

Étude de la répartition spatiale des déchets marins flottants au sein de la mer Égée

Emilie Mathis

▶ **To cite this version:**

Emilie Mathis. Étude de la répartition spatiale des déchets marins flottants au sein de la mer Égée : à partir d'un modèle théorique prédictif et d'images satellites sentinel-2. Géographie. 2021. hal-03371254

HAL Id: hal-03371254

https://univ-fcomte.hal.science/hal-03371254

Submitted on 8 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

ETUDE DE LA RÉPARTITION SPATIALE DES DÉCHETS MARINS FLOTTANTS AU SEIN DE LA MER EGÉE

À PARTIR D'UN MODÈLE THÉORIQUE PRÉDICTIF ET D'IMAGES SATELLITES SENTINEL-2



M2 AIDE À LA DÉCISION EN AMÉNAGEMENT URBAIN ET RÉGIONAL (ADAUR)
PARCOURS SCIENCE DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE POUR L'INNOVATION TERRITORIALE (SIGIT)

UFR SLHS - Sciences du Langage, de l'Homme et de la Société

Auteur :
MATHIS Emilie

Tuteurs professionnels :
GRANDJEAN Tim
BROWNING Billy

Tuteur universitaire :
LAGESSE Claire

2021

Sommaire

I. Introduction 4
A. Définitions 4
1. Définition du plastique 4
2. Définition des macroplastiques 5
3. Dangers des microplastiques 6
B. Réglementations concernant le plastique 9
1. Réduction du plastique « à la source » 9
2. Prévention pour une meilleure gestion du plastique 10
3. Récupération du micro et du macroplastique 11
C. La télédétection comme réponse à un manque de données d'observation 13
1. Problématique autour de la collecte de données 13
2. Modèles théoriques de circulation 13
3. Avantages de la télédétection 15
II. Problématique 17
A. Hypothèses 17
B. Questionnement 17
III. Contexte 18
A. Contexte thématique 18
1. Définition de la conservation marine 18
2. Présentation de l'Institut de Conservation Marine Archipelagos 18
3. Les projets de déchets marins (Plastic Litter Projects) 20
B. Contexte institutionnel 21
1. Projets pouvant être soutenus 21
2. Projets devant être combattus 22
C. Contexte spatial 22
1. Localisation des différentes bases d'Archipelagos 22
2. Contexte spécifique de la base de Lipsi 23
IV. Objectifs 24
A. Définition des objectifs principaux 24
1. Objectif principal 24
2. Objectif secondaire 24
B. Définition des étapes pour répondre à l'objectif principal 24

1. Récupération des images satellites 25
2. Traitement des images satellites 25
V. Données et méthode 26
A. Récupération des images satellites 27
1. Définition des zones et périodes d'étude 27
2. Téléchargement des images satellites 29
B. Traitement des images satellites 30
1. Calcul de l'Indice des Débris Flottants (FDI) et de l'Indice de Végétation (NDVI) après rééchantillonage 31
2. Classification 34
VI. Résultats et discussion 42
A. Comparaison des résultats obtenus à la réalité 42
B. Limites rencontrées 45
C. Pistes d'amélioration 46
VII. Conclusion 47
Table des illustrations 48
Bibliographie 50
Sitographie 52

I. Introduction

En 2013, le jeune hollandais Boyan Slat a été reconnu comme l'un des 20 jeunes entrepreneurs les plus prometteurs au monde par Intel EYE50. En 2015, il est devenu le plus jeune lauréat de la plus haute distinction environnementale de l'Organisation des Nations-Unies (ONU), à savoir « Champion de la Terre ».[1] Au même moment, son projet Ocean Cleanup est choisi par le magazine TIME comme l'une des meilleures inventions de l'année. Celui-ci consiste à nettoyer les gyres de déchets au sein des océans. En effet, c'est plus de 5 trillions de morceaux de plastiques qui jonchent actuellement les mers. Ils s'accumulent d'ailleurs dans cinq zones principales à travers le globe, la plus grande étant située entre Hawaï et la Californie. Cette accumulation est aujourd'hui un véritable problème, que ce soit pour les écosystèmes, la santé ou les économies des différents pays. Pour Boyan Slat, il est donc urgent de le résoudre, à la fois en réduisant la source, à savoir la production de plastique, mais aussi en retirant ce qui s'est déjà accumulé. Mais l'océan est grand, et le nettoyer avec les méthodes conventionnelles, à savoir navires et filets, prendrait des milliers d'années et coûterait des milliards d'euros. En effet, la pollution plastique s'étend sur des millions de kilomètres carrés et se déplace dans toutes les directions. C'est pourquoi il a eu l'idée de concentrer le plastique avant de pouvoir l'éliminer efficacement de l'océan. Pour cela, il utilise un long flotteur qui se trouve à la surface de l'eau avec une bâche suspendue en-dessous. Celle-ci, en plus d'empêcher les débris de s'échapper en-dessous du flotteur, les conduit dans un système de rétention. Celui-ci est ralenti grâce à une ancre de mer, permettant ainsi d'attraper le plastique, plus rapide. Une fois le système rempli, un navire faisant office de camion-poubelle vient retirer le plastique collecté, allant de petits morceaux de quelques millimètres à de gros débris. D'après les prévisions, le déploiement de ce système de nettoyage à grande échelle permettrait de nettoyer 50 % du plus grand gyre de déchets dans le Pacifique en seulement cinq ans. Et si le même système venait à être déployé dans les cinq zones, et ce combiné avec la réduction de la production de plastique, le projet Ocean Cleanup pense pouvoir éliminer 90 % du plastique contenu dans les océans d'ici 2040.[2]

A. Définitions

1. Définition du plastique

Premièrement, il convient de s'interroger sur ce que nous entendons par « plastique ». D'après le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL), est appelé plastique « toute matière synthétique basée sur l'emploi des macromolécules et transformables par moulage, formage, coulage, habituellement avec emploi de la chaleur et d'une pression » (Delorme 1962)[3]. De plus, le plastique, ou plutôt matière plastique, est apparu sur le marché au début du XXème siècle. Ses qualités comme la résistance aux chocs et aux variations de température, facilité de mise en forme et imputrescibilité,

[1] Clean Ocean Foundation, 'Who is Boyan Slat?'
[2] The Ocean CleanUp, 'Oceans'
[3] CNRTL, 'Plastique : définition'

en ont fait une matière qui est rapidement devenue indispensable, d'où le besoin de s'intéresser à sa composition[4].

À la base du plastique, on trouve un polymère, c'est-à-dire une macromolécule constituée de longues chaînes carbonées obtenue par la transformation du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Chaque polymère présente des propriétés, une structure et une taille propres, auxquels on peut ajouter différentes substances, charges, plastifiants ou autres additifs pour en améliorer les caractéristiques. Il existe donc aujourd'hui une grande variété de plastiques, parmi lesquelles on distingue généralement deux grandes catégories : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les thermoplastiques fondent sous l'effet de chaleur et se solidifient sous l'effet d'un refroidissement. Pour les thermodurcissables, la transformation est irréversible. Une fois formé, le plastique ne se déforme plus. Comme exemples, nous avons le polyéthylène basse densité (PEBD), inventé en 1933, qui est un produit souple et thermoplastique. Il sert majoritairement pour les sacs poubelles et les films d'emballage. Le polychlorure de vinyle (PVC) est lui aussi un polymère thermoplastique, très utilisé pour les tuyaux ou encore les cartes de crédit. Au contraire, les polyépoxydes, communément appelés « époxy », sont des plastiques thermodurcissables qu'on peut trouver, entre autres, dans les colles et les peintures. On trouve également aujourd'hui des plastiques d'origine biologique, produits à partir de sucre de canne, comme le polyéthylène (PE). Les fluoropolymères correspondent quant à eux à une famille de plastiques haute performance utilisés notamment comme retardateurs de flamme ou comme revêtement de réservoirs pour produits chimiques[4] Il reste encore le cas particulier des plastiques oxodégradables, aussi appelés « oxoplastiques », qui contiennent des additifs permettant d'oxyder le matériau plastique qui se décompose alors en fines particules. On retrouve dans cette dernière catégorie une grande partie du packaging alimentaire[5].

2. Définition des macroplastiques

Outre sa composition, le plastique peut aussi se distinguer par sa taille : on parle de macroplastique et de microplastique. Alors que le microplastique est généralement défini comme les particules ayant un diamètre inférieur à cinq millimètres, le macroplastique s'est défini par opposition comme étant les éléments en plastique ayant un diamètre supérieur ou égal à cinq millimètres. Cependant, ces deux classes ne sont pas encore normalisées au niveau international. Par exemple, Barnes et al. (2009) définissent les macro-débris à partir d'un diamètre supérieur à vingt millimètres. En 2013, la Commission européenne les définit comme étant les éléments en plastique supérieurs à vingt-cinq millimètres, tandis que d'autres études les définissent supérieurs à cinq centimètres ou encore supérieurs à un centimètre (Hartmann et al., 2019). De plus, le terme mésoplastique est parfois utilisé pour les plastiques de taille comprise entre cinq et vingt-cinq millimètres, d'où, dans ce cas, une définition du macroplastique au-delà de vingt-cinq millimètres. Par ailleurs, aux définitions de taille non standardisées s'ajoute une terminologie non clarifiée. En effet, de nombreux termes sont utilisés comme synonymes tels que « macro-déchets », « déchets anthropiques », « déchets plastiques », « débris en plastique », ce qui rend difficile une focalisation claire sur le problème des macroplastiques dans l'environnement au sein de la recherche[6].

[4] Futura Sciences, 'Plastique – Matière plastique : définition'
[5] Orme-Conseil, 'Microplastiques et Règlement REACH'
[6] Encyclopedia, 'Macroplastic'

Au niveau de sa production, on estime qu'en 2018, 359 millions de tonnes de plastique ont été produites dans le monde, dont plus de la moitié provenait d'Asie (51 %), puis de Chine (30 %), du Japon (4 %) et du reste de l'Asie (17 %). En Europe, 61,8 millions de tonnes, soit 17,2 % de la production mondiale, ont été produites. L'industrie de l'emballage en est le principal consommateur, avec 39,9 % du plastique produit, tandis que l'industrie de la construction (19,8 %), l'industrie automobile (9,9 %), l'industrie électronique (6,2 %), les ménages et les loisirs (4,1 %) et l'agriculture (3,4 %) n'en consomment qu'une part relativement faible. Mais le vrai problème est que le macroplastique se retrouve la plupart du temps rejeté dans l'environnement, que ce soit par voie terrestre ou océanique. Les voies d'entrée terrestres comprennent les déchets plastiques mal gérés sur les côtes (75,5 %, à savoir 8 millions de tonnes) et les déchets plastiques mal gérés à l'intérieur des terres (18,9 %, à savoir 2 millions de tonnes). Quant aux voies d'entrée océaniques, elles comprennent les déchets provenant des activités de navigation et de pêche et l'élimination illégale des déchets en haute mer (5,6 %, à savoir 0,6 million de tonnes) (Billard et al., 2019, et Jambeck et al., 2015)[7]. A World Wide Fund for Nature (WWF) de rappeler en 2019 qu'un tiers des déchets plastiques produits dans le monde chaque année se retrouve abandonné dans la nature[8], ce que complète l'Agence Européenne des Produits Chimiques (ECHA) en ajoutant que c'est près de 5% du plastique produit qui se retrouve dans les océans[9].

Celui-ci a par ailleurs de graves conséquences sur l'environnement. En effet, d'après l'organisation The Animal Fund (TAF), au moins un million de goélands et cent mille mammifères marins meurent chaque année à cause de la pollution plastique. Les survivants d'au moins cent espèces, dont le Phoque moine d'Hawaï et la tortue Caouanne, pourraient disparaître à cause des débris de plastique[10]. Le Ministère de la Transition Ecologique en France ajoute que les filets de pêche abandonnés ou perdus continuent à piéger poissons, tortues, oiseaux et mammifères marins pendant plusieurs années, un phénomène appelé « pêche fantôme »[11]. On peut également lire dans le magazine *Le Point* l'histoire d'une tortue avalant un sac en plastique pensant que c'était une méduse. Le plastique avait alors provoqué des occlusions intestinales et elle aurait fini par mourir de faim si elle n'avait pas été secourue à temps[12]. Ce cas particulier témoigne de la réalité à laquelle sont confrontées les nombreuses espèces marines actuellement, sachant que la majorité n'ont pas la chance d'être secourues.

3. Dangers des microplastiques

Concernant le microplastique, il est donc défini comme le plastique de moins de cinq millimètres de diamètre, soit un diamètre inférieur à celui de la perle standard utilisée en bijouterie. L'organisation scientifique et éducative non lucrative « National Geographic Society » (NGS) les définit comme de « minuscules particules de plastique », réparties en deux catégories : les microplastiques primaires et les microplastiques secondaires. Les microplastiques primaires sont les minuscules particules destinées à un usage commercial, comme les « microbilles » dans les cosmétiques, ou encore les microfibres qui se détachent des vêtements et autres textiles comme les filets de pêche.

[7] Encyclopedia, 'Macroplastic'
[8] Futura Sciences, 'Plastique – Matière plastique : définition'
[9] ECHA, 'Microplastiques'
[10] The Animal Fund, 'Environnement des dauphins'
[11] Ministère de la Transition Ecologique, 'Déchets marins'
[12] Le Point, 'Tortues et dauphins, premières victimes des sacs en plastique'

Les microplastiques secondaires sont au contraire les particules qui résultent de la dégradation de produits en plastique plus grands, comme les bouteilles d'eau[13]. Cette dégradation est causée par l'exposition à des facteurs environnementaux comme l'exposition au soleil ou à l'action des vagues. En effet, la photodégradation peut réduire l'intégrité structurelle des déchets plastiques à une taille finalement indétectable à l'œil nu, ce processus de décomposition de grandes matières plastiques en morceaux beaucoup plus petits étant appelé fragmentation[14].

Mais le problème du microplastique et du plastique en général est qu'il ne se décompose pas facilement en molécules inoffensives. Le plastique peut mettre des centaines ou des milliers d'années à se décomposer et ainsi impacter l'environnement dans lequel il évolue. Sur les plages, on trouve les microplastiques sous la forme de petits morceaux de plastique multicolores, alors que dans les océans, ils sont souvent consommés par les animaux marins[15]. En effet, des microplastiques ont été trouvés dans plus de 114 espèces aquatiques provenant d'écosystèmes marins et d'eau douce en 2018, notamment dans le tube digestif et autres tissus. Les poissons et les oiseaux sont en effet susceptibles d'ingérer les microplastiques flottant à la surface de l'eau, les prenant pour de la nourriture. L'ingestion de microplastiques pourrait cependant amener ces espèces à consommer moins de nourriture et donc à avoir moins d'énergie pour assurer leurs fonctions vitales, ce qui pourrait entraîner une toxicité neurologique et reproductive[16]. Pourtant, d'après la NGS, des microplastiques ont déjà été détectés dans les organismes marins allant du plancton aux baleines, en passant par les fruits de mer commerciaux. Même l'eau potable n'est pas épargnée, les installations standard de traitement des eaux ne permettant pas encore d'éliminer toutes les traces de microplastiques. Par ailleurs, il se pourrait que les microplastiques présents dans l'océan puissent se lier à d'autres produits chimiques nocifs avant d'être ingérés par les organismes marins, ce qui pourrait constituer un danger pour les individus qui les consomment[15] Enfin, les microplastiques pourraient également être une source de pollution atmosphérique, sous forme de poussières et de particules fibreuses en suspension dans l'air[16]. Comme pour la consommation, les effets sur la santé humaine ou animale de l'inhalation de microplastiques sont encore inconnus[15].

Pourtant, c'est chaque année plus de trois millions de tonnes de particules microplastiques qui sont rejetées dans la mer. Pour 46 échantillons prélevés dans la colonne d'eau épipélagique et mésopélagique à Monterey Bay en 2017, à savoir à des profondeurs comprises entre 5 et 1000 mètres, les quatre concentrations les plus élevées de microplastiques (plus de dix particules par mètre cube) ont été trouvées à des profondeurs de 200 et 600 mètres. De plus, début 2016, après plus de six mois de mesures effectuées sur 18 sites en mer au large de New York, il a été estimé que 165 millions de pièces en plastique (soit plus de 250 000 / km²) ont été rejetées dans la mer, dont 85 % avaient une taille inférieure à 5 millimètres. Dans d'autres études publiées en 2018, on peut lire qu'entre 33 et 75 143 particules ont été découvertes par litre de glace de mer entre 2014 et 2015, et qu'en Méditerranée, 1,25 millions de fragments par kilomètre carré ont été détectés[14].

Néanmoins, selon une étude réalisée par l'UICN, seulement 2 % des microplastiques rejetés dans les océans proviennent des activités en mer, la grande majorité (98 %) provenant des activités à terre, étant ensuite transportés par les tempêtes, ruissellements et vents. La majorité de ces particules provient du lavage des textiles synthétiques (35 %) et de l'abrasion des pneus de véhicules automobiles (28 %). Viennent ensuite les poussières fines des villes (24 %), l'élimination des marques sur les routes (7 %), les résidus de revêtements de navires (3,7 %), les résidus de produits cosmétiques (2 %) et les

[13] National Geographic Society, 'Microplastics'
[14] AquaPortail, 'Microplastique : définition et explications'
[15] National Geographic Society, 'Microplastics'
[16] Encyclopedia Britannica, 'Microplastics: definition, properties and plastic pollution'

granulés en plastique (0,3 %). Ces plastiques atteignent par la suite les mers principalement par les égouts routiers (66 %), les systèmes de traitement des eaux usées (25 %) et par le vent (7 %). Concernant l'abrasion des pneus, elle est la principale source de microplastiques dans les rivières et les lacs. Néanmoins, selon leurs propres études, les fabricants de pneumatiques supposent que leurs particules d'abrasion n'ont pas d'effet toxique significatif sur l'environnement, mais selon d'autres, elle est une source de caoutchouc, de suie et d'oxydes de métaux lourds tels que le zinc, le plomb, le chrome, le cuivre et le nickel[17].

Le danger des microplastiques et du plastique en général est donc qu'il a plusieurs sources et qu'il « transite » par différentes voies de transport avant d'entrer dans les océans. En effet, le schéma[18] ci-dessous montre bien que la source peut être soit directement humaine, en jetant par exemple des déchets à la mer, soit indirectement humaine, par exemple lorsque des déchets sont incinérés et que le vent et la pluie les amènent dans l'eau douce puis dans l'océan. De même, dans un cas, l'entrée est directe, le déchet étant jeté à la mer, et dans l'autre, l'entrée est indirecte car le déchet est jeté pour être incinéré puis se retrouve dans l'océan à la suite de l'action du vent et de la pluie. De plus, la source dominante est bien terrestre, les bilans massiques combinés des activités intérieures et côtières étant plus de dix fois supérieurs au bilan massique des activités maritimes d'après les estimations.

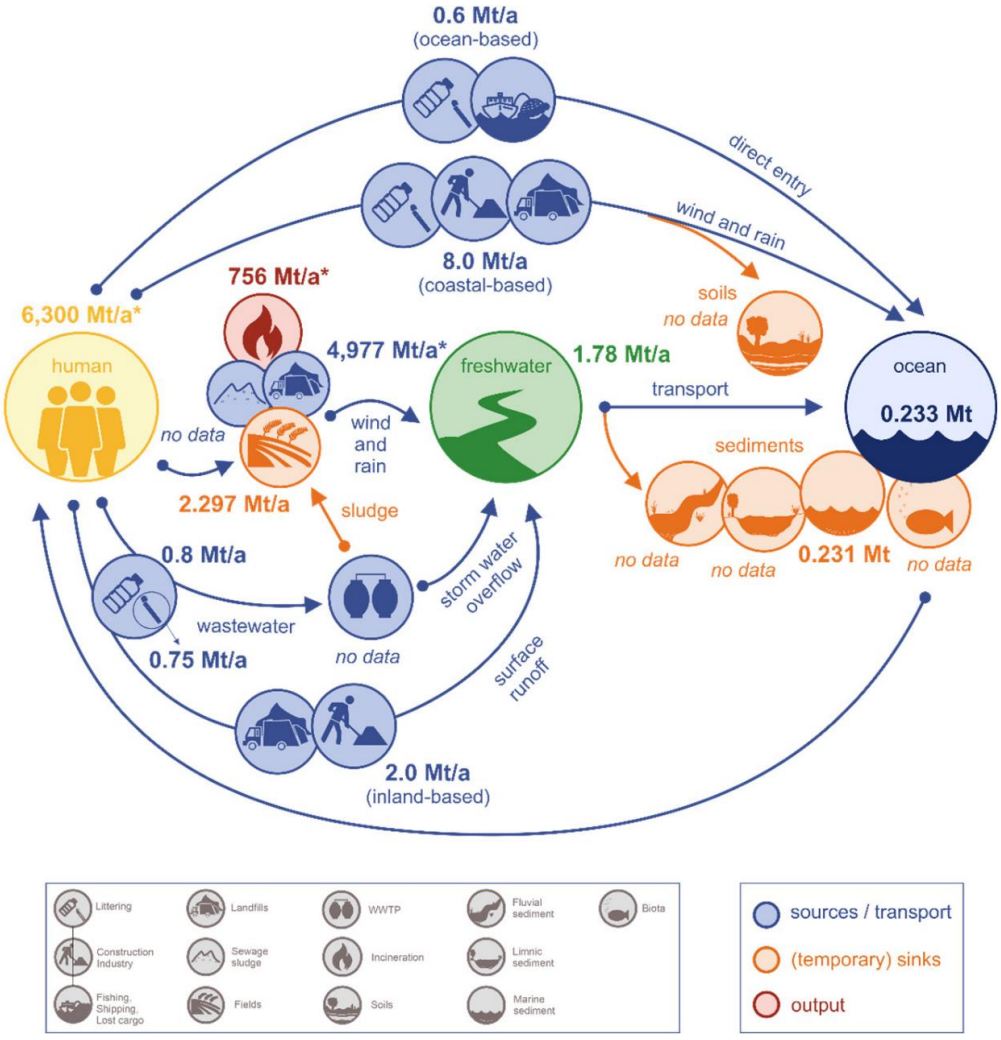


Illustration 1. Sources et voies de transport du plastique avec comptabilisation approximative du bilan massique si données disponibles, d'après des données de 2015, Encyclopedia

[17] AquaPortail, 'Microplastique : définition et explications'
[18] Encyclopedia, 'Macroplastic'

B. Réglementations concernant le plastique

En raison de craintes pour l'environnement et la santé humaine, plusieurs États membres de l'Union européenne ont adopté ou proposé des interdictions nationales relatives à l'utilisation intentionnelle de microplastiques dans certains produits de consommation. Ces interdictions visent à réduire le plastique « à la source » et concernent principalement les « microbilles » dans les produits cosmétiques rincés après usage dans lesquels les microplastiques sont utilisés comme agents abrasifs et de polissage[19]. Au niveau européen, la Commission Européenne a demandé en 2017 à l'Agence Européenne des Produits Chimiques (ECHA) d'évaluer les données scientifiques dans le but de prendre des mesures réglementaires au niveau de l'Union Européenne (UE) sur les microplastiques qui sont intentionnellement ajoutés aux produits (c'est-à-dire les substances et les mélanges), afin d'harmoniser les interdictions nationales. En 2019, l'ECHA a proposé une restriction de grande ampleur pour les microplastiques dans les produits mis sur le marché de l'UE / Espace Economique Européen (EEE) afin d'éviter ou de réduire leur rejet dans l'environnement. Cette proposition pourrait en effet permettre d'éviter le rejet de 500 000 tonnes de microplastiques sur une période de 20 ans[19]. Par ailleurs, en 2016, l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) a analysé les éléments probants disponibles concernant les nanoplastiques et les microplastiques dans les aliments. Les experts ont jugé nécessaire de produire davantage de données sur leur concentration dans les aliments et sur les effets qu'ils pourraient avoir pour la santé humaine. À cette fin, l'EFSA prévoit d'organiser un colloque scientifique en 2021 pour discuter de l'état actuel de la situation et des recherches en cours dans ce domaine[19]. La réglementation REACH encadre en outre le marché européen des produits chimiques. L'objectif de ce réglement est d'améliorer la connaissance des dangers chimiques et la protection de la santé humaine et environnementale. Certaines substances, évaluées comme dangereuses ou fortement préoccupantes (cancérogène, reprotoxique, bioaccumulable) sont dorénavant soumises à une autorisation pour pouvoir être fabriquées ou utilisées, alors que d'autres sont soumises à une restriction. Le 30 janvier 2019, une première restriction des microplastiques a été proposée en raison des propriétés extrêmement persistantes du microplastique (effet « sans seuil »). Les mesures de gestion des risques actuelles ayant été estimées insuffisantes, le risque a été évalué comme inacceptable. Si cette proposition est adoptée, elle permettrait de réduire l'émission de 400 000 tonnes de microplastiques, sur une période de 20 ans à compter de l'entrée en vigueur de la restriction, avec un coût est estimé à 9.4 milliards d'euros[20]. Enfin, au niveau mondial, une résolution de l'Organisation des Nations Unies (ONU) de 2017 a discuté des microplastiques et de la nécessité d'une réglementation pour réduire ce danger pour les océans, leur faune et leur flore, et la santé humaine[21].

1. Réduction du plastique « à la source »

Cette approche de réduction « à la source » comprend aussi le remplacement de produits en plastiques à usage unique par des produits réutilisables, notamment en inox ou silicone. En effet, la loi sur la transition énergétique et la croissance verte du 17 août 2015 avait mis fin à la distribution, à titre onéreux ou gratuit, des sacs de caisse en plastique à usage unique destinés à l'emballage de marchandises dans les points de vente. Cette loi devait être étendue à d'autres produits en plastique

[19] ECHA, 'Microplastiques'
[20] Orme-Conseil, 'Microplastiques et Règlement REACH'
[21] National Geographic Society, 'Microplastics'

à usage unique à l'horizon 2020-2021 tels que les pailles, ou encore la vaisselle jetable (gobelets, verres et assiettes), les bouteilles d'eau en plastique dans les cantines scolaires, les touillettes dans la restauration, la vente à emporter, les cantines et les commerces alimentaires, et les cotons-tiges en plastique[22]. L'utilisation de produits réutilisables est de plus une approche « à la mode », des boutiques comme Leaves and Clouds, créée par Marie Lopez, ne cessant de croître, que ce soit en nombre de salariés ou en quantités de produits proposés.

2. Prévention pour une meilleure gestion du plastique

En parallèle de ces stratégies d'action sont menées des stratégies de sensibilisation. En effet, le groupe d'experts du Programme de l'Organisation des Nations Unies (ONU) pour l'environnement a engagé dans plus de 100 pays des campagnes éducatives visant à sensibiliser à la pollution plastique et à encourager la réutilisation et le recyclage des plastiques[23]. The Animal Fund (TAF) a quant à elle organisé une campagne de sensibilisation afin de faire cesser l'utilisation de bouteilles en plastiques. L'idée était de rassembler des enfants et des adultes pour des activités amusantes, instructives et éducatives, avec notamment la collaboration de Pierre Frolla, triple recordman de plongée en apnée. Il s'agissait par exemple de « jouer » à jeter la bouteille à la poubelle, pour encourager à jeter des bouteilles dans les conteneurs jaunes comme un rappel à recycler, ou de « jouer » à déguster l'eau, ce qui consistait à boire de l'eau du robinet et de l'eau en bouteille en devinant de quel type d'eau il s'agissait, le but étant de faire comprendre que l'eau du robinet était aussi bonne que celle d'une eau en bouteille. La campagne a d'ailleurs été soutenue par « Monaco Info », une chaîne de télévision qui a pu être présente sur la plage de Larvotto, ce qui a participé à la diffusion de cette lutte contre les bouteilles en plastique dans le quotidien[24]. Pour les campagnes de sensibilisation par rapport à la pollution plastique des plages, on peut penser à l'initiative menée à Berck-sur-Mer, station balnéaire du Pas-de-Calais, qui a mis en place des bacs à marée afin de permettre aux promeneurs souhaitant ramasser les déchets échoués ou abandonnés sur la plage de les déposer dans des lieux dédiés. Les bacs à marée constituent également un support pédagogique pour les scolaires ainsi qu'un moyen de sensibiliser à la protection de la faune et la flore locales[25]. Une autre initiative est celle des ambassadeurs du tri qui sillonnent chaque année les 26 communes du Syndicat Intercommunal de Transport et de Traitement des Ordures Ménagères de l'Aire Toulonnais (Sittomat) pour sensibiliser les vacanciers au geste du tri. Un guide du tri en cinq langues et des sacs permettant d'effectuer le tri sur le lieu de vacances sont distribués dans les campings, résidences de vacances et capitaineries, avec des ambassadeurs présents tout l'été sur les marchés, les plages et lors de manifestations organisées par les villes[25] Enfin, pour la sensibilisation à la pollution plastique des océans, on peut citer en exemple le défenseur français de Manchester City Benjamin Mendy qui s'est engagé, à l'occasion de la Journée Mondiale du Climat du 8 décembre 2020, avec Sea Cleaners, l'Organisation Non Gouvernementale (ONG) du navigateur Yvan Bourgnon. Dans un clip d'une durée d'une minute et sur le ton de l'ironie, le footballeur se met en scène en train de préparer à une petite fille du poisson « pas né », car la pollution, due notamment aux emballages plastiques, aurait raréfié ou fait disparaître les poissons. « D'ici 2050, il y aura plus de plastique que de poissons dans la mer », peut-on également lire dans ce spot qui entre dans le cadre d'une opération à destination des collégiens. Et à Benjamin Mendy d'ajouter : « On doit tous réaliser que nos océans sont indispensables à notre survie car ils nous

[22] Ministère de l'Economie des Finances et de la Relance, 'Les objets jetables en plastiques interdits'
[23] Encyclopedia Britannica, 'Microplastics: definition, properties and plastic pollution'
[24] The Animal Fund, 'Campagne contre le plastique'
[25] Pavillon Bleu, 'Exemples d'actions en matière de gestion des déchets'

permettent de respirer et de nous nourrir. Il faut aussi penser à nos enfants derrière. On a fait appel à moi pour porter ce message et j'ai tout de suite dit oui car j'ai kiffé cet humour. Si avec The SeaCleaners je peux interpeller les jeunes, leur faire passer les bons messages et qu'ils les retiennent c'est parfait »[26].

3. Récupération du micro et du macroplastique

a. Pour le microplastique

Une autre stratégie de réduction du plastique est d'éliminer ceux déjà présents dans l'environnement. La première option est celle du recyclage. Pourtant, l'ECHA estime que ce sont seulement 30 % des 25 millions de tonnes de déchets plastiques produits qui sont recyclés. En d'autres termes, la Commission Européenne constate que ce sont seulement 5 % de la valeur des matériaux d'emballage en plastiques qui restent dans l'économie, les 95 % restants étant perdus au terme d'une première utilisation très brève. C'est pourquoi l'Europe s'est dotée d'une stratégie européenne sur les matières plastiques, à savoir recycler la totalité des emballages en plastique d'ici 2030, réduire la consommation des produits en plastique à usage unique et limiter l'utilisation intentionnelle de microplastiques, en accord avec la réglementation REACH développée précédemment[27]. Quant à la seconde option, ce serait de retirer le plastique de l'environnement. Pour les microplastiques, l'idée serait d'utiliser des micro-organismes capables de décomposer les polymères synthétiques des microplastiques, un certain nombre d'espèces bactériennes et fongiques possédant des capacités de biodégradation, ce qui décompose des produits chimiques tels que le polystyrène, le polyester, le polyuréthane ou encore le polyéthylène. Ces micro-organismes pourraient donc potentiellement être appliqués aux eaux usées et autres environnements contaminés[28]. Il existe un autre projet qui a reçu un financement de l'Union Européenne, à savoir le projet GoJelly. Son objectif est de « développer, tester et promouvoir une solution gélatineuse à la pollution par les microplastiques en développant un prototype de filtre à microplastiques TRL 5-6 à usage commercial et public, dont la principale matière première [serait] le mucus de méduse ». L'idée serait donc de s'attaquer à deux problèmes environnementaux par une seule et même approche en éliminant la pollution marine et côtière des méduses et des microplastiques, destructeurs sur les plans économiques et environnementaux[29]. Enfin, une étude menée par Anna Sanchez-Vidal et ses collègues de l'Université de Barcelone révèle le rôle que pourrait avoir la posidonie dans la capture et l'élimination du plastique marin. En effet, après avoir mesuré la quantité de débris plastiques recueillis dans les feuilles de posidonie échouées sur différentes plages de Majorque entre 2018 et 2019, il s'est avéré que parmi les échantillons de feuilles de posidonie, 50 % contenaient des débris de plastique, et que parmi les boules de posidonie, plus connues sous le nom d'aegagropilae ou boules de Neptune, 17 % contenaient des débris de plastique[30]. À partir de ces données et d'estimations de la production de posidonie en Méditerranée, il se pourrait que les prairies sous-marines méditerranéennes puissent piéger jusqu'à 867 millions de morceaux de

[26] Sport Stratégies, 'Benjamin Mendy s'engage dans une campagne de sensibilisation à la pollution des océans'
[27] Orme-Conseil, 'Microplastiques et Règlement REACH'
[28] Encyclopedia Britannica, 'Microplastics: definition, properties and plastic pollution'
[29] Science Connect, 'GoJelly'
[30] Sanchez-Vidal et al., 'Seagrasses provide a novel ecosystem service by trapping marine plastics'

plastique dans les seules boules de Neptune chaque année, bien que le nombre de ces débris transportés vers le rivage et le sort du plastique une fois rejeté sur le rivage soient encore inconnus[31].

b. Pour le macroplastique

D'autres solutions existent encore pour éliminer les macroplastiques. Tout d'abord le ramassage de déchets, notamment sur les plages. On peut penser à The Beach Clean Project, une organisation étudiante pour les étudiants qui lance régulièrement des opérations « plages propres » à Cornwall, en Angleterre, où des volontaires collectent les déchets plastiques échoués sur les plages[32]. Par ailleurs, pour les déchets contenus dans les ports, rivières et océans, il existe d'autres solutions innovantes. Un premier exemple est le robot Jellyfishbot, créé par l'entreprise IADYS (Interactive Autonomous DYnamic Systems), qui conçoit, développe et commercialise des innovations à la croisée de l'Intelligence Artificielle et de la Robotique[33]. En effet, ce petit robot électrique est capable de collecter les déchets et les hydrocarbures à la surface de l'eau. Il est particulièrement efficace dans les zones abritées telles que les ports, marinas, lacs, canaux mais aussi bases de loisirs, résidences hôtelières et installations industrielles. Grâce à ses différents types de filets (macro-déchets ou hydrocarbures jetables, macro-déchets réutilisables et 100% recyclés, milli-déchets, et micro-déchets), les déchets collectés peuvent être très variés, allant du plastique (bouteilles, emballages, mégots de cigarettes) au verre, en passant par le métal (canettes, déchets organiques, déchets naturels ou d'algues flottantes). Le robot peut également collecter tous les types d'hydrocarbures tels que des irisations ou des formes plus visqueuses (huiles, gasoil, kérosène, essence)[32]. Une autre solution tout à fait novatrice est celle du rideau à bulles d'air proposé par Probul. Le principe de leur rideau est de rediriger les débris flottants en étant positionné de façon stratégique au large des plages et des entrées de canal et en repoussant ainsi les algues et les débris vers des zones moins sensibles. Composé de la technologie Tuyau-Bulle® qui se positionne au fond du milieu aquatique, un ou plusieurs compresseurs injectent de l'air comprimé dans la partie supérieure du tuyau, ce qui forme un rideau de bulles d'air remontant jusqu'à la surface de l'eau. Ces bulles constituent alors une barrière plus ou moins dense et plus ou moins souple, créant un courant horizontal circulant dans les deux sens et bloquant les débris flottants. L'idée de ce dispositif est donc avant-tout de stopper le plastique en route vers l'océan et d'amener le plastique au bord des rivières et des canaux pour le récupérer facilement[34]. Pour récupérer les débris flottants au sein des océans, il faudrait donc se tourner vers des projets comme ReCleanSea, dont l'objectif est de collecter les macroplastiques flottants avant qu'ils ne se dispersent sur les plages, qu'ils ne coulent ou qu'ils ne se fragmentent en morceaux plus petits et irrécupérables. ReCleanSea est une association française à but non-lucratif, créée pour optimiser et amplifier la collecte des déchets plastiques flottants en milieu aquatique à grande échelle, tout en favorisant leur recyclage ou leur transformation au bénéfice des communautés locales[35]. En estuaire ou le long des rivages, la collecte se fait à l'aide d'un ou de deux petits bateaux (de pêche ou de promenade) qui remorquent le collecteur de plastique pour récolter les déchets. Le ratissage est effectué en surface et à faible vitesse, ce qui permet aux poissons d'échapper au filet en passant par-dessous. La poche de collecte est vidée à terre, de retour au port, au moyen d'une petite grue ou d'un palan. Cependant, pour nettoyer les « hotspots », où des tonnes de déchets plastiques s'accumulent sous l'effet du vent ou des courants,

[31] Sanchez-Vidal et al., 'Seagrasses provide a novel ecosystem service by trapping marine plastics'
[32] The Beach Clean Project, 'About us'
[33] Interactive Autonomous DYnamic Systems, 'Home'
[34] Probul, 'Rideaux de bulles, redirection des déchets flottants'
[35] ReCleanSea, 'Home'

un système XXL serait nécessaire. Ce type d'engin de plusieurs centaines de mètres de large pourrait être tracté par un navire spécifique, qui pourrait trier et stocker les plastiques en ballots, voire les traiter à bord en mêlant recyclage et pyrolyse[36]. Mais pour l'instant ReCleanSea n'en est qu'aux plans d'un tel projet, contrairement au projet Ocean CleanUp qui fonctionne sur la même idée. Enfin, une dernière initiative intéressante à développer est celle de l'organisation Race for Water et de leur bateau « The Collector »[37]. Cette solution est pertinente pour les bords de mer, les rivières et les lacs, le Collector étant un navire polyvalent de récupération de déchets dans l'eau. En effet, ce bateau est capable de nettoyer 5 000 m^2/h grâce à son tapis convoyeur en inox. Ses coques fines lui permettent d'atteindre une vitesse de 12 nœuds et le tapis peut être prêt en deux minutes, ce qui permet d'agir rapidement en cas de pollution localisée. Sa grande parcelle avant facilite le débarquement et permet de nettoyer les plages les plus inaccessibles, et sa porte latérale et la plateforme arrière permettent un stockage et un transfert rapide de quatre conteneurs de 240 litres[38].

C. La télédétection comme réponse à un manque de données d'observation

1. Problématique autour de la collecte de données

Pour éliminer microplastiques et macroplastiques, de nombreux projets ont vu le jour et œuvrent au nettoyage des océans. Cependant, les solutions proposées sont souvent très localisées, que ce soit pour nettoyer un port, une rivière ou le bord d'une côte. En mer, les équipes interviennent plutôt aléatoirement en récupérant les déchets qu'ils croisent « sur la route », à l'exception des interventions à la suite d' « accidents », notamment pour les hydrocarbures. En effet, à l'heure actuelle, les données d'observation sont encore insuffisantes pour décrire la distribution des déchets marins. Cela est en partie dû aux nombreuses difficultés techniques, les campagnes de quantification étant généralement limitées aux régions côtières et dépendantes des conditions météorologiques (Arcangeli et al., 2018 ; Cózar et al., 2015 ; Faure et al., 2015 ; Gajšt et al., 2016 ; Ruiz-Orejón et al., 2016 ; Schmidt et al., 2018 ; Suaria et Aliani, 2014 ; van der Hal et al., 2017). De plus, les méthodes d'observation diffèrent selon les équipes et organismes, ce qui ne rend pas toujours les résultats comparables. C'est pour ces raisons que la modélisation numérique est nécessaire pour avoir un aperçu des mécanismes et des modèles de dispersion des déchets marins flottants[39].

2. Modèles théoriques de circulation

a. Modèle de circulation pour la Méditerranée

Pour ce qui est de la Méditerranée, les concentrations estimées par les modèles globaux diffèrent considérablement des observations à disposition, tant en termes de quantification que de distribution spatiale (Van Sebille et al., 2015). Ceci est partiellement dû au fait que le bassin méditerranéen possède sa propre circulation thermohaline, et un champ mésoéchelle complexe qui

[36] Probul, 'Rideaux de bulles, redirection des déchets flottants'
[37] Race for Water, 'Le Collector'
[38] ReCleanSea, 'Accueil'
[39] Soto-Navarro et al., '3D hotspots of marine litter in the Mediterranean'

comprend des fronts, des filaments et des tourbillons, que les modèles globaux ne sont pas en mesure de reproduire (Calafat et al., 2012 ; Millot, 1999 ; Poulain et al., 2012). Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser dans cette région des modèles régionaux à haute résolution qui sont capables de modéliser ces processus pour reproduire avec précision la circulation du bassin (Beuvier et al., 2012, 2010 ; Escudier et al., 2016 ; Herrmann et al., 2008 ; Sannino et al., 2015). Ces dernières années, peu d'études de modélisation de la concentration des déchets marins en Méditerranée ont été réalisées, pourtant elles s'appuyent principalement sur des modèles lagrangiens de dispersion de particules basés sur des champs de courant obtenus à partir de modèles de circulation régionaux à haute résolution. Ces travaux incluent ceux analysant l'ensemble du bassin (Liubartseva et al., 2018 ; Macias et al., 2019 ; Mansui et al., 2015) mais aussi des régions spécifiques telles que les mers Adriatique, Ligure, Tyrrhénienne ou Égée (Fossi et al., 2017 ; Liubartseva et al., 2016 ; Palatinus et al., 2019 ; Politikos et al., 2017). Cependant, les résultats de toutes ces études sont disparates et soulignent la difficulté d'une tâche compromise par le manque d'informations précises sur les sources et la quantité totale de déchets marins qui sont rejetés dans le bassin[40].

b. Modèle de circulation pour la Mer Egée

Si l'on se focalise maintenant sur la mer Egée, sa circulation générale de surface est caractérisée par des schémas complexes composés de flux cycloniques à l'échelle du bassin, de gyres récurrents à l'échelle du sous-bassin, de tourbillons transitoires et d'autres caractéristiques à méso-échelle. L'afflux d'eaux à faible salinité en provenance de la mer Noire, par le détroit des Dardanelles, est considéré comme l'apport le plus important dans la mer Égée. La mer Noire s'écoule ensuite vers l'Ouest avec des bifurcations au Nord et au Sud-Ouest de la Mer Egée (Nittis et Perivoliotis, 2002). La partie Nord de la mer Égée est caractérisée par une circulation cyclonique globale avec un grand anticyclone semi-permanent, présent dans la partie Nord-Est qui est significativement influencée par l'afflux d'eaux à faible salinité en provenance de la mer Noire (Olson et al., 2007). D'autres caractéristiques importantes de méso-échelle sont les tourbillons cycloniques dans le bassin de Chios, le courant de frontière le long de la côte orientale de l'île d'Evia, le cyclone Myrtoan et le cyclone Crétois de l'Est. La circulation du Sud de la mer Égée est caractérisée par deux gyres cycloniques, deux tourbillons anticycloniques et d'autres structures à plus petite échelle, interconnectées par des courants et des jets, qui sont variables dans l'espace et le temps (Theocharis et al., 1999)[41].

Dans cette zone, un modèle retient particulièrement notre attention car c'est la première étude de modélisation du transport des débris marins flottants dans les eaux grecques. Il s'agit d'un modèle de circulation associé à un modèle de suivi de particules pour simuler la destination et la répartition des débris marins flottants dans la mer Egée (Méditerranée orientale)[41]. Ce modèle considère différentes régions sources de déchets et dates de rejet et cela sur la période 1990-2009. Les régions sources ont été basées sur les grandes villes côtières, les principales rivières, les ports, l'activité maritime et de pêche, et l'activité côtière, notamment touristique. Différentes expériences ont été menées puis modélisées pendant un an, pour ensuite être répétées pendant plusieurs années, à savoir de 1992 à 2009, afin de tenir compte de la variabilité saisonnière et interannuelle de la circulation de surface. L'objectif de l'expérience A était d'explorer la contribution des régions sources à la concentration finale des particules dans des zones spécifiques. Le but de l'expérience B était

[40] Soto-Navarro et al., '3D hotspots of marine litter in the Mediterranean'
[41] Politikos et al., 'Modeling the fate and distribution of floating litter particles in the Aegean Sea (E. Mediterranean)'

d'identifier les zones dans lesquelles les débris auraient tendance à se concentrer, et enfin l'expérience C de tester dans quelle mesure la mer Egée pouvait agir comme un récepteur de débris flottants provenant de l'extérieur de la mer Egée. A l'issue de ces expériences ont été créées trois catégories, à savoir les zones où les déchets marins flottants sont récurrents, les zones où ils sont occasionnels et enfin les zones où ils sont rares. Cependant, l'un des points les plus critiques de cette étude de distribution des déchets marins flottants est la validation des résultats avec des données d'enquêtes. En effet, les données sur la distribution des déchets flottants sont rares dans la mer Égée et insuffisantes pour valider rigoureusement les simulations[42].

3. Avantages de la télédétection

Si les modèles pouvaient parer le manque de données d'observation, ils nécessitent tout de même vérification empirique. Des observations continues sont donc nécessaires pour faire un bilan quantitatif et de répartition des déchets marins flottants, auquel un système de télédétection pourrait apporter une réponse[43]. A ce jour, plusieurs initiatives ont déjà été mises en place par des acteurs mondiaux et locaux pour la détection, la surveillance et le nettoyage des déchets marins flottants. En effet, les scientifiques et les décideurs politiques ont montré un intérêt croissant pour les applications potentielles des technologiques de télédétection dans la production de données sur les déchets marins, notamment pour l'identification, la quantification ou la cartographie[44].

La télédétection est en effet une technique d'acquisition à distance d'informations sur la surface terrestre, principalement fondée sur l'analyse d'images obtenues dans différentes gammes de longueurs d'onde à partir d'aéronefs ou de satellites[45]. Cette méthode d'acquisition utilise habituellement la mesure des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis des objets étudiés dans un certain domaine de fréquence (infrarouge, visible, micro-ondes). Ceci est rendu possible par le fait que les objets étudiés (plantes, maisons, surfaces d'eau ou masses d'air) émettent ou réfléchissent du rayonnement à différentes longueurs d'onde et intensités selon leur état[46]. Par ailleurs, la télédétection se révèle très utile pour observer des zones étendues et cela de manière fréquente[47]. En effet, les Systèmes Aériens sans Pilotes (UAS) offrent une surveillance « au-dessus de la tête » abordable et permettant la collecte d'informations à très haute résolution géospatiale (Colomina et Molina, 2014). Cela signifie que les UAS, les avions et les satellites ont la capacité de compléter les données sur les déchets marins obtenues par chalutage à la surface des océans (Garaba et al., 2018 ; Mace, 2012 ; Maximenko et al., 2016). De plus, l'imagerie obtenue dans le proche infrarouge (NIRSWIR) à partir des plateformes aéroportées et spatiales est aujourd'hui largement prévue comme une prochaine source d'informations concernant les déchets marins. En effet, les efforts visant à utiliser la télédétection pour la détection des plastiques ont déjà donné des résultats prometteurs, avec un nombre croissant de travaux démontrant un potentiel raisonnable de détection

[42] Politikos et al., 'Modeling the fate and distribution of floating litter particles in the Aegean Sea (E. Mediterranean)'
[43] Martínez-Vicente et al., 'Measuring marine plastic debris from space'
[44] Papakonstantinou et al., 'A citizen science unmanned aerial system data acquisition protocol and deep learning techniques for the automatic detection and mapping of marine litter concentrations in the coastal zone'
[45] Larousse, 'Définitions : télédétection'
[46] Techno-sciences, 'Télédétection : définition et explications'
[47] Topouzelis et al., 'Remote sensing of sea surface artificial floating plastic targets with Sentinel-2 and Unmanned Aerial Systems (Plastic Litter Project 2019)'

et de cartographie sur l'eau comme sur terre (Aoyama, 2016 ; Garaba et al., 2018 ; Garaba et Dierssen, 2018 ; Hörig et al., 2001 ; Novelli et Tarantino, 2015 ; Veenstra et Churnside, 2012). En outre, la communauté scientifique et les agences spatiales nationales travaillent aujourd'hui à l'élaboration de missions satellitaires pertinentes pour la détection et la quantification des déchets plastiques marins[48].

A cette fin, une première évaluation rassemblant les exigences d'observation pour la détection des déchets marins depuis l'espace a été publiée par Martínez-Vicente et al[49], suivie par d'autres articles apportant des compléments intéressants. Premièrement, Biermann et al montrent qu'il est possible de détecter des agrégats de macroplastiques flottant dans les eaux côtières en utilisant les données optiques acquises par les satellites Sentinel-2 de l'Agence Spatiale Européenne (ASE). Deuxièmement, en utilisant une approche de classification Naïve Bayes, ils montrent que les plastiques flottants peuvent être distingués des algues et d'autres matériaux naturels. Ces deux compléments ont été rendus possibles par le recueil de données optiques multispectrales à relativement haute résolution sur les eaux côtières. En effet, c'est dans le cadre du programme Copernicus, et en particulier grâce au satellite d'observation de la Terre Sentinel-2 pilotée par l'ASE que les données ont pu être récupérées, car bien qu'il s'agisse principalement d'une mission terrestre, les instruments multi-spectraux (MSI) à bord des satellites Sentinel-2A et 2B acquièrent également des images des eaux côtières à une résolution spatiale de 10 m tous les quelques jours. Ensuite, il leur fallait trouver un indice mettant en évidence les objets flottants à la surface des océans, à savoir l'Indice des Débris Flottants (FDI). Enfin, des cibles flottantes en plastiques étaient nécessaires afin d' « entraîner » les algorithmes[50]. A ce moment, il n'existait aucune donnée de référence permettant de comprendre le comportement spectral des plastiques dans l'environnement réel, ou de calibrer les algorithmes de télédétection et de valider leurs résultats. Pour résoudre ce problème ont été lancés les Plastic Litter Projects (PLP) en partenariat avec l'Université de la Mer Egée, avec pour objectif de construire de grandes cibles artificielles et de les déployer à la surface de la mer, le but étant d'explorer la faisabilité de la détection des plastiques dans l'environnement aquatique à partir de la mission satellitaire Copernicus Sentinel-2[51], et cela en extrayant des mesures spectrales significatives dans des scénarii quasi-réels afin de différencier les débris plastiques des objets naturels comme le bois flottant ou les algues[52].

[48] Topouzelis, Papakonstantinou, and Garaba, 'Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018)'
[49] Topouzelis et al., 'Remote sensing of sea surface artificial floating plastic targets with Sentinel-2 and Unmanned Aerial Systems (Plastic Litter Project 2019)'
[50] Springer Nature, 'Using satellites to detect plastic patches floating in coastal waters'
[51] AIR Centre, 'Networking Friday with Konstantinos Topouzelis (UAegean)'
[52] Mongabay, 'Satellite imagery is helping to detect plastic pollution in the ocean'

II. Problématique

A. Hypothèses

Cette étude se base sur les résultats du modèle théorique prédictif de Politikos et al.[52], résultats qui constituent nos hypothèses, à savoir que certaines zones ont tendance à regrouper plus ou moins de particules flottantes. Ainsi, nous supposons en accord avec ces résultats une présence récurrente de déchets marins flottants, et en particulier de plastique, dans le Nord de la mer Egée, à savoir au niveau du Détroit des Dardanelles, de Samothrace, de Limnos, de Thermaikos et des Sporades, dans le Golfe Saronique et sur la côte Est d'Evia. Nous supposons également une présence de déchets marins flottants occasionnelle dans la Mer de Myrto et entre la Crête et le Péloponnèse, et enfin une présence rare dans l'Est de la mer Egée, à savoir au Nord de Rhodes, au Nord de Samos et autour de Lipsi.

B. Questionnement

Selon les hypothèses donc, si le plastique a tendance à se déplacer dans l'océan, les vents et les courants marins le propulseraient en amas qui resteraient au même endroit. Biermann et al. espèrent que les données optiques des satellites permettront d'identifier ces agrégats et leurs sources et que les individus et organisations pourront utiliser ces informations pour trouver des solutions à la pollution marine. L'idée serait en effet d'organiser des opérations de nettoyage dans les zones où de grandes quantités de plastiques seraient repérées, mais aussi d'agir sur les principales sources, si elles peuvent être identifiées, pour réduire l'entrée de déchets dans l'océan[53]. C'est pourquoi nous allons nous demander où les déchets marins flottants, et en particulier le plastique, ont tendance à se regrouper au sein de la Mer Egée. Pour cela, nous commencerons par exposer le contexte de notre étude en en détaillant les objectifs. Puis nous nous focaliserons sur les données et méthodes utilisées pour répondre à nos objectifs, et enfin nous présenterons de manière critique nos résultats.

[52] Politikos et al., 'Modeling the fate and distribution of floating litter particles in the Aegean Sea (E. Mediterranean)

[53] Springer Nature, 'Using satellites to detect plastic patches floating in coastal waters'

III. Contexte

A. Contexte thématique

1. Définition de la conservation marine

Cette étude s'ancre dans la thématique de la conservation marine. Egalement connue sous le nom de conservation des océans, la conservation marine est la « protection et la préservation des écosystèmes des océans et des mers par une gestion planifiée afin d'empêcher la surexploitation de ces ressources »[54]. Elle s'appuie sur l'étude des ressources végétales et animales marines et des fonctions des écosystèmes, et est motivée par la réaction aux effets négatifs observés dans l'environnement, tels que la perte d'espèces, la dégradation de l'habitat et les changements dans les fonctions des écosystèmes. C'est pourquoi elle se concentre sur la limitation des dommages causés par l'homme aux écosystèmes marins, la restauration des écosystèmes marins endommagés et la préservation des espèces et des écosystèmes vulnérables de la vie marine. De plus, la conservation marine est une discipline relativement nouvelle qui s'est développée en réponse à des problèmes biologiques tels que l'extinction et la modification des habitats marins[54].

2. Présentation de l'Institut de Conservation Marine Archipelagos

L'Institut de Conservation Marine Archipelagos est une Organisation Non Gouvernementale (ONG) grecque créée en 1998 dont l'objectif est de défendre et protéger la biodiversité du Nord-Est de la Méditerranée, en mettant l'accent sur les mers et les îles grecques et en combinant des actions de recherche, d'éducations, de conservation et d'engagement communautaire. La coopération avec les communautés locales en est la base stratégique et renforce ses activités au niveaux local, national et européen, permettant de protéger vies aquatique et terrestre contre des facteurs humains toujours plus importants[55].

En matière de conservation, Archipelagos œuvre à la fois aux travers de projets généraux et de champs d'action plus spécifiques. Le premier projet sur lequel il est intéressant de s'attarder est celui du Sanctuaire de la Vie Marine de la mer Egée (AMLS), dont la mission est de fournir pour la première fois au monde un environnement naturel pour la réhabilitation de dauphins sauvés de la captivité. L'idée est de fournir des soins vétérinaires à différentes espèces marines, tout en proposant des installations propices à la recherche et à l'éducation afin de contribuer à la fin de l'exploitation commerciale des dauphins[56]. Le second projet concerne l'éco-navigation, qui est une plate-forme de science citoyenne permettant d'échanger des données entre marins si une espèce a été vue, ce qui permet aux équipes d'Archipelagos de s'y rendre et de collecter de précieuses données d'observation[57]. « Fish4Life » est le troisième projet dans lequel s'est engagé Archipelagos, qui est un guide pour la consommation durable de poisson en Méditerranée. Prenant la forme d'une application,

[54] Wikipedia, 'Marine Conservation'
[55] Archipelagos, 'About us'
[56] Archipelagos, 'Aegean Marine Life Sanctuary'
[57] Archipelagos, 'Eco navigation'

il fournit des informations sur le statut de chaque espèce (par exemple, si elle est illégale ou si sa consommation est durable) et sur la période de reproduction pendant laquelle il faut éviter de la consommer. Il fournit également des informations sur la taille minimale légale en Grèce (la taille en-dessous de laquelle il est illégal de capturer ou de consommer chaque espèce), ainsi que sur la taille minimale durable (la taille minimale recommandée pour la consommation en raison de l'âge de reproduction, permettant ainsi la régénération des espèces)[58]. Enfin, « Save the Aegean » est une initiative de l'Institut de Conservation Marine Archipelagos qui vise à former une alliance entre environnementalistes, scientifiques, entreprises et consommateurs, l'objectif commun étant de réduire efficacement l'empreinte écologique causée par la vie quotidienne qui a des répercussions néfastes sur l'environnement. L'un des aspects de cette initiative est le développement et la promotion de nouveaux produits respectueux de l'environnement, donnant ainsi la possibilité au consommateur de choisir une alternative durable pour les produits du quotidien[59].

En plus de ces projets généraux parfois collaboratifs, Archipelagos œuvre au travers de champs d'action bien spécifiques, et cela aux niveaux terrestre et marin. Au niveau terrestre, il s'agit principalement de conserver la faune insulaire notamment en évaluant la biodiversité et l'abondance des populations d'oiseaux afin de créer un guide allant des espèces d'oiseaux les plus communes aux espèces plus importantes et rares de la mer Egée[60]. Concernant les forêts et la flore en général, des enquêtes de terrain en évaluent la biodiversité des écosystèmes, la désertification, l'érosion et les facteurs qui les affectent, accompagnées d'une reforestation expérimentale[61]. Au niveau marin, Archipelagos travaille en étroite collaboration avec les associations locales de pêcheurs et les autorités de diverses îles et régions côtières afin de collecter des données sur la productivité de la pêche, les principales menaces et les pratiques de pêche illégales, non réglementées et non déclarées. Archipelagos a notamment participé à la création de la première zone de protection de la pêche cogérée en Grèce dans la région de Fourni dans l'Est de la mer Egée, visant à fournir un cadre juridique pour contrôler la pêche locale et permettant ainsi de promouvoir des pratiques de pêche durables[62]. Par ailleurs, une grande partie du travail de conservation d'Archipelagos concerne les mammifères marins. En effet, la mer Egée abrite des populations clés de cétacés (dauphins et rorquals), de phoques moines de Méditerranée et de tortues de mer. Pour cela, les équipes se rendent en mer pour les observer et collecter des données relatives aux habitats, comportements et menaces potentielles pour ces espèces[63]. Un intérêt est aussi porté à l'écosystème littoral, pour qui sont évaluées la croissance et la morphologie de l'espèce d'algue invasive Caulerpa racemosa, ainsi que son impact sur la biodiversité. Est également évaluée la couverture et l'état de santé des posidonies, ainsi que l'impact subi par le chalutage et l'ancrage de bateaux de plaisance[64]. Pour ces récifs coralligènes et posidonies, Archipelagos travaille d'ailleurs à combler les lacunes concernant leur répartition au sein de la mer Egée en cartographiant ces habitats de manière précise afin de favoriser une gestion efficace, et cela au moyens de kayaks équipés de sonar ou de drones[65]. En effet, les prairies sous-marines sont considérées comme un écosystème côtier majeur qui contribue, avec les mangroves et les marais maritimes, au stockage du « carbone bleu »[65]. Elles peuvent en effet capturer et stocker de grandes quantités de carbone dans les plantes elles-mêmes ainsi que dans la couche sédimentaire sous-

[58] Archipelagos, 'Fish4Life'
[59] Archipelagos, 'Save the Aegean'
[60] Archipelagos, 'Island fauna'
[61] Archipelagos, 'Forests and flora'
[62] Archipelagos, 'Fisheries'
[63] Archipelagos, 'Marine Mammal Research and Conservation Internships'
[64] Archipelagos, 'Littoral ecosystems'
[65] Archipelagos, 'Coralligene Reefs and Posidonia Seagrass'

jacente, un système se révélant parfois 35 fois plus efficace que les forêts tropicales. En plus d'essayer de le quantifier, après trois ans d'expérimentations, Archipelagos s'est aussi engagé à replanter des posidonies afin que celles-ci se remettre des dommages environnementaux (vents forts d'hiver) et anthropiques (ancrages incontrôlés)[66]. En outre, il a été démontré que les prairies sous-marines réduisent le débit de l'eau, les sédiments tombant de la colonne d'eau à un rythme plus élevé que dans les zones sans végétation. En plus de l'augmentation de la sédimentation, il y a moins de mouvement d'eau à l'intérieur de la couverture d'herbes marines, de sorte que les sédiments sont moins susceptibles d'être perturbés une fois qu'ils sont déposés. C'est pourquoi on pourrait supposer que l'augmentation des taux de sédimentation entraînerait une augmentation du dépôt de microplastiques dans ces zones, ce qui en ferait potentiellement un puits important pour la pollution plastique[66]. De manière générale, Archipelagos s'attache à identifier les principales sources de microplastiques dans la mer Egée et à quantifier l'étendue de leur contamination, que ce soit dans le tractus gastro-intestinal des dauphins, phoques, tortues de mer, poissons, invertébrés, sur les plages, dans les sédiments marins, ou encore dans les eaux de surface et la colonne d'eau[67].

3. Les projets de déchets marins (Plastic Litter Projects)

Car la différence doit être faite entre les plastiques flottants à la surface de l'eau, ceux navigant au sein de la colonne d'eau et ceux se déposant sur les sédiments marins. Notre étude se focalise sur les plastiques flottants car les travaux publiés concernant la détection de plastiques depuis des images satellites restent très récents et très restreints. En effet, ce n'est qu'en 2018 qu'a été mené le premier projet de déchets plastiques à l'Université de la mer Egée. Ce projet consistait à créer des cibles de dix mètres carrés, à les poser sur l'eau puis à récupérer les images satellites Sentinel-2 pour la date et la zone en question afin d'observer les signatures spectrales de différentes cibles et de voir s'il était possible de les différencier. Pour cette première expérience, les cibles étaient respectivement constituées de 3600 bouteilles en plastique de 1,5 litres, 135 sacs poubelles en Polyéthylène haute densité (PE-HD) bleus, et 200 mètres carrés de filets de pêche en nylon jaune[68]. A l'issue de ces essais, il était possible de différencier les différents cibles grâce à leurs différentes signatures spectrales dans le rouge, vert, bleu et proche-infrarouge. C'est pour cette raison que le projet a été reconduit en 2019 avec d'autres cibles, à savoir :

- Des cibles 10 x 20 mètres en ligne avec 50 % de bouteilles en plastique et 50 % de sacs en plastique
- Des cibles 100 % bouteilles en plastique et 100 % sacs en plastique, ainsi que des cibles mixtes plus petites
- Des cibles 5 x 10 mètres avec 75 % de bouteilles en plastique et 75 % de sacs en plastique ainsi que des cibles mixtes plus petites
- Des cibles 5 x 10 mètres en ligne avec 50 % de bouteilles en plastique et 50 % de sacs en plastique ainsi que des cibles plus petites

[66] Archipelagos, 'Coralligene Reefs and Posidonia Seagrass'
[67] Archipelagos, 'Microplastics'
[68] Topouzelis, Papakonstantinou, and Garaba, 'Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018)'

- Des cibles 10 x 10 mètres avec 25 % de bouteilles en plastique et 25 % de sacs en plastique ainsi que des cibles 5 x 10 mètres avec 100 % de roseaux[69]

Grâce aux mesures obtenues, un indice des débris marins flottants a été créé et dévoilé en avril 2020[70], défini comme suit :

$$FDI = R_{rs,NIR} - R'_{rs,NIR}$$

$$R'_{rs,NIR} = R_{rs,RE2} + (R_{rs,SWIR1} - R_{rs,RE2}) \times (\lambda_{NIR} - \lambda_{RED} / \lambda_{SWIR1} - \lambda_{RED}) \times 10$$

Pour le projet 2020 l'année suivante, de nouvelles cibles ont été pensées afin de définir un seuil de détection minimal en rapport avec la part d'abondance de débris marins dans un pixel mixte. Pour cela, une cible de mailles et une cible de déchets marins de sept mètres de diamètre ont été créées, ainsi que douze cibles rectangulaires réparties comme suit : trois cibles de 0,6 x 0,6 mètre, trois cibles de 2,4 x 2,4 mètres et trois cibles de 5,1 x 5,1 mètres, faites de bâches, bouteilles en plastique et mousse, et trois cibles mixtes et de tailles différentes. Les résultats obtenus ont encore permis d'améliorer la détection et la classification qui s'ensuit, devenant de plus en plus précise. Cependant, ces différentes expérimentations nous montrent aussi que le sujet est très récent et qu'il y a encore beaucoup de limites. Par exemple, il y aurait besoin d'une « cible plastique de référence » stable et suffisamment grande pour couvrir la totalité d'un pixel, ce à quoi devrait répondre le projet 2021 par la création d'une cible semi-permanente en mailles de 28 mètres de diamètre. Par ailleurs, le travail ne se concentre pour l'instant que sur les débris flottants car l'eau a un fort niveau d'absorption, ce qui rend impossible la réflectance du plastique et même difficile la détection d'objets ayant une forte teneur en eau. D'autres limites ont été rencontrées au niveau des corrections atmosphériques, des corrections des reflets du soleil ou encore de l'altération due à l'état de la mer (turbidité, vagues) et les équipes travaillent toujours à les améliorer[71].

B. Contexte institutionnel

1. Projets pouvant être soutenus

Notre étude est donc pertinente aujourd'hui car elle s'insère dans un bon timing scientifique ainsi que dans une ONG qui œuvre localement pour la conservation marine, à savoir dans la mer Egée. Archipelagos travaille aussi régulièrement avec d'autres acteurs, que ce soit des locaux, des pêcheurs ou des avocats, parfois en soutien, parfois en opposition. En 2018 par exemple, le magazine « Environment for Europeans » s'est entretenu avec le professeur George Papatheodorou, responsable du projet grec « LIFE DEBAG ». Dans un contexte de changement législatif, son équipe menait une campagne de sensibilisation pour empêcher que les sacs en plastique ne deviennent des déchets marins. En effet, la Grèce étant le royaume du sac plastique (elle était l'un des Etats membres de l'UE où la consommation par habitant de sacs en plastique à usage unique était la plus élevée), le pays devait s'adapter aux mesures européennes adoptées en avril 2015 pour la réduction des sacs

[69] Topouzelis et al., 'Remote sensing of sea surface artificial floating plastic targets with Sentinel-2 and Unmanned Aerial Systems (Plastic Litter Project 2019)'
[70] Biermann et al., 'Detecting and identifying floating plastic debris in coastal waters using Sentinel-2 earth observation data'
[71] AIR Centre, 'Networking Friday with Konstantinos Topouzelis (UAegean)'

plastiques en caisse. Cette campagne, après de nombreuses autres consultations nationales avec toutes les parties prenantes concernées, a finalement conduit à la loi de 2018 fixant une taxe environnementale de 0,04 € par sac plastique, taxe devant être augmentée à 0,10 € en janvier 2019[72]. C'est là l'exemple d'un projet que peut soutenir Archipelagos car en accord avec les valeurs de cet institut.

2. Projets devant être combattus

D'autres au contraire n'ont pas cette chance. Récemment, Archipelagos a rédigé un rapport sur l'aquaculture autour des îles Echinades dans la mer Ionienne afin de s'opposer à l'extension de celle-ci dû à la présence de zones protégées, de posidonies, d'habitats d'espèces en danger et de zones de pontes. Un autre travail est effectué au niveau des zones protégées Natura 2000, montrant que certaines ne « protègent » pas suffisamment les espèces et habitats et ne sont « que du vent ». Enfin, face à la carte officielle de la répartition de la posidonie dans les eaux côtières grecques, Archipelagos a également réagi en précisant cette carte, notamment à l'aide de sortie en kayaks équipés de sonar ou encore de drones.

C. Contexte spatial

1. Localisation des différentes bases d'Archipelagos

Au niveau spatial, Archipelagos s'est implantée au sein des archipels de la Mer Egée.

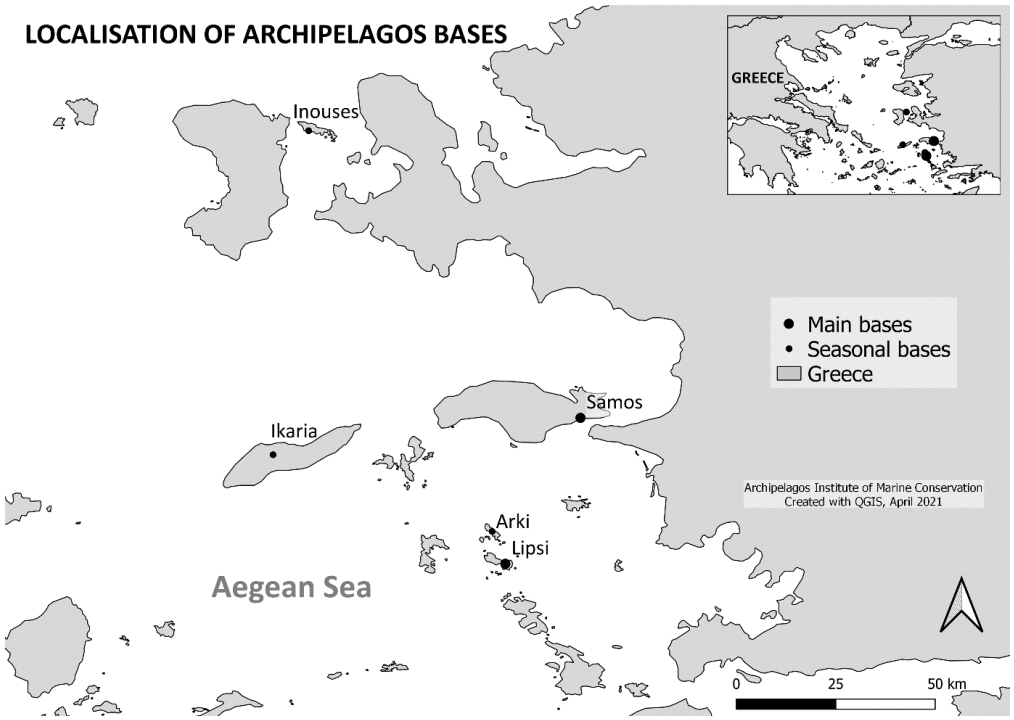


Illustration 2. Localisation des différentes bases de l'Institut de Conservation Marine Archipelagos. Emilie Mathis, 2021

[72] European Commission, 'Towards a plastic-free Aegean Sea'

Les deux principales bases sont celles de Samos et Lipsi. La base de Samos est située à quelques minutes de la plage avec vue sur la côte turque et sur le parc national du marais salant Psili Ammos, un site protégé Natura 2000. La base de Lipsi, petite île de 800 habitants, est quant à elle un appui à la création du sanctuaire de vie marine de la mer Egée, qui se situe à cinq kilomètres du principal centre de recherche, au Nord-Ouest de l'île. Les quatre autres bases fonctionnent de manière saisonnière. C'est le cas par exemple de la base d'Ikaria, seule base à disposer d'une station météorologique en ligne et d'une station de réception AIS (Automate Identification System). Ikaria est une île avec des vallées fluviales et une combinaison rare d'écosystèmes, regroupant à la fois des régions montagneuses, des forêts et des lacs. Sa population est d'environ 8 400 habitants, avec des activités telles que l'agriculture, l'apiculture, l'élevage, le tourisme, et dans une moindre mesure, la pêche. La base d'Inouses est mise à disposition par le Centre de Développement « Oinousses Aegean » et fonctionne lorsque des projets sont en cours sur l'île. Elle est habitée par 600 locaux et abrite de petits vignobles. Quant à la base d'Arki, elle se compose en réalité de deux stations, une située sur le petit îlot de Marathi et une sur l'île principale. Pour la première, il s'agit d'un petit observatoire environnemental prêté par la municipalité de Patmos. L'îlot n'étant habité en permanence que par trois à cinq personnes, il est principalement utilisé pour effectuer des recherches de courtes durées sur l'écosystème littoral ou pour passer la nuit entre deux enquêtes en bateau. Cet îlot est par ailleurs intéressant car il n'a presque subi aucun impact anthropique. La seconde base fait partie du « Refuge permanent de la vie sauvage du complexe de l'île d'Arki et des îlots du Nord de Patmos », créé en 2004 par les autorités grecques[73].

La répartition des différentes bases d'Archipelagos illustre bien son nom d' « archipel », celui-ci étant un « ensemble d'îles en groupe, sur une surface maritime plus ou moins étendue »[74]. La mer Egée, avec son grand nombre d'îles, est d'ailleurs à l'origine du mot « archipelago »[75]. Le problème des archipels, c'est qu'ils sont composés d'îles isolées et éloignées les unes des autres, ce qui rend l'apport en eau, en électricité ou encore la gestion des déchets compliqués.

2. Contexte spécifique de la base de Lipsi

Sur la base de Lipsi, le contact avec les déchets est néanmoins quasi-quotidien, que ce soit au niveau du bureau qui se trouve en face du port ou au niveau des nombreuses places qui jonchent l'île. Quand la météo le permet, une équipe collecte chaque jour les macroplastiques d'une plage, à savoir respectivement Hohlakoura, Katsadia, Mersini, Tourkomnima et Lientou / Kampos. Une fois collecté, le plastique est trié et compté afin de suivre l'évolution de ce phénomène. Pendant les enquêtes en bateau, un protocole est aussi suivi pour le recensement des déchets marins flottants, consistant à associer à chaque déchet rencontré dans un rayon de dix mètres la date, l'heure, les coordonnées, un ordre de grandeur (de 2,5 cm à 10 cm, de 10 cm à 30 cm, de 30 cm à 50 cm et au-dessus de 50 cm) et les conditions d'observation (bonne, moyenne ou mauvaise). Enfin, et dans un minimum d'une fois par semaine, les équipes ramassent les déchets ramenés par le vent et la mer autour des locaux et du port.

[73] Archipelagos, 'Research bases'
[74] Larousse, 'Définitions : archipel'
[75] Wikipedia, 'Archipelago'

IV. Objectifs

A. Définition des objectifs principaux

1. Objectif principal

D'un point de vue théorique, le premier objectif de ce travail est de savoir si l'on peut prédire, ou non, la répartition des déchets marins flottants, et notamment le plastique, au sein de la mer Egée. Plus précisément, il s'agit de voir s'il existe des zones où les déchets plastiques ont tendance à se regrouper, sous l'action des vents et des courants marins, et à ainsi former des « amas » de plastique. Au contraire, il s'agit également de voir s'il existe des zones où la concentration en déchets marins flottants est relativement faible.

2. Objectif secondaire

Si le premier objectif est rempli et qu'il est possible de prédire la répartition des déchets marins flottants au sein de la mer Egée, le second objectif, pratique cette fois-ci, est d'être un document appelant à l'action et demandant l'envoi de bateaux-poubelles dans les zones à forte concentration de déchets pour récupérer le plastique et ainsi le sortir de l'océan, cela avant qu'il ne se fragmente en particules plus petites.

B. Définition des étapes pour répondre à l'objectif principal

Cette étude se situe donc dans un contexte favorable car elle est pertinente tant au niveau thématique, institutionnel que spatial. Afin donc de voir s'il existe des zones dans la mer Egée où les déchets marins flottants ont tendance à se regrouper et ainsi répondre aux objectifs cités ci-dessus, nous allons procéder de la manière suivante :

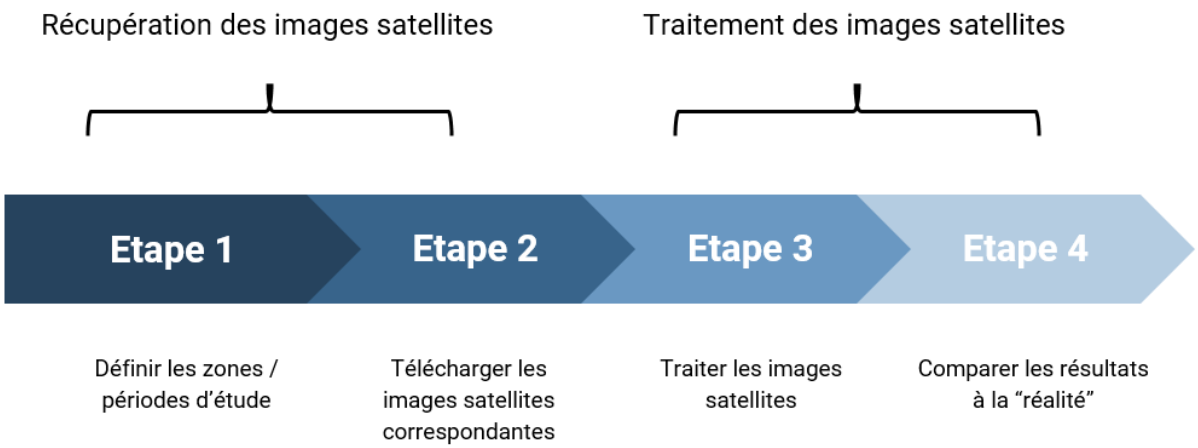


Illustration 3. Définition des étapes pour répondre aux objectifs. Emilie Mathis, 2021

1. Récupération des images satellites

Etape 1 : Définir les zones / périodes d'étude

- ⇨ Il s'agira de choisir des zones et périodes d'études pertinentes pour tester la fiabilité du modèle prédictif ; le choix sera donc basé sur celui-ci.

Etape 2 : Télécharger les images satellites correspondantes

- ⇨ Il s'agira d'utiliser le Copernicus Open Access Hub afin de récupérer les images satellites correspondantes aux zones et périodes d'étude définies.

2. Traitement des images satellites

Etape 3 : Traiter les images satellites

- ⇨ Il s'agira de mettre en évidence, ou non, le plastique grâce à l'Indice des Débris Flottants (FDI) et à l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI), qui permettront de faire une classification manuelle. Cette étape sera réalisée sur le logiciel SNAP (SeNtinel Application Platform).

Etape 4 : Comparer les prédictions à la « réalité »

- ⇨ Il s'agira de prendre pour chaque zone et période d'étude la prédiction et la comparer au nombre de pixels de plastique repérés.

Les étapes étant maintenant définies, nous allons pouvoir détailler la méthodologie adoptée pour répondre à chacune d'entre elles.

V. Données et méthode

Tout d'abord, il faut rappeler que le modèle prédictif sur lequel est basée cette étude a été créé pour modéliser le destin et la répartition de particules flottantes. Pour autant, même si les déchets de différentes tailles ont des propriétés de flottabilité différentes, les mécanismes de transport restent les mêmes[76]. Comme nous nous intéressons aux zones où les déchets plastiques auraient tendance à se regrouper, nous sommes seulement intéressés par la répartition finale des déchets marins, qui sera donc identique que le déchet soit micro ou macro.

De plus, l'image satellite étant la donnée au cœur de ce travail, il est intéressant de s'attarder sur sa structure grâce au schéma ci-dessous :

Schéma des données utilisées basé sur la méthode Hypergraph Based Data Structure (HBDS)

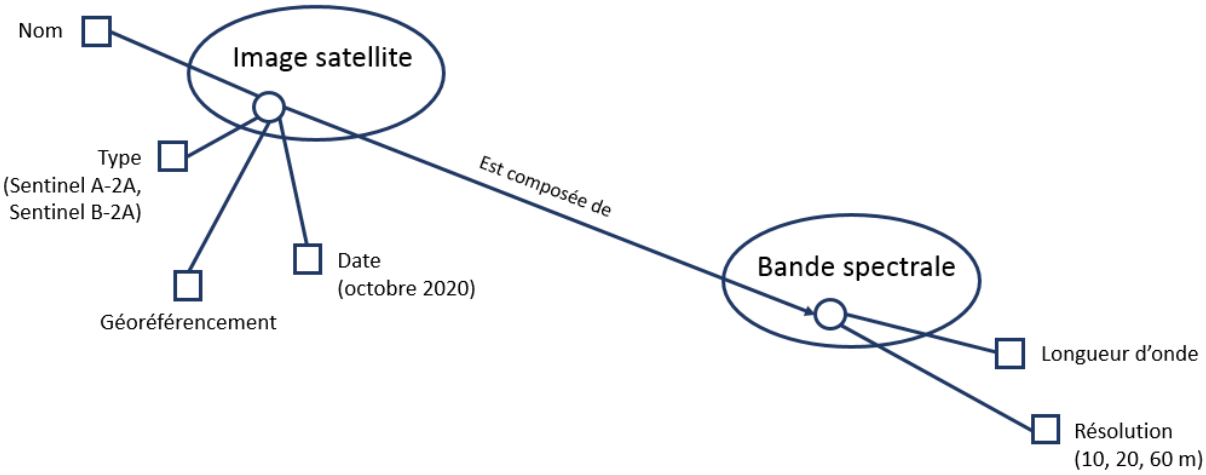


Illustration 4. Schéma des données utilisées basé sur la méthode Hypergraph Based Data Structure. Emilie Mathis, 2021

En effet, les images satellites peuvent être de différents types, dates et localisations, et sont composées de plus ou moins nombreuses bandes spectrales qui peuvent avoir différentes résolutions. Tous les choix concernant ces attributs seront détaillés dans les parties suivantes.

Pour ce qui est de la méthode utilisée pour réaliser ce travail, le schéma simplifié suivant permet de visualiser l'évolution de la donnée de base, à savoir l'image satellite, au cours du travail et des différents traitements, jusqu'à l'élaboration d'un tableau comparatif entre les hypothèses établies au départ, et cela par le choix de certaines zones d'étude en fonction de la présence de déchets marins récurrente, occasionnelle ou rare, et la réalité observée au niveau du plastique. Celui-ci met aussi en avant les articles et documentation de la bibliographie qui ont permis de définir les attributs des images satellites, ainsi que l'absence de correction atmosphérique dans le pré-traitement des données, choix qui sera expliqué dans les parties suivantes.

[76] Politikos et al., 'Modeling the fate and distribution of floating litter particles in the Aegean Sea (E. Mediterranean)'

Schéma simplifié du traitement des données basé sur la méthode Hypergraph Based Data Structure (HBDS)

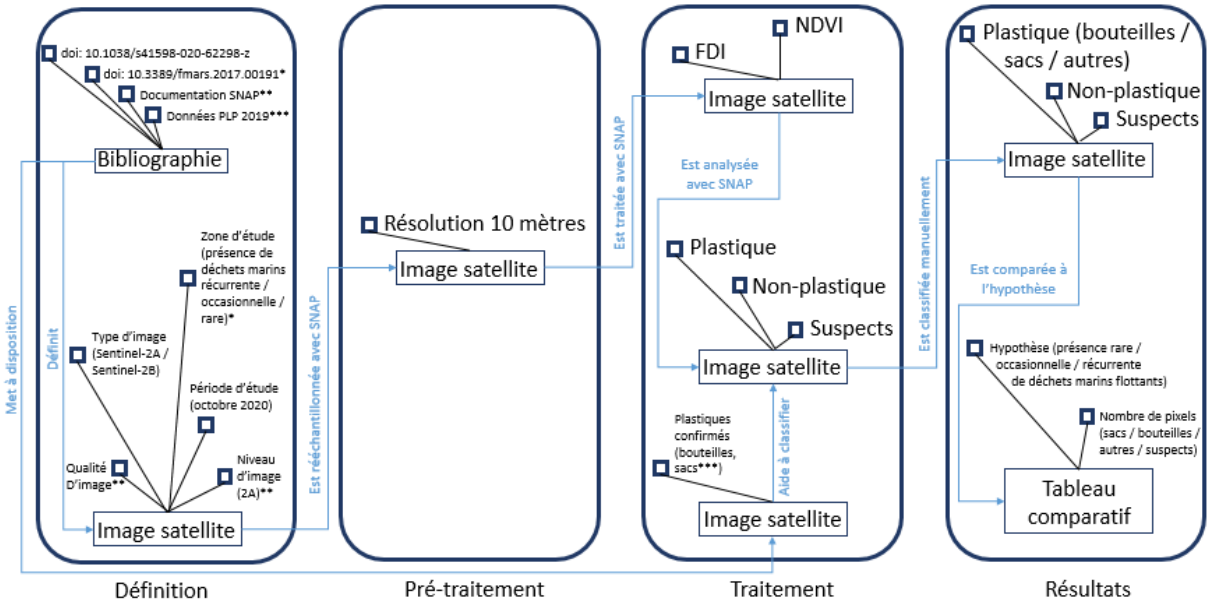


Illustration 5. Schéma simplifié du traitement des données basé sur la méthode Hypergraph Based Data Structure. Emilie Mathis, 2021

A. Récupération des images satellites

1. Définition des zones et périodes d'étude

Les plages et zones au large présentant une forte concentration de déchets flottants sont considérées comme devant être prioritaires pour de futures études. En effet, cela permettrait d'évaluer de manière importante l'état de la pollution par les déchets flottants dans la mer Egée, mais aussi d'améliorer la fiabilité des futures tentatives de modélisation et, enfin, de guider les prises de décisions politiques[75].

De plus, afin de modéliser le destin et la répartition des déchets marins flottants au sein de la mer Egée, il a fallu définir des régions « sources » de déchets. Celles-ci ont donc été choisies pour leur tendance à « concentrer » beaucoup de déchets de par leurs activités, mais aussi comme étant source de déchets marins de par leur localisation en bord de mer. Les régions sources établies par l'article sont donc les suivantes :

- La rivière Axios, ville de Thessalonique, port, principal lieu de pêche commerciale
- Les rivières Strymonas et Nestos, ville de Kavala, port, principaux lieux de pêche commerciale
- La rivière Evros, principal lieu de pêche commerciale
- La Mer Noire, afflux d'eau par le détroit des Dardanelles
- Le Golfe Saronique, ville d'Athènes, port du Pirée
- Le Sud-ouest de la mer Égée
- Le Sud-est de la mer Égée

Ces zones définies comme sources de déchets marins flottants ont ensuite été comparées avec les zones où la concentration de déchets marins était récurrente selon les différents scénarii modélisés.

Les zones suivantes ont été obtenues :

- Le Nord de la mer Egée : Détroit des Dardanelles, Samothrace, Limnos, Thermaikos, Sporades
- Le Golfe Saronique
- La Côte Est Evia

Par ailleurs, ces zones étant celles soupçonnant de grandes quantités de déchets marins flottants, des zones où leur présence est occasionnelle voire rare sont aussi nécessaires. Les zones suivantes ont ainsi été sélectionnées comme étant les zones regroupant des quantités moyennes de déchets marins flottants :

- La zone entre la Crête et le Péloponnèse
- La Mer de Myrto

Puis celles-ci comme étant les zones regroupant de faibles quantités de déchets marins flottants :

- Est de la mer Egée : nord de Rhodes, nord de Samos, Lipsi

Less zones d'étude ont donc été réparties de la manière suivante :

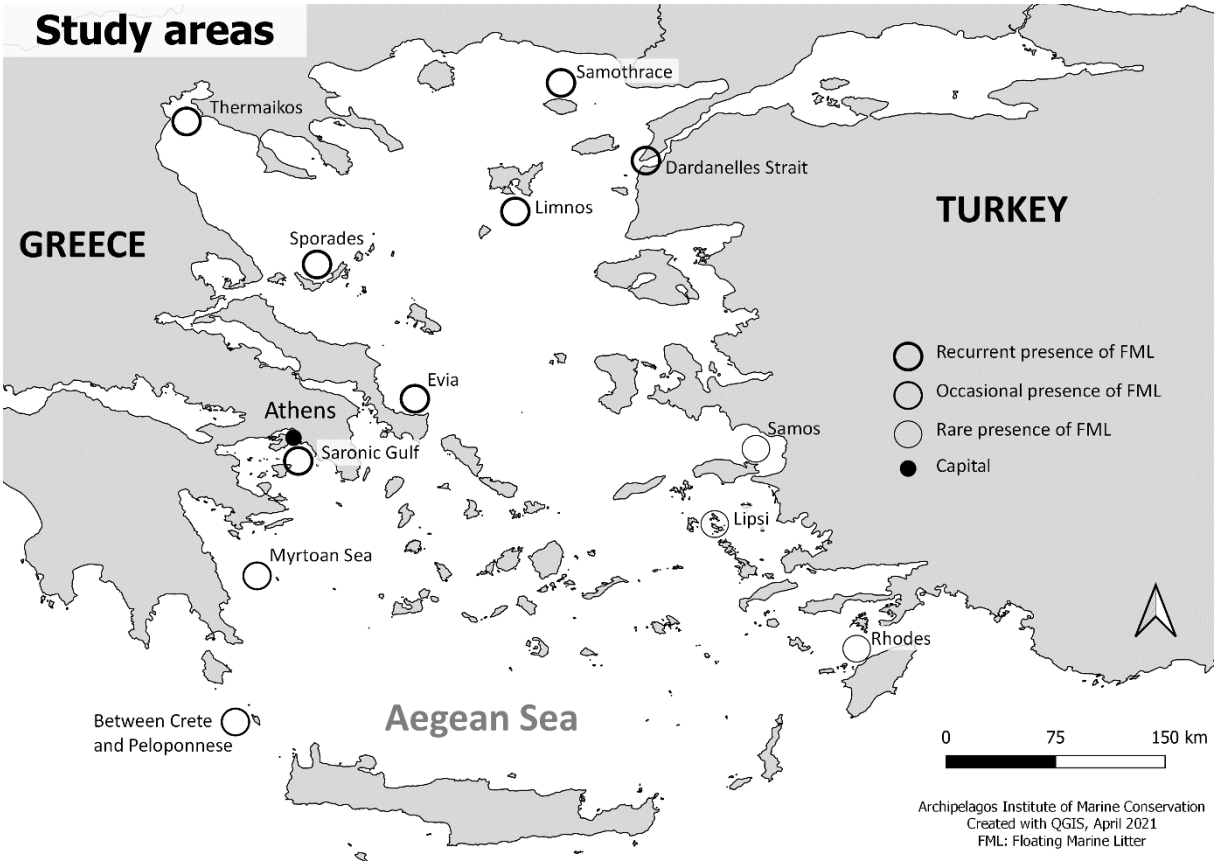


Illustration 6. Carte de la répartition de nos zones d'étude. Emilie Mathis, 2021

Concernant les périodes d'études, il aurait été intéressant de se baser sur la même période d'étude que celle de l'article, à savoir 1990-2009. Cependant, le satellite Sentinel-2A a été lancé le 23 juin 2015 et le satellite Sentinel-2B a été lancé le 7 mars 2017[77]. L'intérêt des images satellites Sentinel-2 est que les instruments multispectraux (MSI) à bord fonctionnent de manière passive, des données

[77] The European Space Agency, 'Sentinel-2'

optiques étant acquises le long de la trajectoire orbitale à haute résolution spatiale (10 mètres, 20 mètres et 60 mètres) sur les terres et les eaux côtières adjacentes[78]. Mais surtout, dans le cadre du programme Copernicus, les données MSI sont mises gratuitement à la disposition des utilisateurs. Le choix a donc été fait de travailler sur l'année 2020 afin d'avoir des données récentes et une idée de la répartition actuelle des déchets marins flottants.

Par ailleurs, le modèle testant également la saisonnalité de la répartition des déchets marins flottants, il a été tenté de récupérer les images satellites d'avril et d'octobre 2020 des zones d'étude définies afin de voir s'il y avait ou non une saisonnalité en comparant les résultats entre eux et aux hypothèses de départ. Malheureusement, malgré la méthodologie appliquée dans la partie suivante, la majorité des images satellites du mois d'avril étaient de trop mauvaise qualité pour pouvoir les classifier manuellement à l'œil nu, les pixels ayant un effet « paillettes », comme on peut le voir avec l'exemple de l'image satellite de Limnos d'avril 2020 :

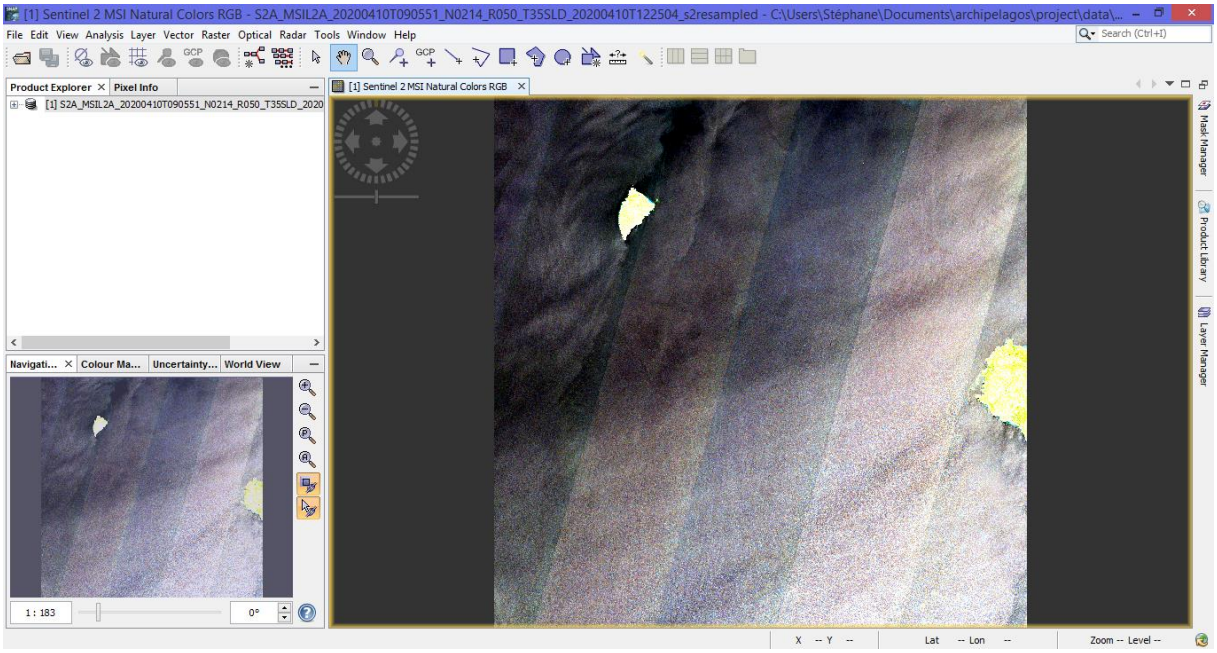


Illustration 7. Capture d'écran de l'image satellite du Sud de Limnos en avril 2020 ouverte sur SNAP. Emilie Mathis, 2021

Cette étude a donc été réalisée sur les images satellites d'octobre 2020 pour chaque zone d'étude, cela représentant un total de onze images satellites (les zones d'étude au Nord de Samos et au niveau de Lipsi étant couvertes par la même image satellite).

2. Téléchargement des images satellites

Les images satellites correspondantes aux zones et périodes d'étude ont été téléchargées via le centre d'accès libre de Copernicus et de l'ESA (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home). Afin de pouvoir choisir une image avec une faible couverture nuageuse, la période de détection a été fixée à un mois, à savoir pour avril du 1er au 30 et pour octobre du 1er au 31. Cependant, malgré ces précautions, les images satellites d'avril étaient généralement de moins bonne qualité que celles d'octobre et avaient cet effet « paillettes » illustré dans la partie précédente et qui vient peut-être des reflets du soleil sur l'eau. Pourtant, la Mission Sentinel-2 a été choisie pour sa gratuité mais aussi pour

[78] Biermann et al., Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data'

le niveau 2, choix qui sera détaillé à l'étape suivante et qui aurait dû éviter cette lisibilité difficile. Néanmoins, pour télécharger les images satellites, les zones d'étude ont ensuite été « marquées », comme on peut le voir à travers l'exemple de Lipsi et de ses alentours ici :

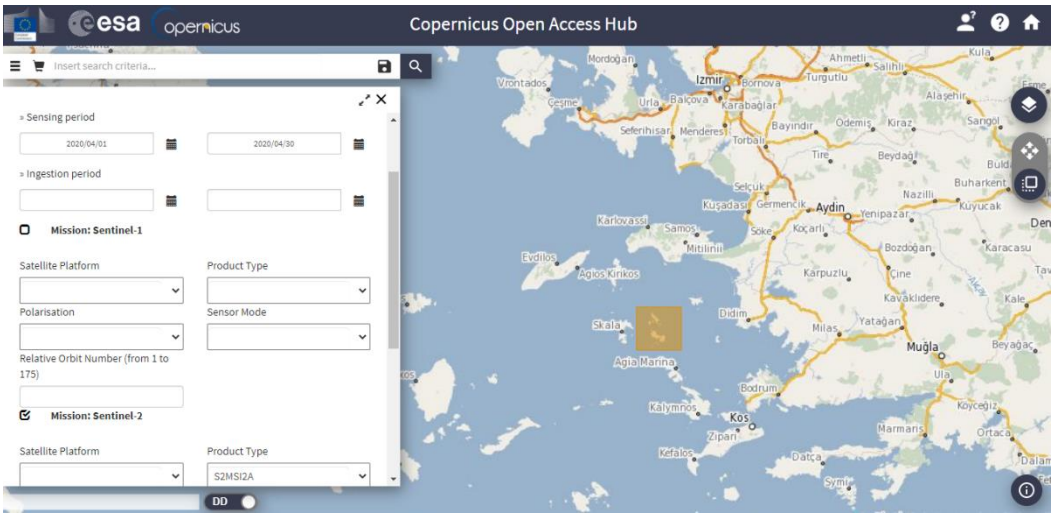


Illustration 8. Capture d'écran du paramétrage du Copernicus Open Access Hub. Emilie Mathis, 2021

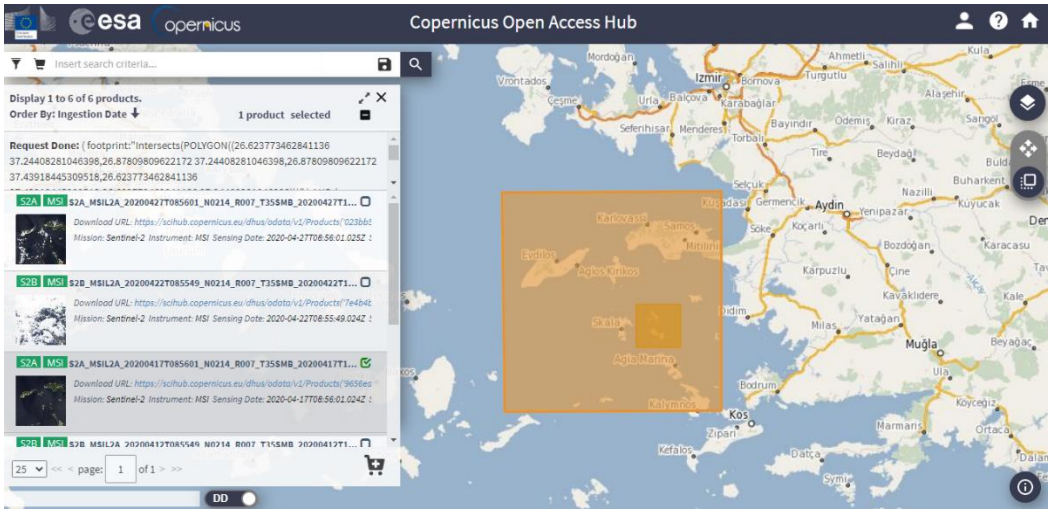


Illustration 9. Capture d'écran des propositions d'images satellites pour la zone et période demandées. Emilie Mathis, 2021

Cet exemple illustre d'ailleurs ce qui a été évoqué plus haut, à savoir que l'image satellite ici regroupe deux zones d'étude : celle au Nord de Samos et celle autour de Lipsi, d'où le total de onze images satellites pour nos douze zones d'étude.

B. Traitement des images satellites

Les études précédentes ont travaillé avec des images satellites Sentinel-2 de niveau 1C[79]. Pourtant, depuis mi-mars 2018, le niveau -2A est devenu un produit opérationnel pour la région euro-méditerranéenne. Ce niveau 2 est généré à partir du niveau 1C avec le processeur Sen2Cor, et corrige la réflectance du haut de l'atmosphère en une réflectance à la surface[80]. L'image satellite de niveau 2 étant corrigée, la qualité de certaines images satellites d'avril 2020 était surprenante. Néanmoins,

[79] Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data'
[80] European Geosciences Union, 'Technical note'

cette correction donne l'assurance d'une réflectance à la surface, qui permet notamment de différencier les débris marins comme le montre l'illustration ci-dessous :

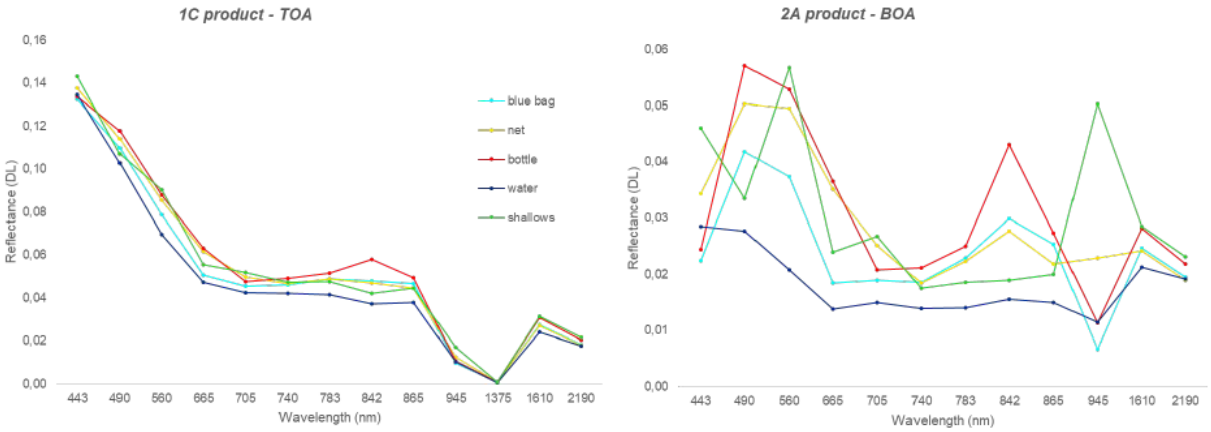


Illustration 10. Capture d'écran de la différence entre les réflectances des images SENTINEL-2 de niveau 1C et 2A lors du webinaire de Topouzelis avec AIRCenter en 2021.

On peut voir que les débris marins peuvent se différencier par leur réflectance pour les produits de niveau 2 contrairement aux produits de niveau 1C. De plus, les travaux réalisés par Topouzelis et al. démontrent que tant le Sen2Cor et ACOLITE conviennent pour la correction atmosphérique et pour la détection ultérieure des macroplastiques[78]. Les images téléchargées ayant bénéficié du traitement Sen2Cor, il n'était donc pas nécessaire de les recorriger.

1. Calcul de l'Indice des Débris Flottants (FDI) et de l'Indice de Végétation (NDVI) après rééchantillonage

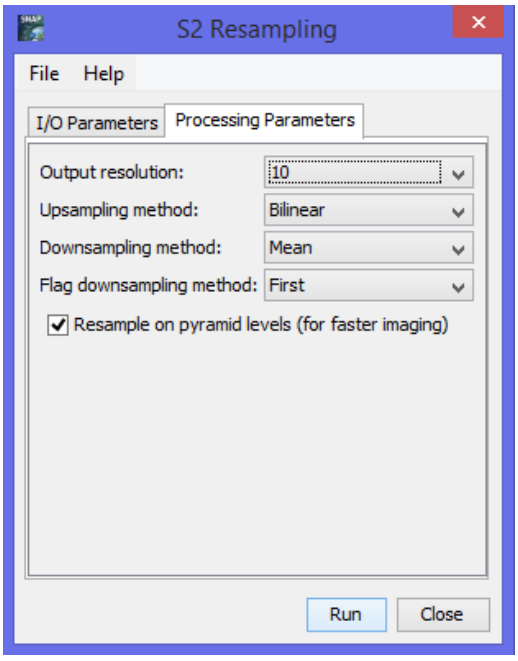


Illustration 11. Capture d'écran des paramètres choisis pour le rééchantillonage. Emilie Mathis, 2021

Les images satellites téléchargées ont ensuite été traitées avec le logiciel SNAP (SeNtinel Application Platform). Trois bandes sont nécessaires au calcul de l'Indice des Débris Flottants, à savoir la bande 6 (Red Edge 2), la bande 8 (Near InfraRed) et la bande 11 (ShortWave InfraRed). Le problème, c'est que ces trois bandes ont des résolutions différentes, à savoir 10 mètres pour la bande 8 et 20 mètres pour les bandes 6 et 11. Afin de pouvoir calculer ces indices, il faut donc procéder à un rééchantillonnage des données afin que tous les bandes aient la même résolution.

Pour cela, le produit téléchargé, à savoir le dossier .zip, doit être ouvert, puis dans Optical - Geometric – S2 Resampling Processor, une résolution de sortie de 10 mètres doit être choisie. En effet, cela permet de garder la précision de 10 mètres que propose la bande 8.

a. Indice des Débris Flottants (FDI)

Après rééchantillonnage des images satellites, l'Indice des Débris Flottants (FDI) peut être calculé. En rappel, cet indice permet de mettre en évidence les débris marins, notamment le plastique, sur les images satellites Sentinel-2 et se définit de la manière suivante :

$FDI = R_{rs,NIR} – R'_{rs,NIR}$

$R'_{rs,NIR} = R_{rs,RE2} + (R_{rs,SWIR1} – R_{rs,RE2}) \times (\lambda_{NIR} – \lambda_{RED} / \lambda_{SWIR1} - \lambda_{RED}) \times 10$

Avec $R_{rs,NIR}$ se traduisant par la réflectance de la télédétection du Near InfraRed (NIR), et λ_{NIR} se traduisant par la longueur d'onde associée au Near InfraRed (NIR).

Cet indice a été traduit pour les images satellites Sentinel-2 téléchargées à l'aide du tableau suivant :

MSI Band	Descriptor	S-2A Central Wavelength (nm)	S-2B Central Wavelength (nm)	Resolution (m)
Band 1	Coastal Aerosol	442.7	442.3	60
Band 2	Blue	492.4	492.1	10
Band 3	Green	559.8	559.0	10
Band4	**Red**	**664.6**	**665.0**	**10**
Band 5	Red Edge 1	704.1	703.8	20
Band6	**Red Edge2**	**740.5**	**739.1**	**20**
Band 7	Red Edge 3	782.8	779.7	20
Band8	**NIR**	**832.8**	**833.0**	**10**
Band 8a	Narrow NIR	864.7	864.0	20
Band 9	Water Vapour	945.1	943.2	60
Band 10	SWIR Cirrus	1373.5	1376.9	60
Band11	**SWIR1**	**1613.7**	**1610.4**	**20**
Band 12	SWIR 2	2202.4	2185.7	20

Illustration 12. Tableau décrivant les bandes multispectrales des satellites Sentinel-2. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020

Afin que l'indice soit effectif pour les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B, les longueurs d'onde des satellites Sentinel-2A et -2B ont été moyennées, leur précision se dégradant au cours du temps. Il se traduit donc comme suit :

FDI = B8 – (B6 + (B11 – B6) * ((832,9 – 664,8) / (1612,05 – 664,8)) * 10)

Enfin, pour calculer l'indice sur SNAP, il faut se rendre dans Raster – Band Maths… - Edit Expression…, et entrer la formule correspondante comme suit :

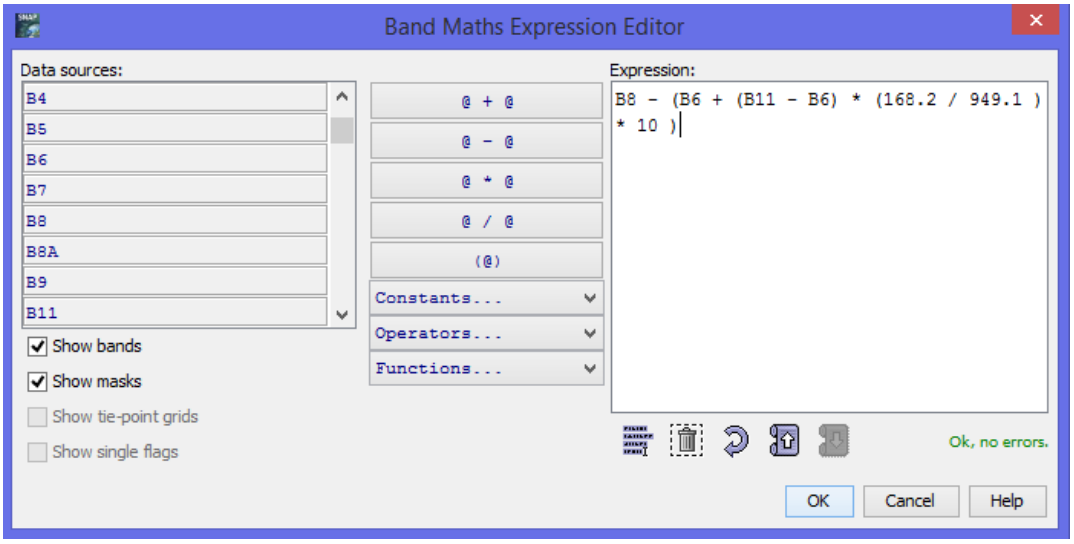


Illustration 13. Capture d'écran de la formule entrée dans la fenêtre Band Maths Expression Editor. Emilie Mathis, 2021

b. *Indice de Végétation (NDVI)*

Grâce à l'Indice des Débris Flottants, il est déjà possible de distinguer les débris en différentes classes, comme le montre le graphe suivant :

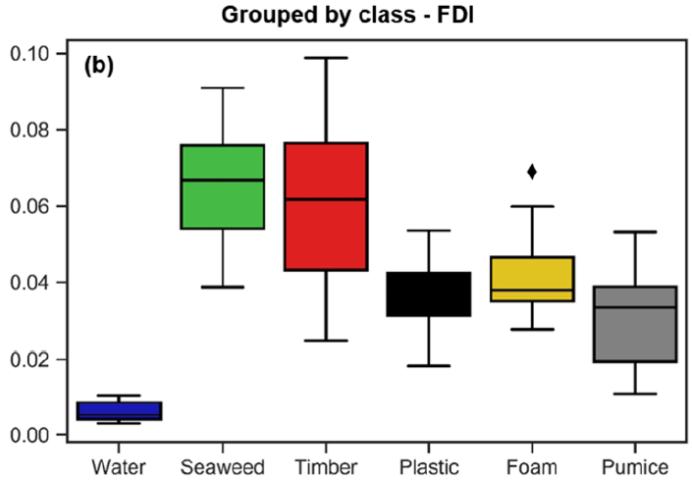


Illustration 14. Graphe des différents débris groupés par classe avec l'Indice des Débris Flottants. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020

Pour autant, ces différents débris peuvent être clairement distingués grâce en combinant cet indice avec l'Indice de Végétation, défini comme suit :

$NDVI = (R_{rs,NIR} - R_{rs,RED}) / (R_{rs,NIR} + R_{rs,RED})$

Avec $R_{rs,NIR}$ se traduisant par la réflectance de la télédétection du Near InfraRed (NIR), et $R_{rs,RED}$ se traduisant par la réflectance de la télédétection du rouge (RED). Cet indice permet de faire ressortir la végétation sur les images satellites SENTINEL-2, et se traduit en bandes par :

NDVI = (B8 – B4) / (B8 + B4)

Selon cet indice, les débris flottants se groupent en différentes classes comme suit :

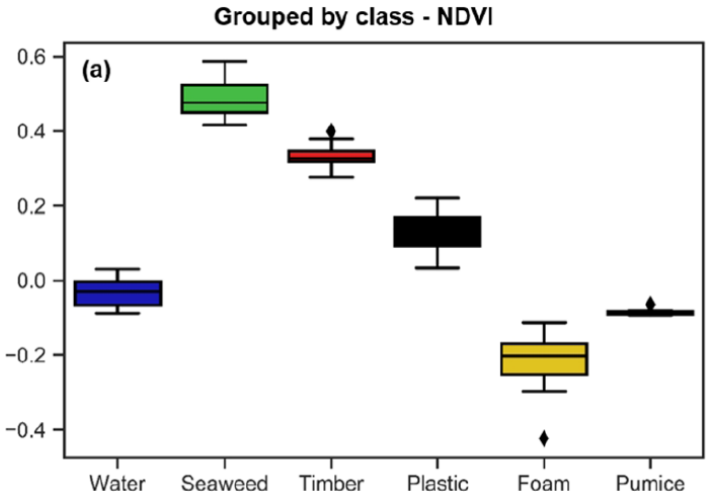


Illustration 15. Graphe des différents débris groupés par classe avec l'Indice de Végétation. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020

2. Classification

Avec ces deux indices combinés, nous pouvons donc suspecter le plastique dans des amas de débris, comme le montre le graphe suivant :

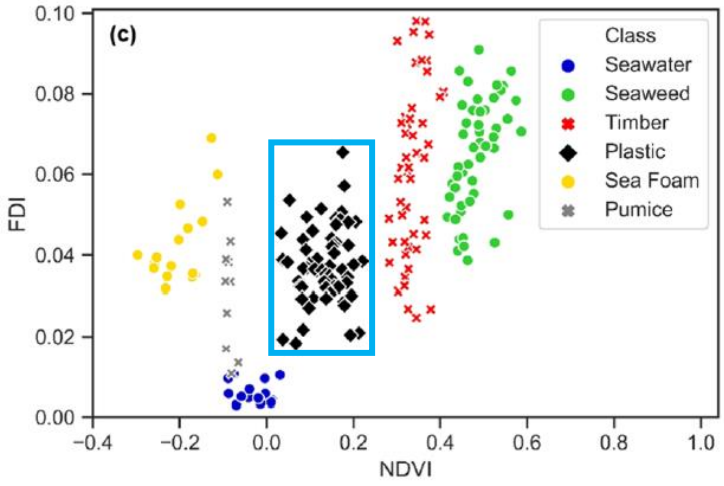


Illustration 16. Graphe des différents débris groupés par classe avec l'Indice des Débris Marins Flottants et l'Indice de Végétation. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020

En effet, lorsque la réflectance de l'Indice de Végétation de Différence Normalisée est comprise entre 0.02 et 0.23 et lorsque la réflectance de l'Indice des Débris Flottants est comprise entre 0.018 et 0.068, on peut suspecter le plastique d'une façon large (ce qui correspond au rectangle bleu clair ajouté ci-dessus). Mais pour être plus précis, nous avons fait le choix de faire deux classes, à savoir une qui suspecte le plastique selon les paramètres ci-dessus, et une qui suspecte le plastique de façon quasi-certaine lorsque les réflectances correspondent exactement à l'un des points noirs. La première classe était donc utile pour un pixel qui, par exemple, renvoyait 0.02 pour le NDVI et 0.03 pour le FDI, ce qui correspond à un « vide » sur le graphe mais qui pourrait tout de même être du plastique compte tenu de la grande proximité des autres points noirs. La seconde permettait quant à elle d'être quasi-sûre d'avoir du plastique.

Après une classification dite « manuelle » à l'aide de ces deux indices, l'idée était de classer chaque image satellite de façon supervisée afin d'avoir un résultat plus objectif, plus fiable et surtout plus rapide. Pour cela, des pixels validés de plastique étaient nécessaires afin de « superviser » la classification. C'est ce que met justement à disposition gratuitement le Projet de Déchets Plastiques 2019 avec un jeu de données comprenant le catalogue de granules Sentinel-2 L1C dans un document Word nommé « Catalogue d'images Sentinel-2 PLP2019 », les sous-ensembles Sentinel-2 L2 après prétraitement avec ACOLITE, c'est-à-dire après correction atmosphérique et suppression des reflets solaires, les données étant fournies au format netCDF (.nc) dans un dossier nommé « S2_satellite_images_nc ». On y trouve aussi les images UAV avec les cibles plastiques pour chaque date, les images UAV étant organisées dans le dossier nommé « UAV_photos », et enfin les vecteurs de points avec le pourcentage de présence de plastique pour chaque pixel Sentinel-2 dans le dossier « Vector_Points ». Les vecteurs de points sont donnés en vecteur ERSI et sont organisés par la date d'acquisition. De plus, pour chaque date, un fichier Excel est fourni pour localiser et décrire le nom du pixel réel[81].

Ce projet a été mené avec des cibles faites de bouteilles et sacs en plastique ainsi que de débris divers afin d'en récolter les signatures spectrales. Pour autant, une limite de ce travail a été la calibration de la position des cibles par rapport aux pixels de l'image satellite. En effet, bien que les cibles étaient soit de 10 mètres sur 10 pour couvrir la totalité d'un pixel, soit de 10 mètres sur 5 pour couvrir au moins la moitié d'un pixel, les pixels n'étaient en majorité pas « remplis » d'une seule cible ou de la moitié d'une cible, comme on peut le voir sur la photo ci-dessous :

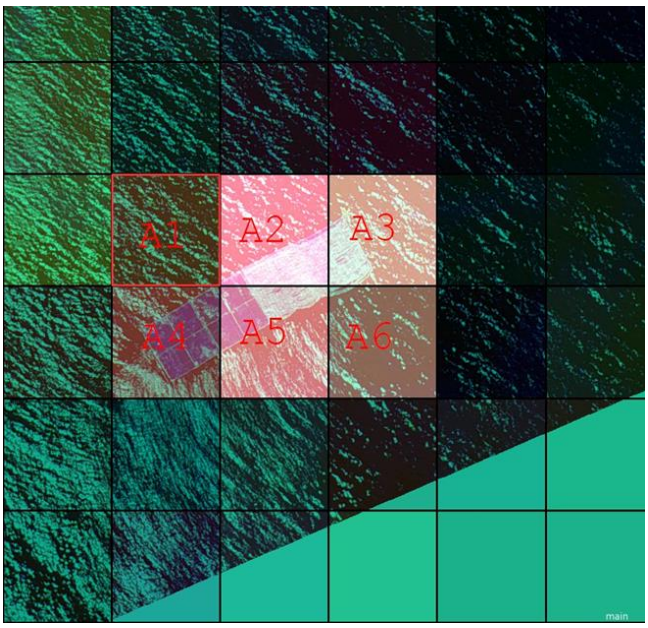


Illustration 17. Photo UAV des cibles de plastique déployées le 18 avril 2019. PLP 2019

[81] Topouzelis, 'PLP2019 Dataset'

Pour autant, afin de connaître la composition de chaque pixel, le tableau suivant est fourni avec chaque photo :

FID	pointid	grid_code	POINT_X	POINT_Y	Pixel_name	CP_Bags	CP_Sea	CP_Bottles
0	14	1072	462485	4328875	A1	0	100	0
1	15	1156	462495	4328875	A2	2	70	28
2	16	1145	462505	4328875	A3	0	82	18
3	20	1082	462485	4328865	A4	38	62	0
4	21	1189	462495	4328865	A5	18	67	15
5	22	1118	462505	4328865	A6	0	99	1

Illustration 18. Tableau décrivant les pixels contenant les cibles de plastiques déployées le 18 avril 2019. PLP 2019

On peut y voir que la plus grande couverture d'un pixel par une cible est de 38 % suivi de 28 % et moins. Mais il faut savoir qu'une étude a été publiée la même année révélant qu'une cible en plastique doit couvrir au moins 29 % d'un pixel pour que celui-ci soit identifié comme tel. C'est ce qu'on peut voir sur l'illustration ci-dessous :

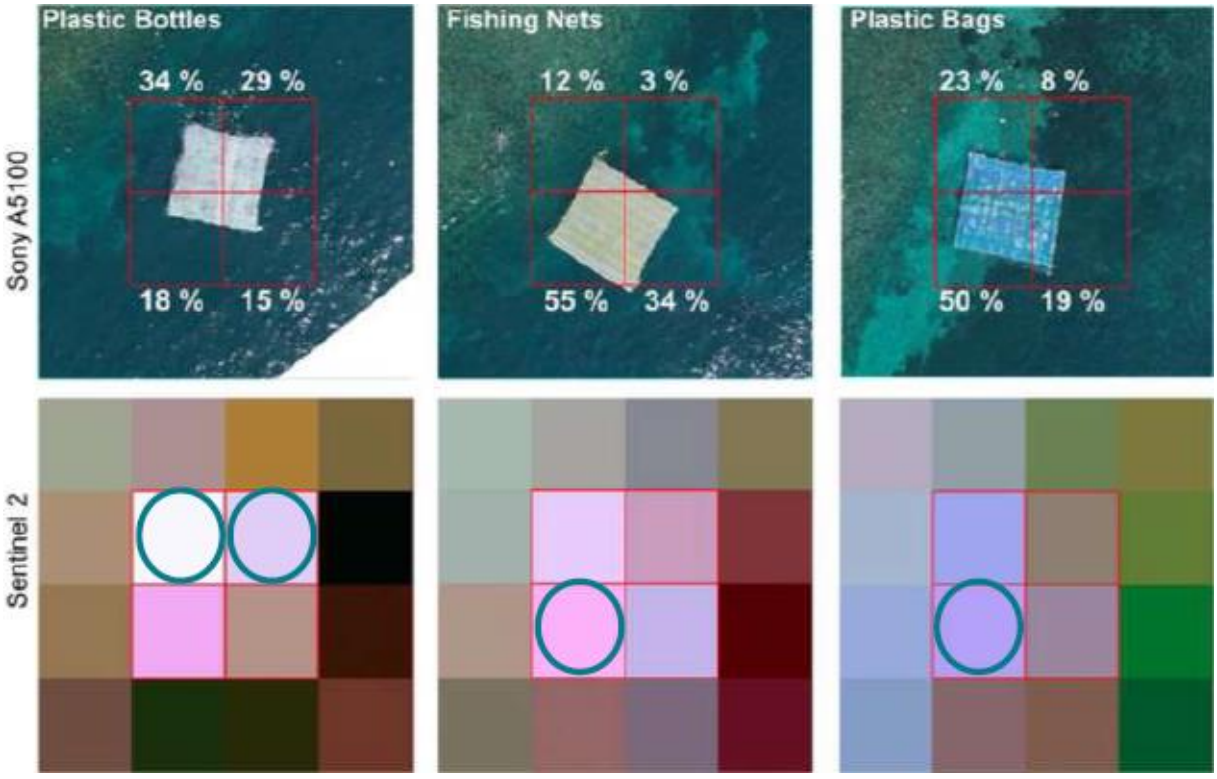


Illustration 19. Photos UAS de cibles en plastique mises en relation avec les images satellites SENTINEL-2 et mettant en évidence les pixels où le plastique a été détecté. Topouzelis K, Papakonstantinou A, Garaba, S.P. (2019). 'Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (PlasticLitterProject 2018)'

En effet, cette illustration met en lien la part de couverture d'un pixel avec la détection de ce qui le compose. On peut notamment voir que lorsque 23 % d'un pixel est couvert par des sachets en plastique, celui-ci n'est pas détecté comme un pixel « plastique » mais comme un pixel « eau ». Au contraire, lorsqu'un pixel est couvert à hauteur de 29 % par des bouteilles en plastique, celui-ci est détecté comme un pixel « plastique ». La couverture minimale permettant la détection du plastique doit donc se situer entre 24 et 29 % du pixel.

Si l'on revient donc aux données mises à disposition, seulement quatre pixels sont identifiés comme contenant des bouteilles en plastique, et seulement trois pixels sont identifiés comme contenant des sacs en plastiques. C'est très peu et cela explique pourquoi les Projets de Déchets

Plastiques sont reconduits d'années en années afin d'améliorer les données et les connaissances en matière de réflectance de ces cibles et du plastique en général.

Si donc certains algorithmes de classification, comme la classification naïve bayésienne utilisée par Biermann et al.[82], ne nécessitent que quelques pixels pour être entraînés, 7 pixels ne sont pas suffisants pour pouvoir entraîner un algorithme de classification. En effet, ils ont certes utilisé ces pixels (ligne Myrtilene, Greece) pour entraîner et tester leur algorithme, mais cela en plus de pixels de plastique validés à Durban en Afrique du Sud, comme le montre le tableau ci-dessous :

Study Site	Training or Testing	Information Source	Aggregating Feature	Floating Materials
Accra, Ghana	Testing	Twitter	River plume, front	Suspected plastics
Barbados, Caribbean	Training	News and Twitter	N/A	Seaweed
Da Nang, Vietnam	Testing	Local Government	River plume, front	Suspected plastics
Durban, South Africa	Training	Instagram and personal communication	River plume	Validated plastics
Late Island, Tonga	Training	Twitter	N/A	Floating pumice rock
Mytilene, Greece	Testing and Training	University of Aegean	N/A	Deployed plastic targets
Gulf Islands, BC, Canada	Training	Eyes Over Puget Sound (EOPS) report	N/A	Rafted timber
Gulf Islands, BC, Canada	Testing	LITTERBASE portal, and scientific literature	Eddy	Suspected plastics
Scotland, UK	Training	Observations	River plume	Spume
Scotland, UK	Testing	Marine Conservation Society UK report	Front	Suspected plastics

Illustration 20. Résumé des sites sélectionnés pour l'entraînement et la validation, y compris la manière dont les informations sur chaque site ont été obtenues, la caractéristique sub-mésoéchelle présente pour regrouper les matériaux flottants (le cas échéant), et ce que les matériaux détectés étaient, ou étaient soupçonnés d'être. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020

Il a néanmoins été tenté de faire une classification sur le logiciel SNAP en utilisant une image satellite contenant un pixel couvert à plus de 38 % de sacs en plastique et un pixel couvert à 28 % de bouteilles en plastique, ainsi que des pixels de mer. Cette image du 18 avril 2019 a été choisie car même si le second pixel était seulement couvert à 28 %, c'était la seule image qui contenait presque deux pixels de plastique de façon certaine. L'image satellite a donc été chargée sur le logiciel SNAP puis ouverte en RGB en sélectionnant « $2.rhos_665 » pour le « Red », « $2.rhos_560» pour le « Green » et « $2.rhos_492» pour le « Blue », « rhos » correspondant à la réflectance de la surface et les chiffres aux longueurs d'onde associées à chaque bande. A l'aide des illustrations 17 et 18, les pixels de plastique ont été repérés et associés à des contenants de données vectorielles préalablement créés, à savoir « bottles », « bags » et « sea ».

[82] Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data'

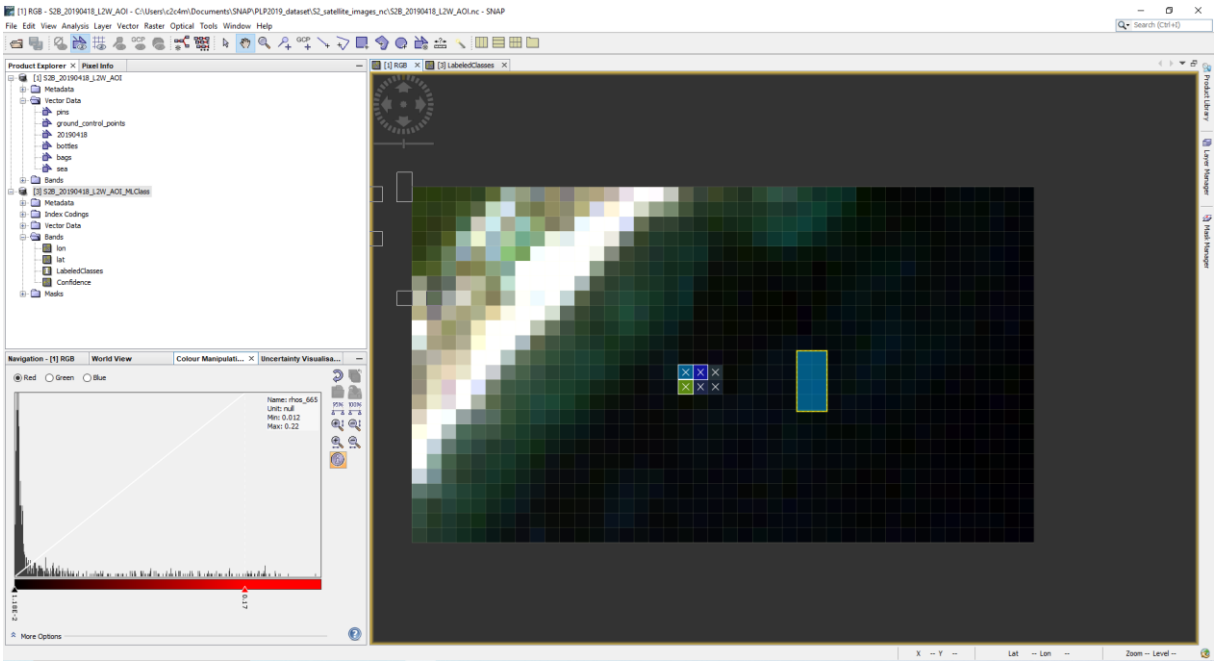


Illustration 21. Capture d'écran de la préparation de la classification sur le logiciel SNAP avec l'image satellite du 18 avril 2019. Emilie Mathis, 2021

Une fois les pixels associés aux différents contenants, nous nous sommes rendus dans « Raster » - « Classification » - « Supervised Classification » - « Maximum Likelihood Classifier ». Après avoir sélectionné l'image satellite dans « ProductSet-Reader », les vecteurs créés dans la case « Training vectors » sous « Maximum-Likelihood-Classifier », et les bandes « rhos » dans la case « Feature bands », la classification a été lancée avec comme résultat ce qui suit :

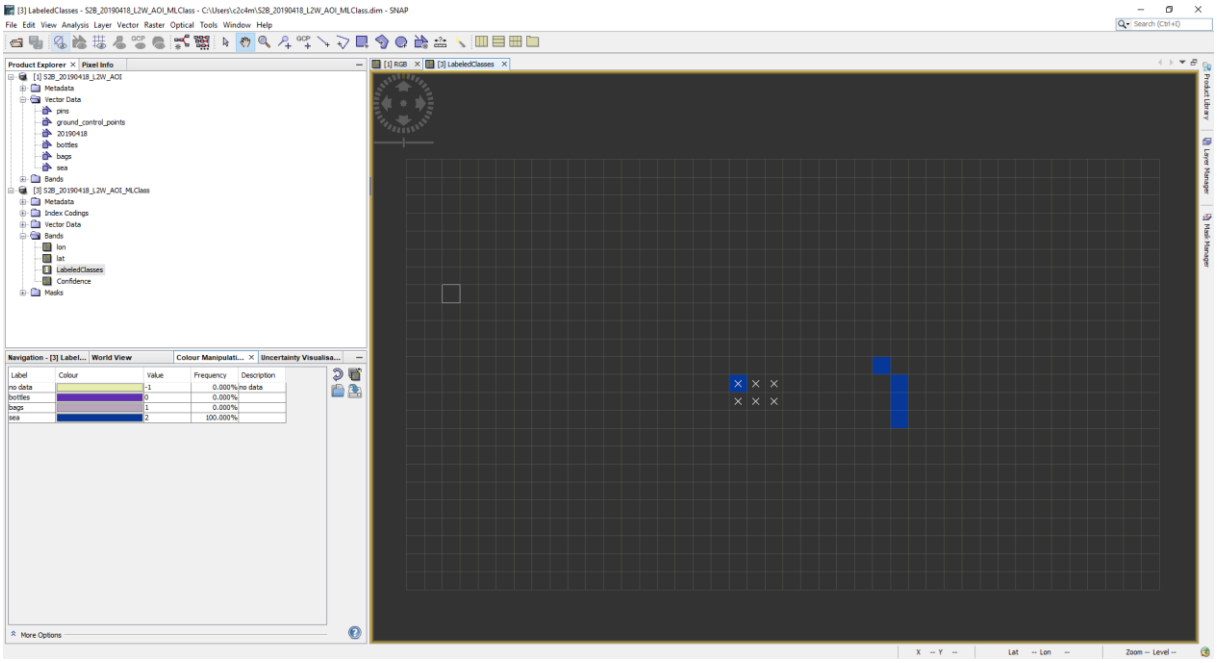


Illustration 22. Capture d'écran du résultat de la classification effectuée sur l'image satellite du 18 avril 2019. Emilie Mathis, 2021

On peut voir que seuls cinq pixels ont été classifiés comme « sea » et que le reste de l'image est classifiée comme « no data », ce qui est effectivement un échec.

Face à l'incapacité d'effectuer une classification supervisée, l'alternative était de procéder à une classification manuelle des images satellites correspondant aux zones d'étude à l'aide des deux indices développés plus haut afin de suspecter le plastique.

Afin de faciliter l'observation des pixels à l'œil nu, un quadrillage a été créé manuellement sur le logiciel SNAP en créant des polygones comme illustré ci-dessous avec l'image satellite du Détroit des Dardanelles :

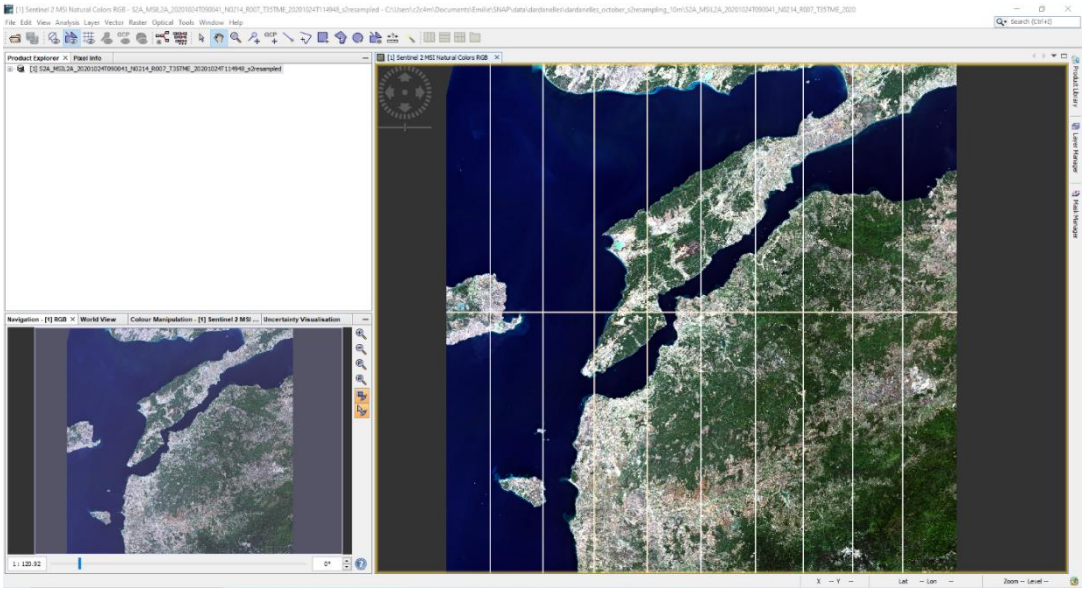


Illustration 23. Capture d'écran du quadrillage créé pour l'image satellite du Détroit des Dardanelles. Emilie Mathis, 2021

Puis, après avoir calculé les deux indices comme expliqué plus haut, l'image satellite est examinée case par case à une échelle d'environ 1 : 11.16, ce qui est suffisamment proche pour détecter la majorité des pixels suspects et suffisamment large pour ne pas avoir une vision trop restreinte. Dès qu'un ou un ensemble de pixels semblent suspects, un zoom est exécuté afin de s'attarder sur la réflectance des indices des pixels en question. Pour exemple, l'ensemble de ces pixels paraissait suspect à l'échelle 1 : 11.16, un zoom a donc été réalisé et il a été obtenu les réflectances suivantes : NDVI = 0.09 et FDI = 0.018, ce qu'on peut considérer comme du plastique suspect selon la définition restrictive.

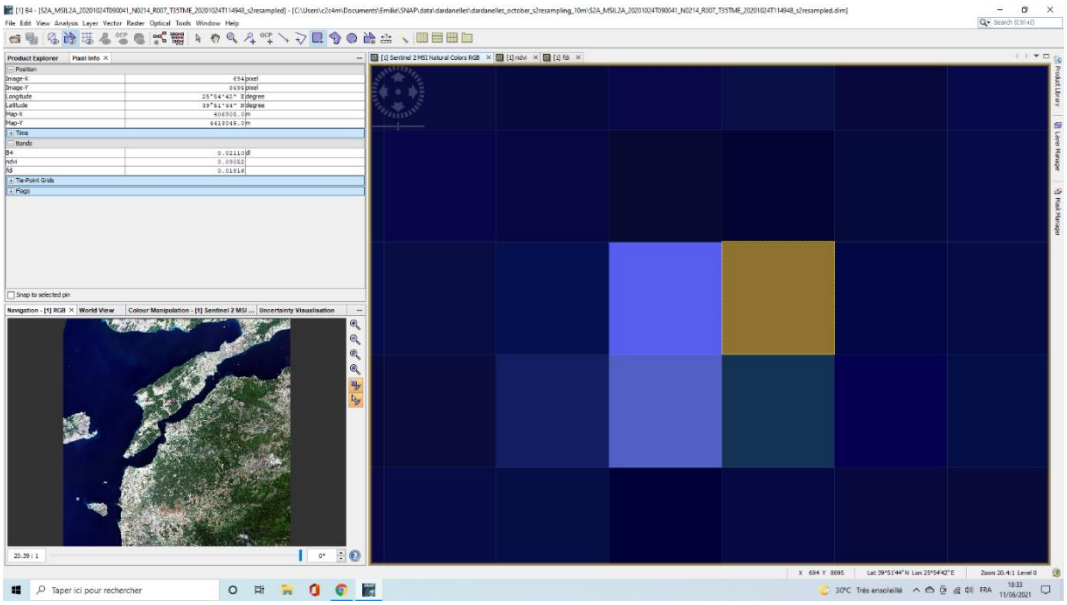


Illustration 24. Capture d'écran d'un pixel « plastique » détecté en classification manuelle. Emilie Mathis, 2021

Pour rappel, deux classes avaient été définies au début de cette partie, à savoir le plastique suspect selon une définition restrictive lorsque les réflectances correspondaient aux points noirs de l'illustration 16, et une définition plus large lorsque les réflectances correspondaient au rectangle bleu clair incluant les points noirs. Si donc il n'a pas été possible d'effectuer une classification supervisée à l'aide des images satellites mises à disposition par le PLP 2019, celles-ci nous ont permis de réaliser que les pixels confirmés de bouteilles en plastique ont une réflectance d'environ 0.04 dans la bande rouge, alors que les pixels confirmés de sacs en plastiques ont une réflectance d'environ 0.02. Pour le pixel observé dans l'illustration 24, nous pouvons donc dire qu'il s'agit d'un pixel contenant des sacs en plastique, la réflectance dans la bande rouge (B4) étant de 0.02.

Ainsi, la classification manuelle des images satellites s'est effectuée selon quatre classes, à savoir les pixels suspectés de contenir des bouteilles en plastique, les pixels suspectés de contenir des sacs en plastique, les pixels suspectés de contenir des plastiques autres (ne correspondant donc pas aux deux réflectances citées plus haut), et les pixels suspectés de contenir du plastique selon la définition large.

Enfin, une fois les classifications manuelles effectuées, la dernière étape consiste à pondérer le nombre de pixels de plastique suspects (selon la définition large ou restrictive) par rapport à la surface de mer analysée. En effet, les images satellites n'ont ni toutes la même taille ni toutes la même couverture en eau. Afin de connaître la taille approximative des images satellites, l'outil « Determines the distance between two points » a été utilisé pour déterminer la longueur et la largeur de l'image en km, et ainsi calculer la surface totale en km^2. Parfois, comme pour l'image ci-dessous, l'image n'était pas entièrement carrée : faute de pouvoir créer un triangle, un rectangle était alors créé sur le double de la surface à déduire de la surface totale. La longueur et la largeur en étaient déterminées, la surface calculée puis divisée par deux avant d'être déduite de la surface totale de l'image.

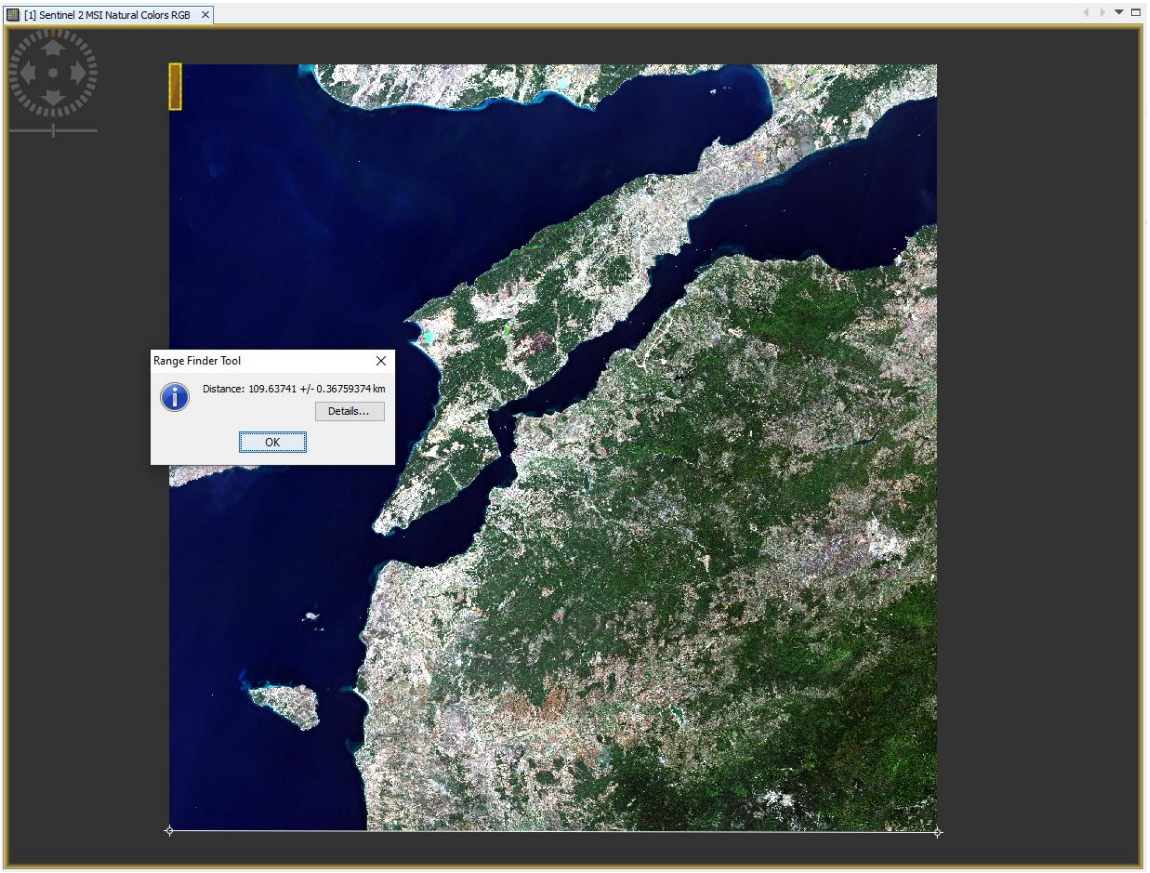


Illustration 25. Capture d'écran du calcul de la distance de la largeur en km de l'image satellite. Emilie Mathis, 2021

Pour ce qui est de la surface de mer par image satellite, l'information se trouve pour chaque image dans Metadata – Level-2A_User_Product – General_Info – Quality_Indicators_Info – Image_Content_QI – WATER_PERCENTAGE. Ce pourcentage, par exemple d'environ 42 % pour l'image satellite du Détroit des Dardanelles, permet de connaître la surface de la mer sur cette image, à savoir : (42/100) * 12 093 = 5 079,06 km^2. De plus, les pixels étant de 10 mètres sur 10 mètres, et la part de couverture d'un pixel devant être au minimum de 29 % pour détecter le plastique, chaque pixel de plastique est associé à une surface de 29 m^2 (ou 0.000029 km^2). Estimer la surface de la mer et la surface de plastique permet donc de connaître la part de plastique par rapport à la surface de mer analysée, et d'ainsi obtenir des parts comparables et de revenir ensuite sur les hypothèses de départ.

VI. Résultats et discussion

A. Comparaison des résultats obtenus à la réalité

Le premier élément à souligner ici est que la détection de pixels de plastique a effectivement été possible à partir d'images satellites SENTINEL-2 A et B de niveau 2, avec en plus la possibilité de distinguer les bouteilles des sacs en plastique.

Après donc avoir analysé toutes les images satellites correspondant aux zones et à la période d'étude, les résultats bruts suivants ont été obtenus :

Zones d'étude	Présence hypothétique de DMF*	Pixels plastique suspects +	Pixels plastique suspects -			
			dont	Bouteilles	Sacs	Autres
Dardanelles	Récurrente	210	183	40	**96**	47
Evia	Récurrente	77	63	19	16	28
Limnos	Récurrente	54	51	10	8	33
Lipsi	Rare	112	94	19	5	70
Myrto	Occasionnelle	**498**	**397**	58	58	281
Péloponnèse	Occasionnelle	133	111	28	20	63
Rhodes	Rare	**496**	**439**	**104**	54	281
Samothrace	Récurrente	157	122	24	34	64
Saronikos	Récurrente	**328**	**279**	52	75	152
Sporades	Récurrente	85	73	14	22	37
Thermaikos	Récurrente	163	151	26	41	84

*Illustration 26. Tableau récapitulatif du nombre de pixels de plastique trouvé par image satellite classifiée manuellement. Pixels plastique suspects + : définition large. Pixels plastiques suspect - : définition restrictive. *DMF : Déchets Marins Flottants. Emilie Mathis, 2021*

La surface en mètre carré associée au nombre de pixels de plastique suspects selon la définition restrictive a ensuite été estimée, un pixel étant équivalent à 29 m^2 de plastique :

Zones d'étude	Nombre de pixels plastique suspects -	Surface estimée en m^2
Dardanelles	183	5 307
Evia	63	1 827
Limnos	51	1 479
Lipsi	94	2 726
Myrto	397	**11 513**
Péloponnèse	111	3 219
Rhodes	439	**12 731**
Samothrace	122	3 538
Saronikos	279	8 091
Sporades	73	2 117
Thermaikos	151	4 379

Illustration 27. Tableau associant à chaque zone d'étude le nombre de pixels plastique suspects selon la définition restrictive ainsi qu'une estimation de la surface de plastique que cela représente en m^2. Emilie Mathis, 2021

Pourtant, et comme précisé dans la partie précédente, afin de pouvoir véritablement comparer ces résultats, il reste à les pondérer par rapport à la surface de mer de chaque image. De plus, une estimation de la surface de plastique a également été réalisée en termes de terrain de football, dont la surface représente environ 7 425 m^2, afin d'aider à la représentation des données :

Zones d'étude	Présence hypothétique de DMF	Surface de l'image satellite (en km^2)	Pourcentage de mer (en %)	Surface de mer (en km^2)	Surface estimée de plastique (SEP) (en km^2)	SEP (en terrain foot)	Part de plastique sur la surface de mer (en %)
Dardanelles	Récurrente	12 093	42	5 082	0.005307	0.71	**0.00010**
Evia	Récurrente	11 581	60	6 948.6	0.001827	0.25	2.63^{e}-5
Limnos	Récurrente	12 100	96	11 616	0.001479	0.20	1.27^{e}-5
Lipsi	Rare	12 100	91	11 011	0.002726	0.37	2.48^{e}-5
Myrto	Occasionnelle	12 100	80	9 680	0.011513	**1.55**	**0.00012**
Péloponnèse	Occasionnelle	12 100	79	9 559	0.003219	0.43	3.37^{e}-5
Rhodes	Rare	10 175	82	8 343.5	0.012731	**1.71**	**0.00015**
Samothrace	Récurrente	12 100	34	4 114	0.003538	0.48	8.60^{e}-5
Saronikos	Récurrente	12 100	88	10 648	0.008091	**1.09**	7.60^{e}-5
Sporades	Récurrente	12 100	90	10 890	0.002117	0.29	1.94^{e}-5
Thermaikos	Récurrente	12 100	43	5 203	0.004379	0.59	8.42^{e}-5

Illustration 28. Tableau associant à chaque zone d'étude la part de plastique par rapport à la surface de mer. Emilie Mathis, 2021

On peut également voir sur la carte ci-dessous la part de plastique par rapport à la surface de mer pour chaque zone d'étude :

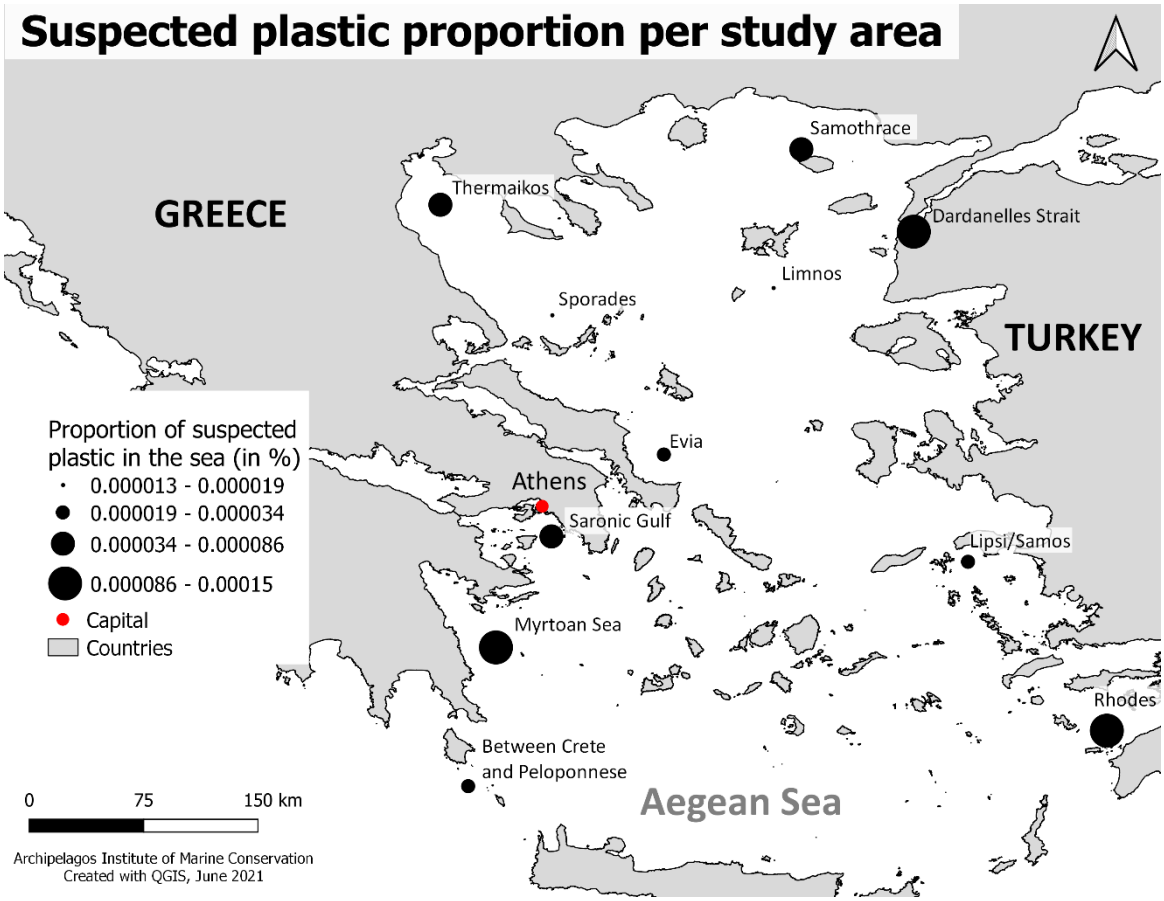


Illustration 29. Carte associant à chaque zone d'étude la proportion de plastique suspecté par rapport à la surface de mer. Emilie Mathis, 2021

On peut notamment voir que les zones situées au Nord de la mer Egée et au niveau d'Athènes ont comme supposé des parts plus élevées que les autres de plastique. Pour autant, le cas de Myrto où la présence de déchets marins flottants était supposée occasionnelle révèle une part plus importante de plastique que la zone plus proche d'Athènes, peut-être en raison de sa proximité. De plus, le Sud-Est de la Mer Egée, supposé avec des quantités très faibles de déchets marins flottants révèle la part la plus élevée à Rhodes, mais aussi une part qui ne fait pas partie des plus faibles dans le cas des zones de Lipsi et de Samos.

Au niveau du type de plastique suspecté par zone d'étude, on peut voir sur le graphique ci-dessous que la majorité n'a pas été reconnue. On peut par contre souligner la part élevée de sacs en plastique pour la zone du Détroit des Dardanelles.

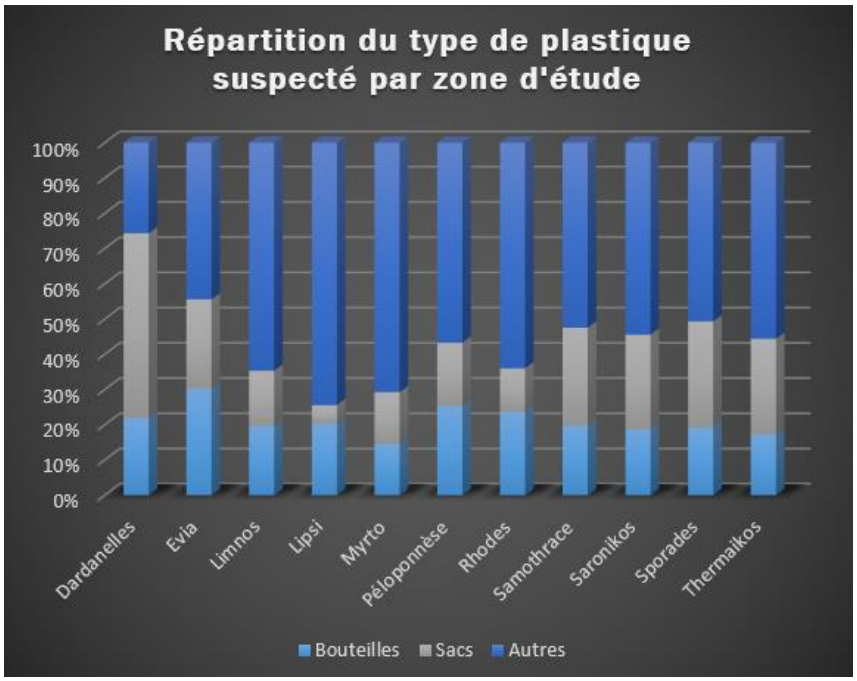


Illustration 30. Graphique associant à chaque zone d'étude la répartition des types de plastique suspecté. Emilie Mathis, 2021

Enfin, si l'on s'intéresse au type de plastique connu le plus commun, on se rend compte qu'il n'y a pas vraiment de différence entre les bouteilles et les sacs en plastique.

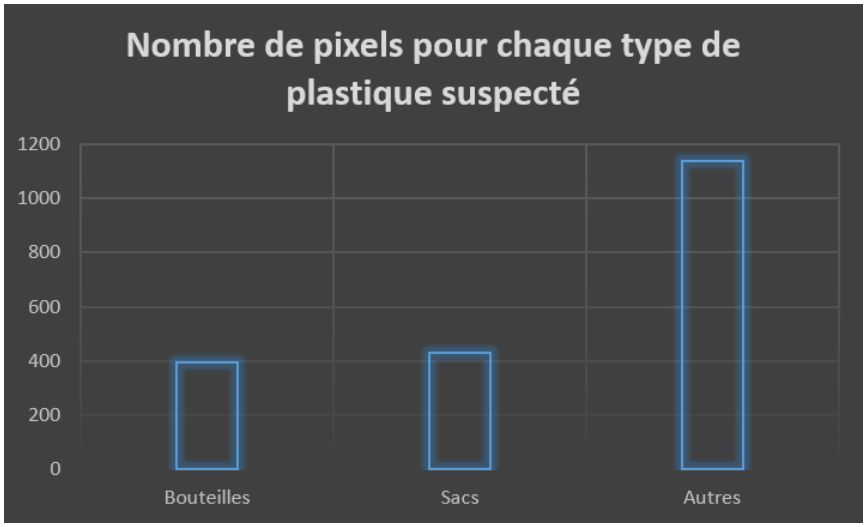


Illustration 31. Graphique associant à chaque type de plastique suspecté le nombre de pixels. Emilie Mathis, 2021

On pourrait donc résumer les résultats de la manière suivante :

- Des pixels de plastique suspects ont toujours été détectés dans les zones d'étude où la présence hypothétique de déchets marins flottants était récurrente
- La présence hypothétique de déchets marins flottants dans la zone d'étude de Rhodes était rare et pourtant c'est la zone où le plus de pixels de plastique suspects ont été détectés selon la définition restrictive et où la part de la surface de plastique estimée par rapport à la surface de mer de l'image est la plus élevée
- La présence hypothétique de déchets marins flottants dans la zone d'étude de Lipsi / Samos était rare et pourtant 94 pixels de plastique suspects ont été détectés selon la définition restrictive. Néanmoins, compte tenu de la surface de mer de l'image, cela correspond à la 3ème part la moins élevée des onze zones d'étude
- Dans les deux zones où la présence hypothétique de déchets marins flottants était occasionnelle ont été détectés de nombreux pixels de plastique suspects, notamment dans la zone d'étude de Myrto avec le plus de pixels de plastique suspects selon la définition large et la deuxième part la plus élevée
- Le type de plastique n'a en majorité pas été reconnu
- Un peu plus de sacs en plastique ont été détectés (429 sacs en plastique contre 394 bouteilles en plastique)
- Les surfaces de plastique estimées traduites en termes de terrains de football semblent énormes, pourtant cela représente une part extrêmement faible de la surface de mer, toujours inférieure à 0.00015 %.

B. Limites rencontrées

Au niveau des limites de cette étude, la première n'est pas surprenante en ce qu'il n'était pas possible de s'attendre à détecter un morceau de sac en plastique depuis l'espace avec une résolution de 10 mètres sur 10. Le fait que la taille minimum d'un amas détectable soit de 29 m^2 ne permet pas de détecter tout le plastique qui se trouve dans les mers et les océans mais permet déjà d'en avoir une idée quantifiée. La cause de cette limite se trouve surtout au niveau de la gratuité des images SENTINEL-2 au contraire d'images satellites à meilleures résolutions mais aussi payantes, voire très chères.

La deuxième limite réside dans le cas que l'étude s'est portée sur certaines zones seulement. Certes, le choix s'est fait sur des zones jugées pertinentes en raison de critères réfléchis et appuyés par des lectures, mais ces onze zones à elles seules ne peuvent pas définir la répartition des déchets marins flottants, et en particulier la répartition du plastique, au sein de la mer Egée.

Cela conduit à la troisième limite qui est que seules certaines hypothèses ont été vérifiées. En effet, des pixels de plastique suspects ont été détectés dans toutes les zones où la présence hypothétique de déchets marins flottants était récurrente, ce à quoi l'on pouvait s'attendre. Mais un nombre important, et parfois plus élevé, a aussi été détecté dans les zones où la présence hypothétique de déchets marins flottants était occasionnelle, voire rare. Les cas de Rhodes et de Myrto en sont les exemples les plus surprenants. De plus, cela est intimement lié à la limite qui concerne l'évaluation de la saisonnalité. En effet, la présence hypothétique de déchets marins flottants était supposée occasionnelle autour de Myrto et du Péloponnèse, pourtant après l'impossibilité de comparer les images du mois d'octobre à celles du mois d'avril à cause de leur qualité insuffisante, il

est difficile de savoir si le nombre de pixels détectés sur ces deux images est causé par une certaine temporalité ou non. De plus, les hypothèses ayant été rédigées sur des données de la période 1990-2009, il peut être normal de ne pas les vérifier avec des données de 2020.

Enfin, la classification de toutes les images satellites s'est faite manuellement faute d'avoir suffisamment de pixels validés de plastique pour mener une classification supervisée avec l'algorithme Naïve Bayes. Pendant cette classification, le facteur fatigue a été le plus important, notamment au niveau des yeux, qui parfois avaient du mal à distinguer un amas de plastique d'un petit bateau. Il est donc impossible de prétendre à un nombre de pixels exacts, certains pouvant avoir été oubliés ou comptés alors qu'ils ne devaient pas l'être, surtout le long des côtes.

C. Pistes d'amélioration

Néanmoins, ces limites laissent de nombreuses pistes d'améliorations. En effet, pour ce qui concerne la résolution de l'image satellite, il existe aujourd'hui des images certes payantes mais de résolution 0,5 mètre comme les images satellites Pléiades 1A et Pléiades 1B[83], qui permettraient de détecter des amas de plastique beaucoup plus petits, mais aussi d'affiner la quantification du plastique qui se trouve dans les mers et les océans. Pour autant, il faut se poser la question de la résolution nécessaire pour atteindre le but recherché, car il n'est pas sûr que ce soit pertinent d'avoir une résolution trop fine.

Cette étude gagnerait également à être poursuivie dans d'autres zones de la mer Egée afin d'affiner les connaissances sur la répartition des déchets marins flottants et en particulier du plastique dans cette région, notamment au niveau du centre de la mer Egée, très peu étudié ici. Dans la même logique, il serait intéressant de poursuivre l'étude d'un point de vue temporel et de travailler sur plusieurs mois de l'année et ainsi s'intéresser à la saisonnalité, voire de faire des études sur plusieurs années et ainsi suivre l'évolution de la répartition des déchets marins flottants.

Enfin, afin de pouvoir effectuer des classifications supervisées et ainsi automatiser le traitement des images satellites, des pixels validés de plastique sont nécessaires. Pour cela, il est possible de reprendre la méthodologie de Biermann et al. qui consistait à repérer des posts contenant des mots-clés relatifs à la pollution plastique dans les environnements fluviaux et marins. Sur Twitter et Instagram, les hashtags recherchés étaient entre autres : #marinelitter #marineplastic #plasticsoup #cleanup #plasticocean #plasticpollution #oceancleanup #cleanseas #keepouroceansclean #trashtag #plasticpollution. C'est comme cela que le site de Durban en Afrique du Sud a été trouvé, où pendant plusieurs jours en avril 2019, la ville côtière a connu de sévères inondations. Grâce à un contact sur place, des photos ont pu être prises, et celles-ci ont ensuite confirmé le plastique observé sur les images satellites récupérées. Une autre possibilité serait que les jeux de données avec les pixels validés soient tous partagés, voire que l'algorithme de classification Naïve Bayes soit publié sur GitHub, offre avancée par L. Biermann lors d'un webinaire[84].

[83] Esos, 'Image Satellite Haute Résolution'
[84] Ocean Plastic Webinars, Lauren Biermann, 'Detecting Floating Macroplastics by Satellite'

VII. Conclusion

L'objectif de cette étude était de voir s'il était possible de prédire la répartition des déchets marins flottants et en particulier celle du plastique au sein de la mer Egée. Les résultats montrent qu'en partie oui, puisque la majorité de nos hypothèses ont été vérifiées. Pour autant, certains résultats ont été pour le moins inattendus et révèlent en cela une évolution de la répartition des déchets marins flottants au cours du temps, avec possiblement aussi une évolution dans l'apport déchets entrants dans la mer Egée. Dans tous les cas, cette étude aura permis de quantifier le plastique dans certaines zones de la mer Egée, et de prouver qu'il y a bel et bien des amas de plastique et pas seulement un ou deux sacs éparpillés ici et là. De plus, les images satellites SENTINEL-2 et le logiciel SNAP étant gratuits, la méthodologie suivie pourra être reprise dans des travaux ultérieurs, soit pour compléter le travail qui a été initié ici, soit pour le commencer dans d'autres régions du monde.

A la fin de cette étude donc, il semblerait qu'il ne soit pas inutile d'envoyer un bateau-poubelle dans la région au Nord de Rhodes ou dans celle de la Mer de Myrto, où des surfaces de plastique équivalentes à plus d'un terrain de football ont été détectées. Par ailleurs, même si ces quantités détectées représentent encore une très faible part de la superficie de la mer, il semble important d'y remédier avant que celle-ci n'augmente. Nous commençons en effet déjà à connaître les conséquences du plastique accumulé dans les mers et les océans, comme le microplastique ingéré par les poissons élevés en et hors aquaculture, pour ne citer que le travail de ma collègue Ana Botelho au sein de l'Institut de Conservation Marine Archipelagos.

Enfin, il semblerait que la seule solution viable sur le long-terme, outre celle de retirer le plastique déjà présent dans les océans, soit de diminuer le plastique à la source, soit en préférant des produits réutilisables qui réduiront de fait la production de plastique à usage unique et la quantité de déchets susceptibles de se retrouver dans les océans, soit en boycottant le plastique en général au profit d'autres matériaux, notamment biodégradables.

Table des illustrations

Illustration 1. Sources et voies de transport du plastique avec comptabilisation approximative du bilan massique si données disponibles, d'après des données de 2015, Encyclopedia 8

Illustration 2. Localisation des différentes bases de l'Institut de Conservation Marine Archipelagos, Emilie Mathis, 2021 22

Illustration 3. Définition des étapes pour répondre aux objectifs. Emilie Mathis, 2021 24

Illustration 4. Schéma des données utilisées basé sur la méthode Hypergraph Based Data Structure. Emilie Mathis, 2021 26

Illustration 5. Schéma simplifié du traitement des données basé sur la méthode Hypergraph Based Data Structure. Emilie Mathis, 2021 27

Illustration 6. Carte de la répartition de nos zones d'étude. Emilie Mathis, 2021 28

Illustration 7. Capture d'écran de l'image satellite du Sud de Limnos en avril 2020 ouverte sur SNAP. Emilie Mathis, 2021 29

Illustration 8. Capture d'écran du paramétrage du Copernicus Open Access Hub. Emilie Mathis, 2021 30

Illustration 9. Capture d'écran des propositions d'images satellites pour la zone et période demandées. Emilie Mathis, 2021 30

Illustration 10. Capture d'écran de la différence entre les réflectances des images SENTINEL-2 de niveau 1C et 2A lors du webinaire de Topouzelis avec AIRCenter en 2021 31

Illustration 11. Capture d'écran des paramètres choisis pour le rééchantillonage. Emilie Mathis, 2021 .....3**Erreur ! Signet non défini.**

Illustration 12. Tableau décrivant les bandes multispectrales des satellites Sentinel-2. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020 32

Illustration 13. Capture d'écran de la formule entrée dans la fenêtre Band Maths Expression Editor. Emilie Mathis, 2021 33

Illustration 14. Graphe des différents débris groupés par classe avec l'Indice des Débris Flottants. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020..... 33

Illustration 15. Graphe des différents débris groupés par classe avec l'Indice de Végétation. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020 34

Illustration 16. Graphe des différents débris groupés par classe avec l'Indice des Débris Marins Flottants et l'Indice de Végétation. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020..... 34

Illustration 17. Photo UAV des cibles de plastique déployées le 18 avril 2019. PLP 2019..... 35

Illustration 18. Tableau décrivant les pixels contenant les cibles de plastiques déployées le 18 avril 2019. PLP 2019 36

Illustration 19. Photos UAS de cibles en plastique mises en relation avec les images satellites SENTINEL-2 et mettant en évidence les pixels où le plastique a été détecté. Topouzelis K,

Papakonstantinou A, Garaba, S.P. (2019). 'Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (PlasticLitterProject 2018)'.....36

Illustration 20. Résumé des sites sélectionnés pour l'entraînement et la validation, y compris la manière dont les informations sur chaque site ont été obtenues, la caractéristique sub-mésoéchelle présente pour regrouper les matériaux flottants (le cas échéant), et ce que les matériaux détectés étaient, ou étaient soupçonnés d'être. Biermann et al., 'Finding plastic patches in coastal waters using optical satellite data', 2020..... 37

Illustration 21. Capture d'écran de la préparation de la classification sur le logiciel SNAP avec l'image satellite du 18 avril 2019. Emilie Mathis, 2021 38

Illustration 22. Capture d'écran du résultat de la classification effectuée sur l'image satellite du 18 avril 2019. Emilie Mathis, 2021 38

Illustration 23. Capture d'écran du quadrillage créé pour l'image satellite du Détroit des Dardanelles. Emilie Mathis, 2021 39

Illustration 24. Capture d'écran d'un pixel « plastique » détecté en classification manuelle. Emilie Mathis, 2021..... 39

Illustration 25. Capture d'écran du calcul de la distance de la largeur en km de l'image satellite. Emilie Mathis, 2021..... 40

*Illustration 26. Tableau récapitulatif du nombre de pixels de plastique trouvé par image satellite classifiée manuellement. Pixels plastique suspects + : définition large. Pixels plastiques suspect - : définition restrictive. *DMF : Déchets Marins Flottants. Emilie Mathis, 2021*..... 42

Illustration 27. Tableau associant à chaque zone d'étude le nombre de pixels plastique suspects selon la définition restrictive ainsi qu'une estimation de la surface de plastique que cela représente en m^2. Emilie Mathis, 2021 42

Illustration 28. Tableau associant à chaque zone d'étude la part de plastique par rapport à la surface de mer. Emilie Mathis, 2021..... 43

Illustration 29. Carte associant à chaque zone d'étude la proportion de plastique suspecté par rapport à la surface de mer. Emilie Mathis, 2021 43

Illustration 30. Graphique associant à chaque zone d'étude la répartition des types de plastique suspecté. Emilie Mathis, 2021 44

Illustration 31. Graphique associant à chaque type de plastique suspecté le nombre de pixels. Emilie Mathis, 2021..... 44

Bibliographie

1. Soto-Navarro J, Jordá G, Deudero S, Alomar C, Amores Á, Compa M. 3D hotspots of marine litter in the Mediterranean: A modeling study. Marine Pollution Bulletin. juin 2020;155:111159.

2. Papakonstantinou A, Batsaris M, Spondylidis S, Topouzelis K. A Citizen Science Unmanned Aerial System Data Acquisition Protocol and Deep Learning Techniques for the Automatic Detection and Mapping of Marine Litter Concentrations in the Coastal Zone. Drones. 18 janv 2021;5(1):6.

3. Biermann L, Clewley D, Martinez-Vicente V, Topouzelis K. Detecting and Identifying Floating Plastic Debris in Coastal Waters using Sentinel-2 Earth Observation Data [Internet]. oral; 2020 mars [cité 26 mars 2021]. Disponible sur: https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-19145.html

4. Topouzelis K, Papakonstantinou A, Garaba SP. Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. juill 2019;79:175-83.

5. Biermann L, Clewley D, Martinez-Vicente V, Topouzelis K. Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data. Sci Rep. déc 2020;10(1):5364.

6. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., MSFD Technical Subgroup on Marine Litter. Guidance on monitoring of marine litter in European seas. [Internet]. LU: Publications Office; 2013 [cité 26 mars 2021]. Disponible sur: https://data.europa.eu/doi/10.2788/99816

7. Themistocleous K, Papoutsa C, Michaelides S, Hadjimitsis D. Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery. Remote Sensing. 17 août 2020;12(16):2648.

8. Kako S, Isobe A, Magome S. Low altitude remote-sensing method to monitor marine and beach litter of various colors using a balloon equipped with a digital camera. Marine Pollution Bulletin. juin 2012;64(6):1156-62.

9. Martínez-Vicente V, Clark JR, Corradi P, Aliani S, Arias M, Bochow M, et al. Measuring Marine Plastic Debris from Space: Initial Assessment of Observation Requirements. Remote Sensing. 21 oct 2019;11(20):2443.

10. Politikos DV, Ioakeimidis C, Papatheodorou G, Tsiaras K. Modeling the Fate and Distribution of Floating Litter Particles in the Aegean Sea (E. Mediterranean). Front Mar Sci. 20 juin 2017;4:191.

11. Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science. 13 févr 2015;347(6223):768-71.

12. Près de 230 000 tonnes de plastique jetées chaque année dans la Méditerranée. Le Monde.fr [Internet]. 27 oct 2020 [cité 29 mars 2021]; Disponible sur: https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/10/27/pres-de-230-000-tonnes-de-plastique-jetees-chaque-annee-dans-la-mediterranee_6057519_3244.html

13. Topouzelis K, Papageorgiou D, Karagaitanakis A, Papakonstantinou A, Arias Ballesteros M. Remote Sensing of Sea Surface Artificial Floating Plastic Targets with Sentinel-2 and Unmanned

Aerial Systems (Plastic Litter Project 2019). Remote Sensing. 23 juin 2020;12(12):2013.

14. Boucher J, Billard G. The challenges of measuring plastic pollution. Field Actions Science Reports The journal of field actions. 1 mars 2019;(Special Issue 19):68-75.

Sitographie

1. [cité 28 avr 2021]. Disponible sur: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

2. 253-Papageorgiou_HDRRF2020_plastic-litter-projects.pdf [Internet]. [cité 2 avr 2021]. Disponible sur: https://edcm.edu.gr/images/news/hdrrf/presentations2020/253-Papageorgiou_HDRRF2020_plastic-litter-projects.pdf

3. About us - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/about-us/

4. Accueil - ReCleanSea - Collecte et recyclage de plastiques marins [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.recleansea.org/

5. Aegean Marine Life Sanctuary - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/the-aegean-marine-life-sanctuary/

6. Archipelago. In: Wikipedia [Internet]. 2021 [cité 6 avr 2021]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Archipelago&oldid=1010293620

7. Benjamin Mendy s'engage dans une campagne de sensibilisation à la pollution plastique des océans | Sport Stratégies [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.sportstrategies.com/benjamin-mendy-sengage-dans-une-campagne-de-sensibilisation-a-la-pollution-plastique-des-oceans/

8. Campagne contre le plastique – TAF – The Animal Fund [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://theanimalfund.net/fr/projets/campagne-contre-le-plastique/

9. Coralligene Reefs and Posidonia Seagrass - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/marine-conservation/seagrass-coralligene/

10. Cotons-tiges, gobelets, touillettes… : les objets jetables en plastiques interdits [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.economie.gouv.fr/entreprises/interdiction-plastique-jetable

11. Déchets marins [Internet]. Ministère de la Transition écologique. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-marins

12. Définition | Plastique - Matière plastique | Futura Sciences [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-plastique-13438/

13. Larousse É. Définitions : archipel - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 6 avr 2021]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/archipel/5065

14. Larousse É. Définitions : télédétection - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 30 mars 2021]. Disponible sur: https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/t%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection/77051

15. Eco Navigation - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/eco-navigation/

16. Environnement des dauphins – TAF – The Animal Fund [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://theanimalfund.net/fr/environnement-des-dauphins/

17. Exemples d'actions en matière de gestion des déchets | Bonnes pratiques - Plages | Espace candidats et lauréats [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.pavillonbleu.org/bonnes-pratiques-plages/exemples-d-actions-en-matiere-de-gestion-des-dechets.html

18. Topouzelis KN. Fighting the ocean plastic pollution with the use of satellite images and drone data: Plastic Litter Project (PLP), history and future steps. :55.

19. Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data - YouTube [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=oAkDLbBLHBY

20. FIsh4Life - Guide for sustainable seafood consumption in Greece - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/fish4life-en/

21. Fisheries - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/marine-conservation/fisheries/

22. Forests & Flora - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/terrestrial-conservation/forests-flora/

23. Freshwater Ecosystems - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/terrestrial-conservation/freshwater-ecosystems/

24. GoJelly - ESF - Science Connect [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.esf.org/our-services/choose-your-service/european-projects-coordination/ec-contracts/gojelly/

25. Imagerie Satellite Haute Résolution: Données Fiables En Ligne [Internet]. 2020 [cité 12 juin 2021]. Disponible sur: https://eos.com/fr/products/high-resolution-images/

26. Interactive Autonomous DYnamic Systems [Internet]. IADYS. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: http://www.iadys.com/en/

27. Island Fauna - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/terrestrial-conservation/island-fauna/

28. Ocean Plastic Webinars. [Lauren Biermann] Detecting floating macroplastics by satellite [Internet]. 2021 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=FVvr4CKj8M8

29. Littoral Ecosystems - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/marine-conservation/littoral-ecosystems/

30. Macroplastic | Encyclopedia [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://encyclopedia.pub/3018

31. Map [Internet]. Poseidon System. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://poseidon.hcmr.gr/map

32. Marine conservation. In: Wikipedia [Internet]. 2021 [cité 1 avr 2021]. Disponible sur:

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Marine_conservation&oldid=1013355171

33. Marine litter [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/marinelitter-default.aspx

34. Marine Mammal Research & Conservation Internships - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/get-involved/placements-and-internships/marine-mammal-research-conservation-internship/

35. staff E editorial. Marine plastic litter detected and quantified using deep-learning tool [Internet]. 2021 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://eandt.theiet.org/content/articles/2021/02/deep-learning-tool-detects-and-counts-marine-litter/

36. Microplastics - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/our-work/laboratory-research/microplastics/

37. microplastics | Definition, Properties, & Plastic Pollution [Internet]. Encyclopedia Britannica. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.britannica.com/technology/microplastic

38. Microplastics | National Geographic Society [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/microplastics/

39. Microplastique : définition et explications [Internet]. AquaPortail. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.aquaportail.com/definition-2172-microplastique.html

40. Microplastiques - ECHA [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://echa.europa.eu/fr/hot-topics/microplastics

41. Microplastiques et Règlement Reach [L'essentiel] [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://orme-conseil.com/microplastiques-reach/

42. MILCZAREK.pdf [Internet]. [cité 29 avr 2021]. Disponible sur: http://eoscience.esa.int/landtraining2017/files/posters/MILCZAREK.pdf

43. AIR Centre. Networking Friday with Konstantinos Topouzelis (UAegean) [Internet]. 2021 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=2l9T4fKwISA

44. MULHERN G. New modelling tool to identify the distribution and accumulation of floating marine litter [Internet]. EU Science Hub - European Commission. 2020 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/jrc/en/science-update/new-modelling-tool-identify-distribution-and-accumulation-floating-marine-litter

45. Oceans [Internet]. The Ocean Cleanup. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://theoceancleanup.com/oceans/

46. PLASTIQUE : Définition de PLASTIQUE [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.cnrtl.fr/definition/plastique

47. Topouzelis K. PLP2019 dataset [Internet]. Zenodo; 2020 [cité 11 juin 2021]. Disponible sur: https://zenodo.org/record/3752719

48. Race for Water | Le collector – Race For Water [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur:

https://www.raceforwater.org/fr/fondation/act/le-collector/

49. Research bases - Archipelagos [Internet]. [cité 6 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/about-us/research-bases/

50. Rideaux de bulles d'air I Redirection des déchets flottants I Probul [Internet]. Probul. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://probul.fr/produit/rideau-de-bulles-redirection-debris-flottants/

51. Satellite imagery is helping to detect plastic pollution in the ocean [Internet]. Mongabay Environmental News. 2020 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://news.mongabay.com/2020/05/satellite-imagery-is-helping-to-detect-plastic-pollution-in-the-ocean/

52. Save the Aegean - Archipelagos [Internet]. [cité 1 avr 2021]. Disponible sur: https://archipelago.gr/en/save-the-aegean/

53. Wilson J. Seagrass meadows could help remove plastic from the oceans [Internet]. 2021 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://eandt.theiet.org/content/articles/2021/01/seagrass-meadows-could-help-remove-plastic-from-the-oceans/

54. Seagrass meadows could help remove plastic from the oceans | E&T Magazine [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://eandt.theiet.org/content/articles/2021/01/seagrass-meadows-could-help-remove-plastic-from-the-oceans/

55. Sentinel-2 [Internet]. [cité 28 avr 2021]. Disponible sur: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2

56. Mayer B, Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. Atmos Chem Phys. 26 juill 2005;5(7):1855-77.

57. Télédétection : définition et explications [Internet]. Techno-Science.net. [cité 30 mars 2021]. Disponible sur: https://www.techno-science.net/definition/7846.html

58. The Beach Clean Project [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.thesu.org.uk/organisation/Beachcleanproject/

59. magazine LP. Tortues et dauphins, premières victimes des sacs en plastique [Internet]. Le Point. 2016 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://www.lepoint.fr/environnement/tortues-et-dauphins-premieres-victimes-des-sacs-en-plastique-01-07-2016-2051177_1927.php

60. Towards a plastic-free Aegean Sea [Internet]. [cité 2 avr 2021]. Disponible sur: https://ec.europa.eu/environment/efe/news/towards-plastic-free-aegean-sea-2018-07-03_en

61. Community SNS. Using Satellites to Detect Plastic Patches Floating in Coastal Waters [Internet]. Springer Nature Sustainability Community. 2020 [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: http://sustainabilitycommunity.springernature.com/users/390011-lauren-biermann/posts/66289-using-satellites-to-detect-plastic-patches-floating-in-coastal-waters

62. Using Satellites to Detect Plastic Patches Floating in Coastal Waters | Springer Nature Sustainability Community [Internet]. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: https://sustainabilitycommunity.springernature.com/posts/66289-using-satellites-to-detect-plastic-patches-floating-in-coastal-waters

63. WHO IS BOYAN SLAT? [Internet]. Clean Ocean Foundation. [cité 29 mars 2021]. Disponible sur: http://www.cleanocean.org/1/post/2017/05/who-is-boyan-slat.html

ETUDE DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES DÉCHETS MARINS FLOTTANTS AU SEIN DE LA MER EGÉE

A PARTIR D'UN MODÈLE PRÉDICTIF ET D'IMAGES SATELLITES SENTINEL-2

Résumé :

En 2020, le journal Le Monde estime à près de 230 000 tonnes la quantité de plastique jetée chaque année dans la Méditerranée. Outre les conséquences désastreuses sur l'environnement marin, que ce soit au niveau des espèces qui se retrouvent enchevêtrées dans des filets ou de celles qui se nourrissent de microplastiques, on ne connaît pas encore les conséquences que cela pourrait avoir sur la santé humaine. L'Agence Européenne des Produits Chimiques (ECHA) a d'ailleurs évalué ce risque comme inacceptable et proposé une restriction des microplastiques qui pourrait être adoptée à l'horizon 2021-2022. Mais la tâche semble plus complexe pour retirer le plastique déjà présent dans les océans. En effet, si des volontaires collectent les déchets échoués sur les plages, le suivi des déchets marins flottants reste très faible. Pourtant, avec l'action des vents et des courants marins, on peut supposer la formation de gyres et donc d'amas de débris. C'est sur la base de cette hypothèse que nous allons voir s'il est possible de prédire la répartition des déchets marins flottants au sein de la mer Egée, et si oui, nous demander en quoi cela nous aiderait à retirer le plastique des océans.

Mots-clés :

conservation marine, macroplastique, déchets marins flottants, mer Egée, images satellites, télédétection

M2 AIDE À LA DÉCISION EN AMÉNAGEMENT URBAIN ET RÉGIONAL (ADAUR)
PARCOURS SCIENCE DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE POUR L'INNOVATION TERRITORIALE (SIGIT)

UFR SLHS - Sciences du Langage, de l'Homme et de la Société

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

2021