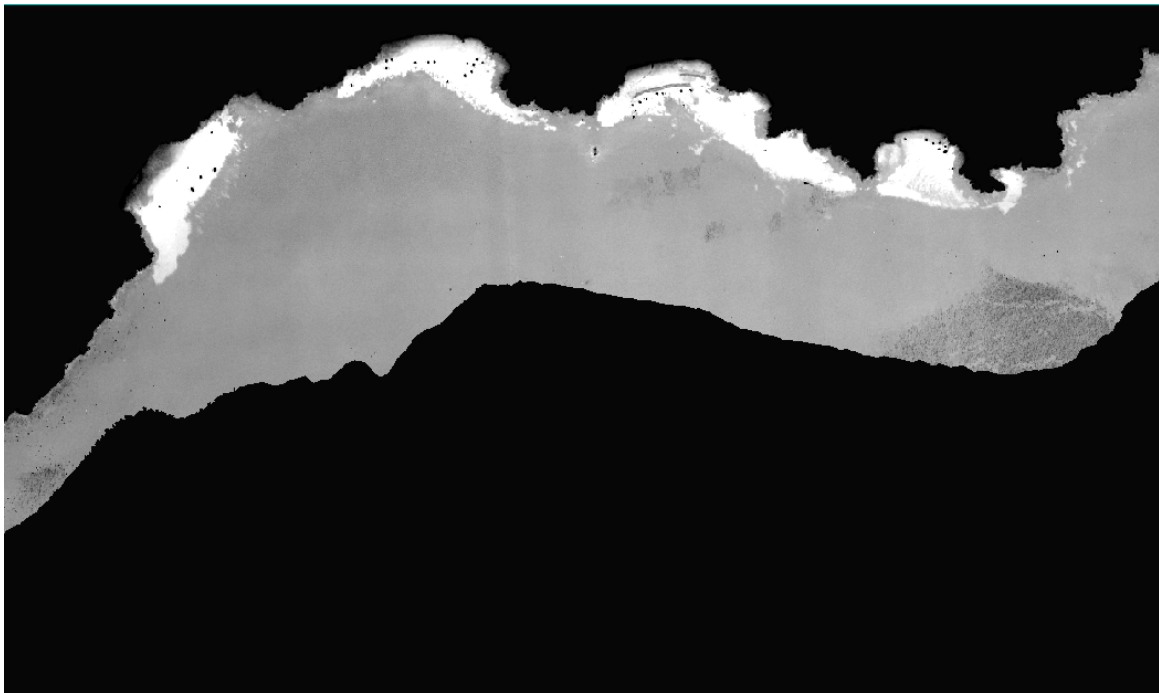


FIGURE 17 – Image pléiade avec calcul de la bathymétrie

4.4.2 Correction de l'Atténuation de l'Eau

Avec ce fichier nous allons pouvoir faire la correction de l'atténuation de l'eau qui est primordiale pour notre étude. En effet, avec la profondeur, la couleur des habitats marins change. Il nous faut donc corriger cela afin d'obtenir une image sur laquelle la colonne d'eau aurait été supprimée. Nous exécutons alors ce code (voir 7.2), il faut sélectionner en premier l'image source, puis nous importons l'image bathymétrique, c'est celle que nous venons de créer. Ensuite, nous chargeons le fichier contenant les ROIS puis le masque. Cela nous donne alors notre image corrigée finale sur laquelle nous pouvons alors faire la classification (voir Figure 18).

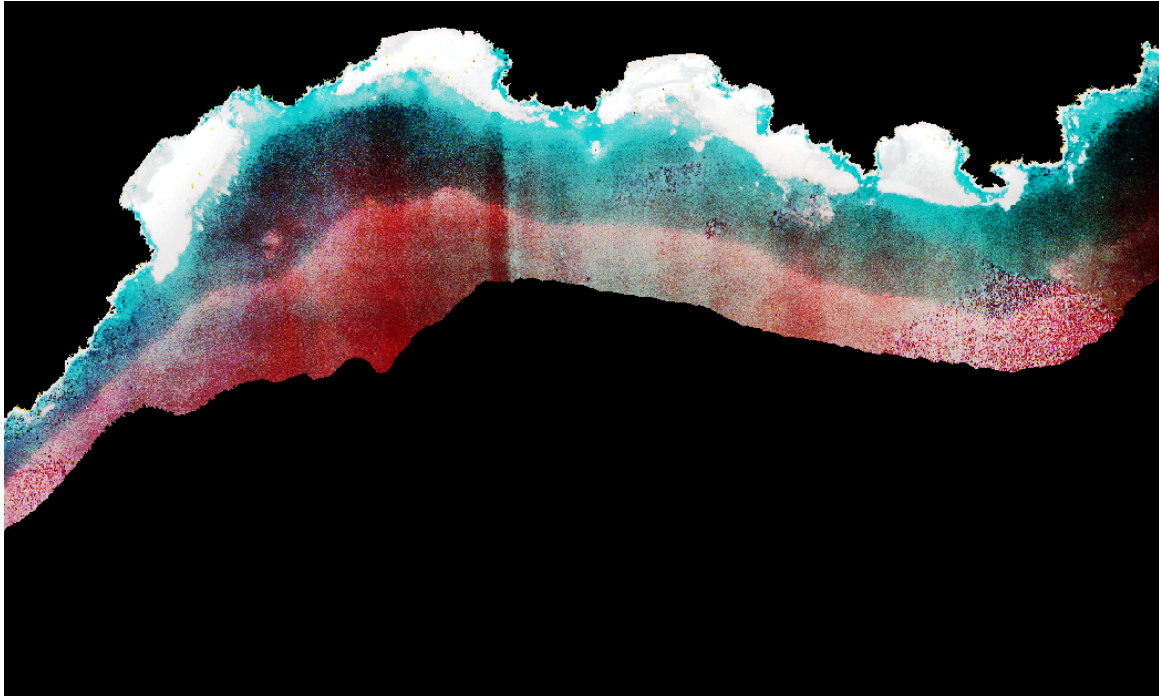


FIGURE 18 – Image pléiade avec correction de l'atténuation de l'eau

4.5 Analyse Finale et Classification

4.5.1 Sélection Finale des ROI

Sur cette image nous allons donc choisir nos régions d'intérêts. Cette étape est assez délicate, en effet il faut sélectionner des zones dans lesquelles il n'apparaît qu'un seul type d'habitat à classifier sinon la moyenne sera faussée et l'attribution des classes également. Il faut également regrouper les couleurs de sables qui peuvent être différentes, prendre en compte toute la posidonie et la différencier des herbiers marins. Voici notre sélection :

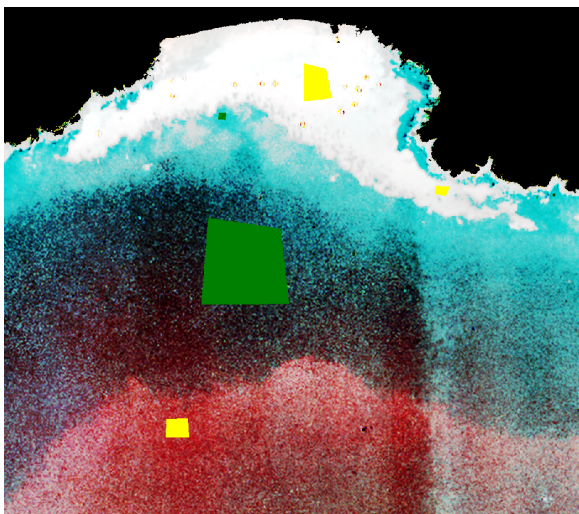


FIGURE 19 – Sélection des ROIs



FIGURE 20 – Sélection des ROIs

4.5.2 Réalisation de la Classification

Dès à présent, pour réaliser la classification nous devons calculer la valeur moyenne de chaque échantillon sur chaque bandes spectrales pour que cela puisse nous servir par la suite à reconnaître les différents éléments sur l'image. L'analyse du profil spectral révèle des différences marquées dans les intensités des composantes rouge, verte et bleue pour chaque zone identifiée. Enfin, pour appliquer la classification, nous allons associer chaque pixel de l'image à la classe la plus proche en terme de distance. Nous avons obtenus les résultats les plus concluants avec la distance Euclidienne :

La distance Euclidienne est donnée par la formule suivante :

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

La distance euclidienne est une mesure utilisée en télédétection pour évaluer la similarité entre deux vecteurs spectraux. La distance euclidienne mesure la longueur directe entre deux points dans un espace multidimensionnel. Dans le contexte spectral, elle calcule la distance géométrique entre les signatures spectrales de deux pixels. Une distance euclidienne faible indique une similarité élevée entre les spectres, tandis qu'une distance élevée suggère une disparité.

Nous utilisons alors la distance euclidienne, nous choisissons notre image, le masque et les ROIS (voir Figure 21).

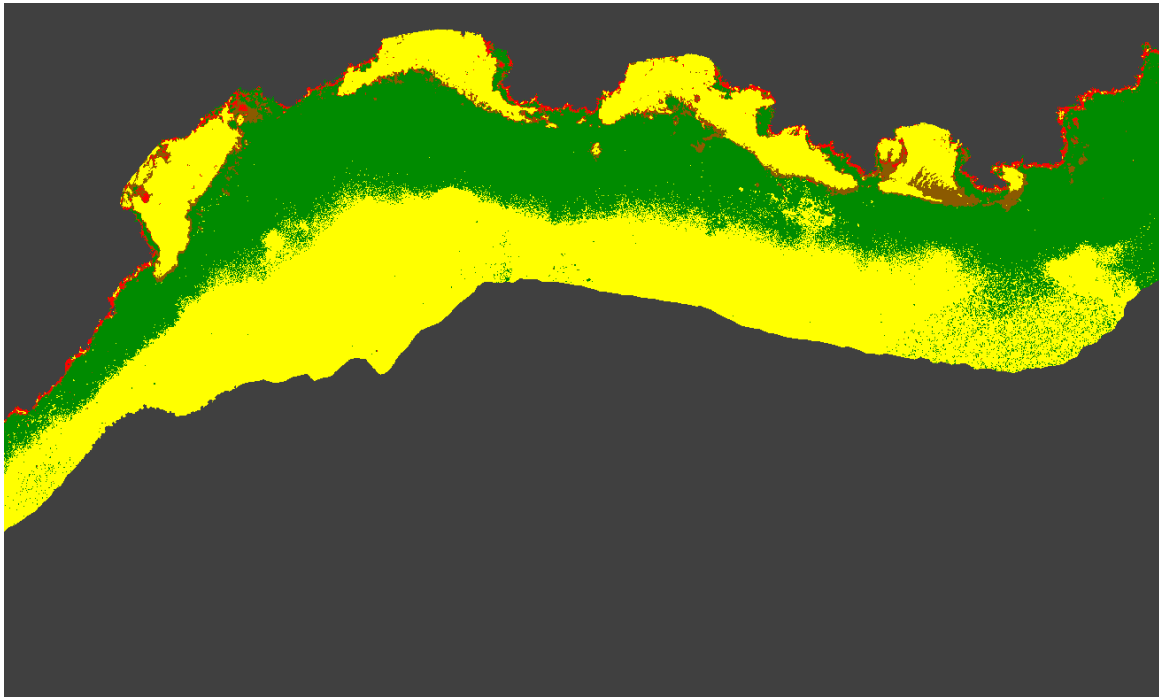


FIGURE 21 – Carte de classification réalisée sur l'image pléiade

Nous voyons en vert la posidonie, en jaune le sable, en rouge les roches et enfin en marron les zones d'amas de feuilles. Nous pouvons donc nous consacrer au Domaine du Rayol.

5 Résultats

5.1 Distribution de la Posidonie au Domaine du Rayol

Nous avons en premier lieu voulu connaître la largeur de la bande de posidonie au large du domaine. Pour ce faire, nous utilisons l'outil mesure et trouvons une largeur de 360.74 mètres (voir Figure 22). Cette donnée nous a été demandée par les propriétaires du domaine qui voulaient connaître cette information.

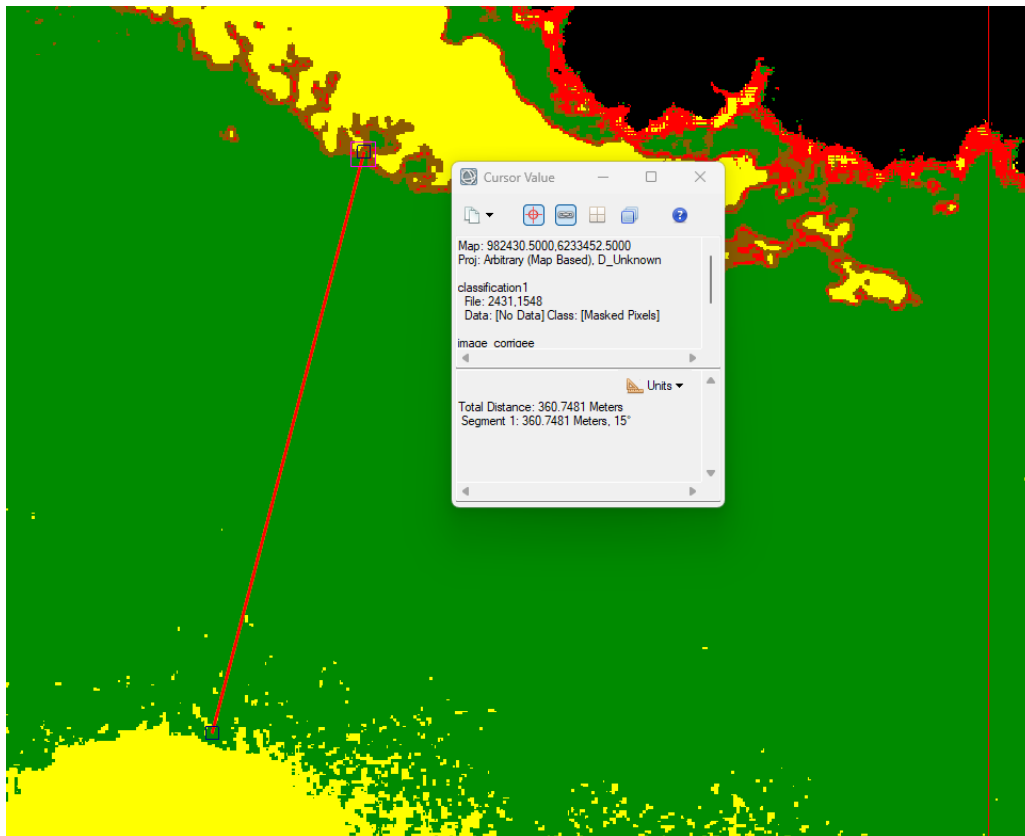


FIGURE 22 – Largeur de la bande de posidonie au large

Puis pour poursuivre notre étude nous réalisons un masque sur cette image pléiade afin de ne garder que le Domaine du Rayol (voir Figure 23), pour cela il faut sélectionner la zone, effectuer le masque pour ensuite le superposer à notre masque de départ. Nous obtenons ce nouveau masque qui ne prend en compte que le domaine de Rayol. Nous réalisons donc une deuxième classification sur cette zone et nous obtenons cette classification (voir Figure 24).

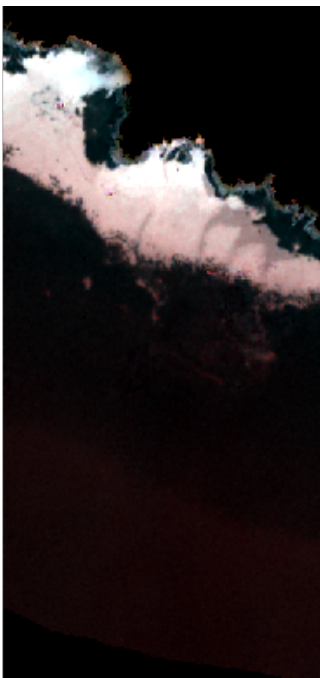


FIGURE 23 – Le Domaine du Rayol

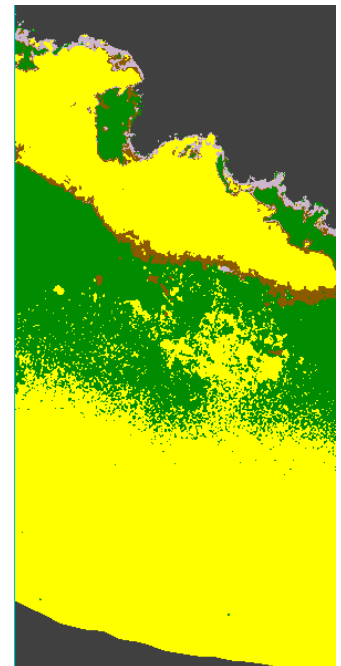


FIGURE 24 – Classification réalisée sur le Domaine du Rayol

Les couleurs correspondent aux mêmes types de fonds que précédemment. Nous pouvons maintenant effectuer quelques statistiques sur cette classification afin de déterminer par exemple la surface de posidonie, de sable et de roche.

5.2 Statistiques sur la classification

Nous utilisons la fonction statistiques de ENVI pour obtenir l'histogramme de la répartition des classes en fonction des ROIS (voir Figure 25). Pour la classification nous avons utilisé 9 ROIS donc nous avons 9 répartitions.

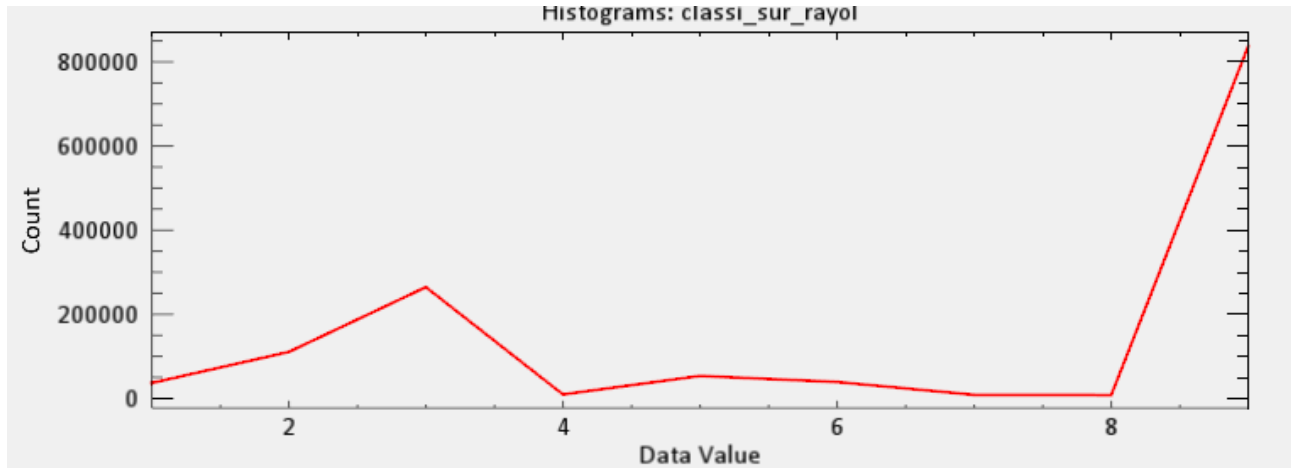


FIGURE 25 – Histogramme de la répartition des pixels selon les classes

Voici à quoi correspondent ces classes :

- ROI 1 : sable proche
- ROI 2 : posidonie proche et peu dense
- ROI 3 : sable lointain
- ROI 4 : roches
- ROI 5 : sable proche
- ROI 6 : posidonie lointaine et plus dense
- ROI 7 : laisses denses
- ROI 8 : laisses peu denses
- ROI 9 : masque

Comme vous pouvez le constater, nous avons essayé d'être le plus précis possible dans nos choix de ROIs, dès que nous remarquons une légère modification de la couleur pour une même entité nous sélectionnons alors immédiatement un nouvel ROI et ce pour ne pas fausser les moyennes.

Type	Nombre de Pixels
Sable	354 779
Posidonie	149 587
Roches	9 472
Laisses	16 558
Masque	837 720
Total	1 368 116

TABLE 1 – Répartition des pixels par type

Chaque pixel représentant une surface réelle de 4 mètres carrés, les résultats ont été convertis en kilomètres carrés pour une compréhension plus globale de l'étendue de chaque type de substrat :

Type	Surface (km ²)
Sable	14.19
Posidonie	5.98
Roches	0.37
Laisses	0.66
Masque	33.50
Total	54.72

TABLE 2 – Répartition de la surface par type

Pour une analyse plus détaillée, en excluant la catégorie 'Masque', nous avons évalué la répartition en pourcentage des surfaces naturelles :

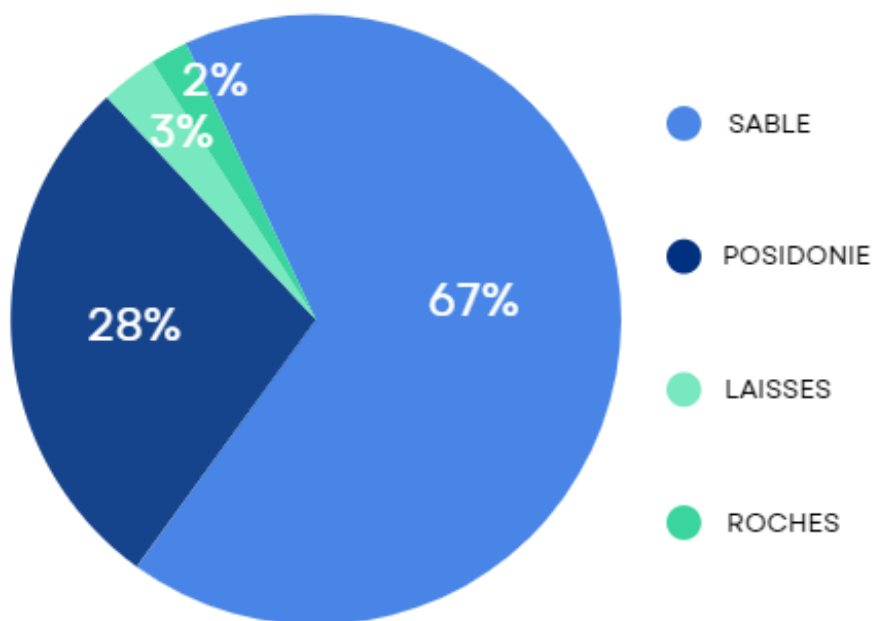


FIGURE 26 – Diagramme de la répartition des classes

Les résultats montrent une prédominance du sable, qui constitue environ 66.89% des substrats naturels analysés, ce qui souligne son abondance dans l'écosystème marin étudié. La posidonie, couvrant 28.20% de la surface naturelle, joue un rôle crucial dans la stabilisation des fonds marins et la biodiversité. Les roches et les laisses, bien que moins répandus, sont essentiels pour compléter le tableau de l'habitat marin de la région.

6 Discussion

6.1 Analyse des Résultats

La transformation des données collectées en une carte colorimétrique a révélé des informations précieuses pour le domaine du Rayol. Le vert représentant la posidonie sur notre carte nous montre que ces herbiers marins sont le reflet d'un écosystème.

La prédominance du sable dans notre paysage marin souligne l'importance de prendre en compte la composition des fonds lorsqu'il s'agit de planifier toute intervention de conservation. Nous avons pu aussi observer, même si elles représentent des zones bien moins étendues que la posidonie et le sable, les roches et les dépôts de laisse jouent un rôle dans la structuration de la diversité du fond marin. Ces derniers permettent à d'autres types d'algues de se développer ainsi que d'autres êtres marins. Chaque pixel de couleur sur notre carte porte en lui une multitude d'interactions biologiques et géologiques, constituant un tableau vivant de biodiversité.

La posidonie représente bien plus qu'une caractéristique physique du paysage marin ; elle est synonyme de vie, de productivité biologique. Il est donc essentiel de la surveiller car elle se retrouve menacée par des influences anthropogéniques ou des changements climatiques. L'analyse spatiale a mis en lumière le fait que ces herbiers ne sont pas uniformément répartis mais concentrés dans des zones qui doivent être reconnues comme sanctuaires de biodiversité, méritant une attention et une protection particulière.

En effet, lors de notre visite au domaine du Rayol, les encadrants ont justement mis l'accent sur un défi environnemental critique : l'ancrage des bateaux sur les herbiers de posidonie. Bien que la loi n'autorise pas l'ancrage sur des zones de posidonie pour protéger ces écosystèmes délicats, les capitaines de bateaux connaissent bien la loi, mais ne l'appliquent pas. Bien que l'interdiction d'ancrer sur les herbiers de posidonie soit reconnue, le problème principal est que ces zones ne sont pas clairement délimitées sur les cartes marines utilisées pour la navigation. Cela conduit certains capitaines à prétendre une ignorance de la présence de posidonie ou à ignorer volontairement les réglementations en place pour leur propre commodité.

La sensibilisation accrue, soutenue par les preuves visuelles de notre cartographie, pourrait être un atout majeur pour la protection de ces habitats marins. De plus, cela permettrait un suivi dans les années à venir de l'évolution des fonds marins et ainsi pouvoir agir en conséquence. C'est pourquoi il est crucial de continuer à travailler main dans la main avec les autorités, les organismes de conservation, les plaisanciers et les professionnels du tourisme pour veiller à la sauvegarde des herbiers de posidonie.

6.2 Défis Rencontrés et Solutions Apportées

Au fil de notre projet de cartographie marine, nous avons dû faire face à plusieurs défis notables, nécessitant chacun des solutions novatrices pour continuer à progresser.

Accès aux Images Satellitaires de Haute Qualité

Défi : L'obtention d'images satellitaires de qualité suffisante pour visualiser avec précision les fonds marins représentait notre premier grand obstacle. La nécessité d'une haute résolution était impérative pour distinguer clairement les herbiers de posidonie des autres substrats marins.

Solution : Après une analyse approfondie des options disponibles, nous avons sélectionné le satellite Pléiades pour ses capacités à fournir des images de haute résolution. Ce choix s'est avéré judicieux, les images acquises étant d'une qualité indispensable pour l'exactitude de notre étude.

Assurance de la Précision de la Classification

Défi : Classer les différents substrats marins avec précision à partir des images satellitaires représentait un véritable défi, habituellement validé par des reconnaissances de terrain — une méthode standard pour confirmer les données obtenues par satellite.

Solution : Face aux contraintes de temps et aux défis logistiques, notamment les autorisations nécessaires pour une reconnaissance de terrain par des étudiants, l'une de nos encadrantes s'est proposée pour réaliser cette reconnaissance. Toutefois, en raison de contraintes temporelles et de la proximité de notre échéance de projet, il n'a pas été possible d'intégrer les résultats de cette reconnaissance dans notre étude actuelle.

Ces défis mettent en lumière les complexités et les contraintes typiques des projets de recherche appliquée, particulièrement dans un cadre académique. Malgré ces obstacles, notre équipe a réussi à élaborer une carte détaillée des habitats marins, offrant une base solide pour les futures initiatives de conservation et de gestion des ressources marines. L'engagement, la persévérance et l'adaptabilité que nous avons démontrés tout au long de ce projet témoignent de notre dévouement à l'excellence académique et à la protection de l'environnement marin.

6.3 Contribution du Projet à la Conservation Marine

Notre projet de cartographie au Domaine du Rayol constitue un atout majeur pour la conservation marine. Il s'inscrit dans plusieurs domaines, tant académiques que scientifiques, mais aussi dans des applications pratiques, influençant positivement les pratiques d'ancrage et la gestion des ressources marines.

Intégration avec les Applications Nautiques

Nos cartes pourraient considérablement aider les applications nautiques populaires telles que Donia, Navily et Nav and co. L'intégration de nos cartes détaillant la posidonie dans ces applications peut guider les capitaines de bateaux vers des pratiques d'ancrage plus respectueuses des écosystèmes marins. Ces applications offrent déjà des informations sur les fonds marins, mais elles ne comportent pas d'information sur la posidonie. En

travaillant en collaboration avec les développeurs de ces applications, nous pourrions améliorer la précision des cartes marines et ainsi mieux protéger les fonds marins.

Sensibilisation et Éducation

Notre projet peut également s'inscrire dans une démarche de sensibilisation visant à éduquer les plaisanciers et les professionnels de la mer sur l'importance des herbiers de posidonie. Madame Aurélie Trabaud a d'ailleurs suscité son intérêt lors de notre rencontre pour obtenir une carte des fonds marins. Elle nous a expliqué qu'elle voulait cette carte pour sensibiliser les visiteurs du domaine et pour faire une reconnaissance des différents fonds en s'assurant qu'ils sont au bon endroit en partant en snorkeling.

Politiques et Réglementations

Les résultats du projet peuvent avoir une résonance dans le temps. Les autorités peuvent s'en servir pour observer comment les fonds marins évoluent et ainsi agir en conséquence. Elles peuvent utiliser nos cartes pour délimiter clairement les zones où l'ancrage doit être restreint ou interdit. Avec nos cartes, de nouvelles zones pourraient être créées pour aider à la conservation des fonds marins.

En somme, notre projet a le poids nécessaire pour s'inscrire significativement dans une démarche de conservation marine en fournissant des données précises et actualisées sur les habitats de posidonie, et en équipant les différentes parties prenantes avec les informations nécessaires pour agir de manière plus informée et responsable.

7 Conclusion et Perspectives

7.1 Résumé des Contributions Clés

En conclusion de ce projet, il est essentiel de récapituler les contributions clés qui ont marqué notre avancée tant sur le plan scientifique que pratique. Lors de ce projet, nous avons réussi à cartographier de manière rigoureuse la répartition de la posidonie dans le domaine du Rayol, grâce à l'utilisation habile d'images de satellites à haute résolution fournies par le satellite Pléiades. Nous avons également renforcé l'engagement du domaine du Rayol dans la préservation des fonds marins, ainsi que l'importance de sensibiliser à la conservation de ces écosystèmes précieux, touchant un public aussi bien jeune qu'adulte.

La méthodologie mise en place lors de ce projet a été la suivante : nous avons combiné les données bathymétriques de Litto3D avec le traitement géospatial via QGIS et ENVI, ce qui a abouti à une représentation fidèle des différents habitats marins du domaine du Rayol. Au cours de ce projet, nous avons franchi différentes étapes, de la sélection rigoureuse des images à l'assemblage méticuleux des tuiles bathymétriques, en abordant avec rigueur les défis techniques. Nous avons utilisé des techniques avancées pour notre projet, telles que la classification basée sur la distance euclidienne, ce qui a permis une analyse précise. De plus, le développement d'un algorithme de correction de la bathymétrie et de l'atténuation de l'eau a été un point fort du projet.

Ces efforts ont abouti à la création d'une carte qui nous permet de connaître la bathymétrie, mais qui fournit également une identification des différents habitats marins. Cette carte représente une ressource inestimable pour suivre dans le temps l'évolution des herbiers marins et offre un outil précieux pour soutenir les efforts de conservation et de restauration du littoral.

Notre projet ne se limite pas à une application purement scientifique ; il a le potentiel d'influencer positivement les politiques de gestion marine. En effet, avec notre carte, nous pouvons fournir aux personnes concernées les informations nécessaires pour entreprendre des démarches de protection de ces habitats marins. Cela pourrait considérablement aider les autorités à limiter les activités d'ancrage et de navigation qui menacent la pérennité de ces écosystèmes.

Enfin, notre projet sert de pilier pour la sensibilisation et l'éducation environnementales. Nos résultats peuvent s'intégrer dans des applications de navigation nautique mais aussi dans des programmes éducatifs. Nous espérons élargir notre impact au-delà des cercles académiques et contribuer de manière durable à la protection des mers et océans.

7.2 Suggestions pour les Recherches ou Actions de Conservation Futures

En regardant vers l'avenir, plusieurs pistes pourraient être explorées afin d'améliorer et d'étendre les efforts de conservation :

- Amélioration des techniques de cartographie : Intégrer les avancées dans le domaine de l'imagerie satellite et de la télédétection pour affiner encore la précision des cartographies futures.
- Programmes de sensibilisation renforcés : Développer des programmes éducatifs et des campagnes de sensibilisation ciblées pour les communautés locales et les touristes, afin de promouvoir des pratiques respectueuses de l'environnement marin.
- Collaboration intersectorielle : Renforcer la collaboration entre les chercheurs, les gestionnaires de zones marines protégées, les autorités locales et les secteurs privés pour une gestion intégrée des ressources marines.
- Suivi à long terme : Mettre en place des systèmes de suivi régulier pour observer les changements à long terme dans les habitats marins, ce qui permettra de prendre des mesures correctives en temps réel.

En conclusion, ce projet de cartographie marine au Domaine du Rayol ne représente pas seulement un progrès scientifique, mais aussi un modèle potentiel pour des initiatives similaires le long des côtes méditerranéennes et au-delà. En continuant à combiner les recherches scientifiques et l'engagement communautaire, nous pouvons espérer préserver ces écosystèmes marins précieux pour les générations futures.

A Script IDL pour la correction de l'image

```
1 pro calcul_bathymetrie
2
3 ENVI_DELETE_ROIS , /all
4 file_name_in=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner image source",filter='*.img')
5 ;file_name_in='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013 WV2\
   porquerolles1_refl_wv2_divided_by_100000.img'
6 ENVI_OPEN_FILE, file_name_in, r_fid=fid_in
7 ENVI_FILE_QUERY,fid_in,ns=ns,nl=nl,nb=nb,data_type=dt,$
8 interleave=inter,fname=fname,sname=sname,bnames=bnames,wl=wavelengths,file_type=ft
9
10 ;bbleue=0
11 read,bbbleue,prompt='Bande bleue='
12
13 ; choix de la bande verte
14 ;bverte=1
15 read,bverte,prompt='Bande verte='
16
17 image_bleue=fltarr(ns,nl)
18 image_verte=fltarr(ns,nl)
19 pos=LINDGEN(nb)
20 dims=[-1, 0,ns-1,0,nl-1]
21 i=bbbleue-1
22 image_bleue=float(ENVI_GET_DATA(fid=fid_in,dims=dims,pos=pos[i]))
23 i=bverte-1
24 image_verte=float(ENVI_GET_DATA(fid=fid_in,dims=dims,pos=pos[i]))
25
26 image_verte=smooth( image_verte,3 )
27 image_bleue=smooth( image_bleue,3 )
28
29
30 ;npoly=0
31 ;read,npoly,prompt='Nombre de polygones='
32
33 roi_file=ENVI_PICKFILE(title='Selectionner le fichier ROI du sable',filter='*.roi')
34 ;roi_file='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013 WV2\
   sables.roi'
35 ROI_RESTORE,roi_file
36 roi_ids=ENVI_GET_ROI_IDS(ns=ns,nl=nl,roi_names=roi_names)
37 npoly = (size(roi_ids,/DIMENSIONS))[0]
38 print, npoly
39 L_v=fltarr(npoly-1)
40 L_r=fltarr(npoly-1)
41 pos=LINDGEN(nb)
42
43 for i=0,npoly-2 do begin
44     bache_id=roi_ids(i)
45     bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
46     bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
47     bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
48     ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=1
49     L_v(i)=mean_bache(bbbleue-1)
50     L_r(i)=mean_bache(bverte-1)
51 endfor
52
53
54 bache_id=roi_ids(i)
55 bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
56 bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
57 bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
58 ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=1
59 Le_v=mean_bache(bbbleue-1)*0.3
60 Le_r=mean_bache(bverte-1)*0.3
61
62
```

```

63 X_r=Alog(L_r-Le_r)
64 X_v=Alog(L_v-Le_v)
65
66
67 plot,X_v,X_r
68
69 ;calcul de la pente de (X_v,X_r)
70
71 res= linfit(X_v,X_r)
72
73 pente=res[1]
74 print, pente
75 file_name_mask=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner le masque",filter='*.img')
76 ;file_name_mask='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013 WV2
    \mask_eau.img'
77 ENVI_OPEN_FILE, file_name_mask, r_fid=fid_mask
78 ENVI_FILE_QUERY, fid_mask, ns=ns_mask, nl=nl_mask, nb=nb_mask, $
79 file_type=ft
80 pos_mask=[0]
81 dims_mask=[-1, 0, ns_mask-1, 0, nl_mask-1]
82 mask=ENVI_GET_DATA(fid=fid_mask, dims=dims_mask, pos=pos_mask)
83 image_bathy=fltarr(ns, nl)
84
85 pos_data=where(mask eq 1)
86 image_bathy(pos_data)= float((Alog(image_bleue(pos_data)-Le_v)-pente*Alog(image_verte
    (pos_data)-Le_r)))
87
88
89 file_name_bathy=ENVI_PICKFILE(title="Image de bathy",filter='*.img')
90 ;file_name_bathy='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013
    WV2\bathy.img'
91 OpenW, unit, file_name_bathy, /Get_LUN
92 WriteU, unit, image_bathy
93 free_LUN, unit
94 ENVI_SETUP_HEAD, data_type=4, fname=file_name_bathy, interleave=0, ns=ns, $
95 nl=nl, nb=1, /open, /write
96
97 ENVI_OPEN_FILE, file_name_bathy, r_fid=fid_bathy
98 ENVI_FILE_QUERY, fid_bathy, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, $
99 interleave=inter, fname=fname, sname=sname, bnames=bnames, wl=wavelengths, file_type=ft
100
101 bathy=fltarr(npoly-1)
102 z=fltarr(npoly-1)
103
104 pos=LINDGEN(nb)
105 for i=0, npoly-2 do begin
106     bache_id=roi_ids(i)
107     bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id, fid=fid_bathy, pos=pos)
108     bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
109     bache_dims=[bache_ptr, 0, 0, 0, 0]
110     ENVI_STATS_DOIT, fid=fid_bathy, dims=bache_dims, pos=pos, mean=mean_bache, comp_flag=1
111     bathy[i]=mean_bache
112     ;read,z[i], prompt='z'+ strtrim(i,2)+'=' '
113     ;read,z[i], prompt='z'+ strtrim(i,2)+'=' '
114
115
116 endfor
117
118
119 z[0]=2
120 z[1]=4
121 z[2]=7
122 z[3]=10
123
124
125

```

```

126
127
128
129
130 res=linfit((-bathy),z)
131 plot,z[0:3],(-bathy[0:3])
132
133
134 image_z=intarr(ns,nl)
135
136
137 image_z(pos_data)= fix(( res[1] * (-(image_bathy(pos_data))) + res[0] ) * 10)
138
139 file_name_out=ENVI_PICKFILE(title="Image de sortie",filter='*.img')
140 ;file_name_out='C:\Users\Audrey Roman\Documents\Travail\hypmed\Porquerolles 2013 WV2\
141 z.img'
142 OpenW,unit,file_name_out,/Get_LUN
143 WriteU,unit,image_z
144 free_LUN,unit
145 ENVI_SETUP_HEAD,data_type=2,fname=file_name_out,interleave=0,ns=ns,$
146 nl=nl,nb=1,/open,/write
147
148 end

```

```

1 pro correction_attenuation
2
3 ENVI_DELETE_ROIS, /all
4
5 file_name_in=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner l'image source", filter='*.img')
6 ;file_name_in='g:\idl\mosa_st_jean_geo.img'
7 ENVI_OPEN_FILE, file_name_in, r_fid=fid_in
8 ENVI_FILE_QUERY,fid_in,ns=ns,nl=nl,nb=nb,data_type=dt,$
9 interleave=inter,fname=fname,sname=sname,bnames=bnames,wl=wavelengths,file_type=ft
10
11
12 file_name_z=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner l'image bathymetrique", filter='*.img
13 ')
14 ;file_name_z='g:\idl\z.img'
15 ENVI_OPEN_FILE, file_name_z, r_fid=fid_z
16 ENVI_FILE_QUERY,fid_z,ns=ns,nl=nl,nb=nb_z,data_type=dt,$
17 interleave=inter,file_type=ft
18
19 ;ouverture du fichier de ROI des baches immergees
20 ;npoly=0
21 ;read,npoly,prompt='Nombre de polygones='
22
23 roi_file=ENVI_PICKFILE(title='Selectionner le fichier ROI du sable', filter='*.roi')
24 ;roi_file='g:\idl\sable.roi'
25 ROI_RESTORE,roi_file
26 roi_ids=ENVI_GET_ROI_IDS(ns=ns,nl=nl)
27 npoly = (size(roi_ids,/DIMENSIONS))[0]
28 L=fltarr(npoly-1,nb)
29 Lw=fltarr(nb)
30 pos=LINDGEN(nb)
31 pos_z=[0]
32 z=fltarr(1,npoly-1)
33
34 for i=0,npoly-2 do begin
35     bache_id=roi_ids(i)
36     bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
37     bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
38     bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
39     ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=1
40     L(i,*)=mean_bache(*)
41     bache_z=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_z,pos=pos_z)

```

```

41     bache_ptr_z=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
42     bache_DIMS=[bache_ptr_z,0,0,0,0]
43     ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_z,dims=bache_DIMS,pos=pos_z,mean=mean_bache,comp_flag=1
44     z(0,i)=mean_bache/10.0
45 endfor
46
47
48
49 bache_id=roi_ids(i)
50 bache_data=ENVI_GET_ROI_DATA(bache_id,fid=fid_in,pos=pos)
51 bache_ptr=ENVI_GET_ROI_DIMS_PTR(bache_id)
52 bache_DIMS=[bache_ptr,0,0,0,0]
53 ENVI_STATS_DOIT,fid=fid_in,dims=bache_DIMS,pos=pos,mean=mean_bache,comp_flag=1
54 Lw=mean_bache*0.6
55
56
57 print,'Lw=',Lw
58
59 k=fltarr(nb)
60
61 for i=0,nb-1 do begin
62     Y=alog(L(*,i)-Lw(i))
63     res= linfit(z,Y)
64     k(i)=-res[1]/2
65 end
66
67
68 print,'z=',z
69 print,'k=',k
70 plot,k
71
72 file_name_mask=ENVI_PICKFILE(title="Selectionner le masque", filter='*.img')
73 ;file_name_mask='g:\idl\mask.img'
74 ENVI_OPEN_FILE, file_name_mask, r_fid=fid_mask
75 ENVI_FILE_QUERY,fid_mask,ns=ns,nl=nl,nb=nb_mask,data_type=dt,$
76 interleave=inter,file_type=ft
77
78 pos=lindgen(nb)
79 dims=[-1, 0,ns-1,0,nl-1]
80 bathy=ENVI_GET_DATA(fid=fid_z,dims=dims,pos=[0])
81 image_z=bathy/10.0
82 mask=ENVI_GET_DATA(fid=fid_mask,dims=dims,pos=[0])
83 file_name_out=ENVI_PICKFILE(title="Image de sortie",filter='*.img')
84 ;file_name_out='g:\idl\mosa_st_jean_geo_attcor.img'
85 OpenW,unit,file_name_out,/Get_LUN
86
87 image_sortie=fltarr(ns,nl)
88 pos_eau=where(mask eq 1)
89 image_entree=ENVI_GET_DATA(fid=fid_in,dims=dims,pos=pos[0])
90 pos_terre=where((mask eq 0) and (image_entree ne 0))
91 for i=0,nb-1 do begin
92     image_entree=ENVI_GET_DATA(fid=fid_in,dims=dims,pos=pos[i])
93     ;image_entree(pos_eau)=smooth( image_entree(pos_eau),3 )
94     image_sortie(pos_eau)=((image_entree(pos_eau)-Lw(i))/exp(-2*k(i)*image_z(pos_eau)
95         )+Lw(i))
96     ;image_sortie(pos_eau)=((image_entree(pos_eau))/exp(-2*k(i)*image_z(pos_eau)))
97     ;image_sortie(pos_eau)=smooth( image_sortie(pos_eau),3 )
98     ;image_sortie(pos_terre)=image_entree(pos_terre)
99     WriteU,unit,image_sortie
100     print,i
101 endfor
102
103 free_LUN,unit
104 ENVI_SETUP_HEAD,data_type=4,fname=file_name_out,interleave=0,ns=ns,$
105 nl=nl,nb=nb,/open,/write, wl=wavelengths

```

```
106  
107 ENVI_FILE_MNG,id=fid_in,/remove  
108  
109  
110 end
```

B Données Brutes et Traitées



FIGURE 27 – Image Pléaïde brute

Références

- [1] Domaine du Rayol, *Le Jardin des Méditerranées*, Domaine du Rayol. URL: <https://www.domainedurayol.org>
- [2] Conservatoire du Littoral, *Site officiel du Conservatoire du Littoral*, URL : <http://www.conservatoire-du-littoral.fr>
- [3] MedWet, *La Posidonie, le poumon de la Méditerranée*, URL : <https://medwet.org/fr/2017/10/mediterranean-posidonia/>
- [4] GIEC, *Changement climatique 2021*, URL : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_French.pdf
- [5] Agathe Euzen, Laurence Eymard, Françoise Gaill, *Le Développement Durable à Découvert*, URL : <https://books.openedition.org/editionscnrs/10644>,
- [6] Technique de l'ingénieur, *Protéger les herbiers de posidonies de l'ancrage des bateaux*, URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/protéger-les-herbiers-de-posidonies-de-lancrage-des-bateaux-123059/>
- [7] Gilles Clément, *Site officiel de Gilles Clément*, URL : <http://www.gillesclement.com>
- [8] Airbus Defence and Space, *Satellite Imagery*, Airbus. URL: <https://www.intelligence-airbusds.com>
- [9] Centre National d'Études Spatiales (CNES), *Dinamis Catalogue*, Disponible sur : <https://www.dinamis.fr>
- [10] Litto3D, *Litto3D - Le projet national de cartographie du littoral*, SHOM et IGN. URL: <https://www.shom.fr/fr/page/litto3d>
- [11] Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), *SHOM - Official Hydrographic Service*, SHOM. URL: <https://www.shom.fr>
- [12] QGIS Development Team, *QGIS User Guide*. QGIS, 2020. URL: https://docs.qgis.org/3.10/en/docs/user_manual/index.html
- [13] Harris Geospatial Solutions, *ENVI User's Guide*. URL: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/usingenvi.html>