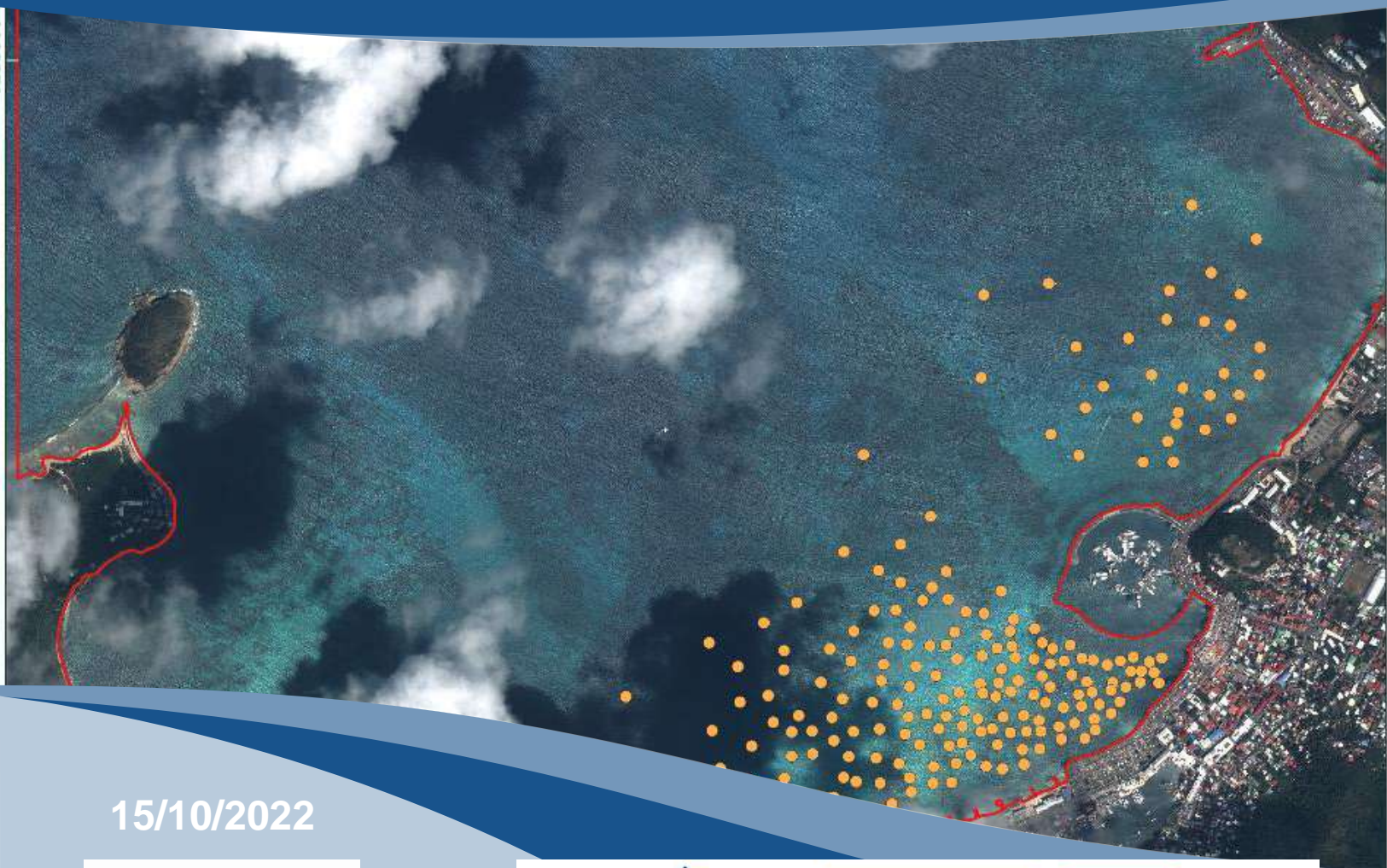


Interprétation d'images satellitaires et de photos aériennes, analyse de données AIS pour estimer les zones de mouillages dans la Grand'Baie

Etablissement Portuaire Saint- Martin, i-Sea, Marché 2022-04

Rapport méthodologique



15/10/2022

FICHE DOCUMENTAIRE

Date	21/11/2022
-------------	------------

Maitre d'ouvrage	Etablissement portuaire de Saint-Martin
Réalisation	i-Sea 30 avenue de Canteranne 33600 PESSAC Site internet : http://i-sea.fr/fr/ Terra Maris Site internet : www.terramaris.fr
Rédacteurs	Benoit Beguet : benoit.beguet@i-sea.fr Rémi Budin : remi.budin@i-sea.fr Matthieu Le Tixerant : matthieu.letixerant@terramaris.fr
Approbateur	Virginie Lafon : virginie.lafon@i-sea.fr
Citation recommandée	i-Sea, Terramaris, 2022. Interprétation d'images satellitaires et de photos aériennes, analyse de données AIS pour estimer les zones de mouillages dans la Grand'Baie). i-Sea, 43 p.

Avertissement : Ce rapport est exclusivement dédié à la lecture du comité de pilotage de l'étude. Il ne peut être ni révisé, ni modifié. Il peut être diffusé à discrétion du maître d'ouvrage. Il devra être impérativement cité pour toute communication publique, avec une mention explicite aux auteurs de l'étude.

Table des matières

Table des matières	3
1 Contexte et objectifs de l'étude	6
2 Méthodologie	8
2.1 Détection des bateaux par télédétection	8
2.1.1 Images Pléiades	8
2.1.2 Sur scènes Worldview (Images Google Earth)	11
2.1.3 Prise en compte de la couverture nuageuse.....	11
2.2 Densité des bateaux au mouillage par télédétection	11
2.3 Densité des bateaux au mouillage AIS.....	15
3 Données	16
3.1 Images satellitaires	16
3.2 Données AIS.....	16
4 Production et résultats	17
4.1 Cartes des détections de bateaux par télédétection.....	17
4.2 Cartes des densités de bateaux au mouillage par télédétection.....	18
4.3 Cartes des densités de bateaux au mouillage par AIS	23
4.4 Comparaison des détections de navires par télédétection et données AIS	32
a. Cohérence des deux sources de données	38
b. Réflexions sur la taille des navires	38
4.5 Sélection des sites de plongée	40
5 Conclusions	43
6 Bibliographie	Erreur ! Signet non défini.

Table des illustrations

Figure 1. Localisation du port de Galisbay au sein de la Grand'Baie et limites du site d'étude.....	6
Figure 2. Cartographie des habitats marins de la Baie de Marigot par analyse d'images satellite.	7
Figure 3. Prédiction brute de navires au mouillage par Deep Learning (polygones rouge) sur une zone de l'image Pléiade du 23/09/2021.	9
Figure 4. Illustration du processus d'extraction de la longueur des navires (rectangle bleu) au mouillage des prédictions sur une zone de l'image Pléiade du 23/09/2021.	10
Figure 5. Positions prédites des navires au mouillage sur une zone de l'image Pléiade du 23/09/2021 (point orange).	10
Figure 6. Nuages délimités par photo-intepretation sur l'image Pléiade du 10/03/2022.	11
Figure 7. Positions prédites des navires au mouillage sur l'image Pléiade du 10/03/2022.	12
Figure 8. Carte de densité de mouillage au 10/03/2021.	13
Figure 9. Superposition des positions prédites de navires au mouillage avec la carte de densité de mouillage pour le 10/03/2021.....	13
Figure 10. Illustration de l'impact potentiel des nuages sur la carte de densité de mouillage au 10/03/2021.	14
Figure 11 Carte de densité de mouillage au 10/03/2021 pour les navires de longueurs comprises entre 15 et 50 m.	14
Figure 12. Cartographie des postions et tailles de navires au mouillage, détection automatique sur la scène Pléiades du 10/09/2021.....	17
Figure 13 Cartographie des postions et tailles de navires au mouillage, photo-interprétation sur une scène Google Earth 28/04/2022.	18
Figure 14. Cartographie de la densité de navires inférieurs à 15 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).....	19
Figure 15. Cartographie de la densité de navires d'une longueur comprise entre 15 m et 50 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).	19
Figure 16. Cartographie de la densité de navires d'une longueur comprise entre 50 m et 100 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).	20
Figure 17. Cartographie de la densité de navires d'une supérieure à 100 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).....	20
Figure 18. Cartographie de la densité de navires (de toute taille) au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).....	21
Figure 19. Cartographie de la densité de navires (de toute taille) au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022), et de la surface de répartition des herbiers prédites (i-Sea 2021).	21
Figure 20. Positions AIS – TOUS Navires.	23
Figure 21. Densité de positions AIS – TOUS Navires.	24
Figure 22. Typologie des navires au mouillage et nombre de positions/navires par type.	25
Figure 23. Positions AIS – Voiliers.	26
Figure 24. Densité de positions AIS – Voiliers.	26
Figure 25. Positions AIS – Navires de Loisirs – Yacht.	27
Figure 26. Densité de positions AIS – Navires de loisir – Yacht.....	27
Figure 27. Positions AIS – Cargo et Tanker.	28
Figure 28. Densité de positions AIS – Cargo et Tanker.	28
Figure 29. Positions AIS – Navires de passagers.	29
Figure 30. Densité de positions AIS – Navires de passagers.	29

Figure 31. Positions AIS – Divers types de navires.	30
Figure 32. Densité de positions AIS – Divers types.	30
Figure 33. Evolution mensuelle par type de navire entre mai 2021 et mai 2022.	31
Figure 34. Illustration de la méthode d'association des relevés sélectionnés avec les positions détectées par satellite.	33
Figure 35. Exemple de positions de bateaux détectées par télédétection et repérés par AIS.	33
Figure 36. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes.	34
Figure 37. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires de taille inférieure à 15 m.	35
Figure 38. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires ayant une taille comprise entre 15 et 50 m.	35
Figure 39. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires ayant une taille comprise entre 50 et 100 m.	36
Figure 40. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires de taille supérieure à 100 m.	36
Figure 41. Comparaison des détections de bateaux par télédétection et AIS, contexte nuageux.	37
Figure 42. Matrice de confusion des classes de tailles entre les détections satellite (ordonnées) et les relevés AIS (abscisses).	39
Figure 43. Comparaison des tailles de bateaux détectées par télédétection et renseignées par AIS.	39
Figure 44. Sites de plongée sous-marine sélectionnés pour les navires de type cargo/tanker.	40
Figure 45. Sites de plongée sous-marine sélectionnés pour les navires de passagers.	41
Figure 46. Sites de plongée sous-marine sélectionnés pour les navires de type Loisir / Yacht.	41
Figure 47. Cartographie récapitulative des sites de plongée sélectionnés.	42
Tableau 1. Définition des classes de taille de bateaux.	9
Tableau 2. Bilan des données images traitées pour l'étude.	16
Tableau 3. Tableau de comptage récapitulatif par classes de tailles.	22
Tableau 4. Tableau de comptage récapitulatif par classes de tailles précises (images Pléiades seulement).	22
Tableau 5. Statistiques des appariements entre les deux sources de données pour différentes tailles de navire.	38

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'établissement portuaire de Saint-Martin est engagé dans un projet de développement majeur du Port de Galisbay (Figure 1), qui impliquerait la création de nouvelles infrastructures pour faciliter tant les activités commerciales que touristiques.



Figure 1. Localisation du port de Galisbay au sein de la Grand'Baie et limites du site d'étude.

Ce projet s'accompagne d'une étude d'impact ambitieuse sur le plan environnemental. L'herbier de phanérogames marines, qui occupe une partie de la Grand'Baie (Figure 1) compte parmi les compartiments écologiques les plus vulnérables visés par cette étude. Une actualisation cartographique de son emprise a notamment été réalisée par i-Sea et Impact Mer en 2021 par l'analyse d'images satellite Pléiades croisées à des vérités terrain (Figure 2).

La baie de Galisbay, et ses herbiers, subissent d'autres pressions : d'une part la fréquentation nautique et en particulier les mouillages forains associés à des types de navires diversifiés et, d'autre part, la turbidité injectée dans la baie depuis le marais de Marigot.

Pour contribuer à l'analyse de ces pressions, l'établissement portuaire de Saint-Martin a fait le choix de l'exploitation d'observations satellitaires, complétées de données AIS pour caractériser la fréquentation nautique et météorologiques pour alimenter l'étude de turbidité.

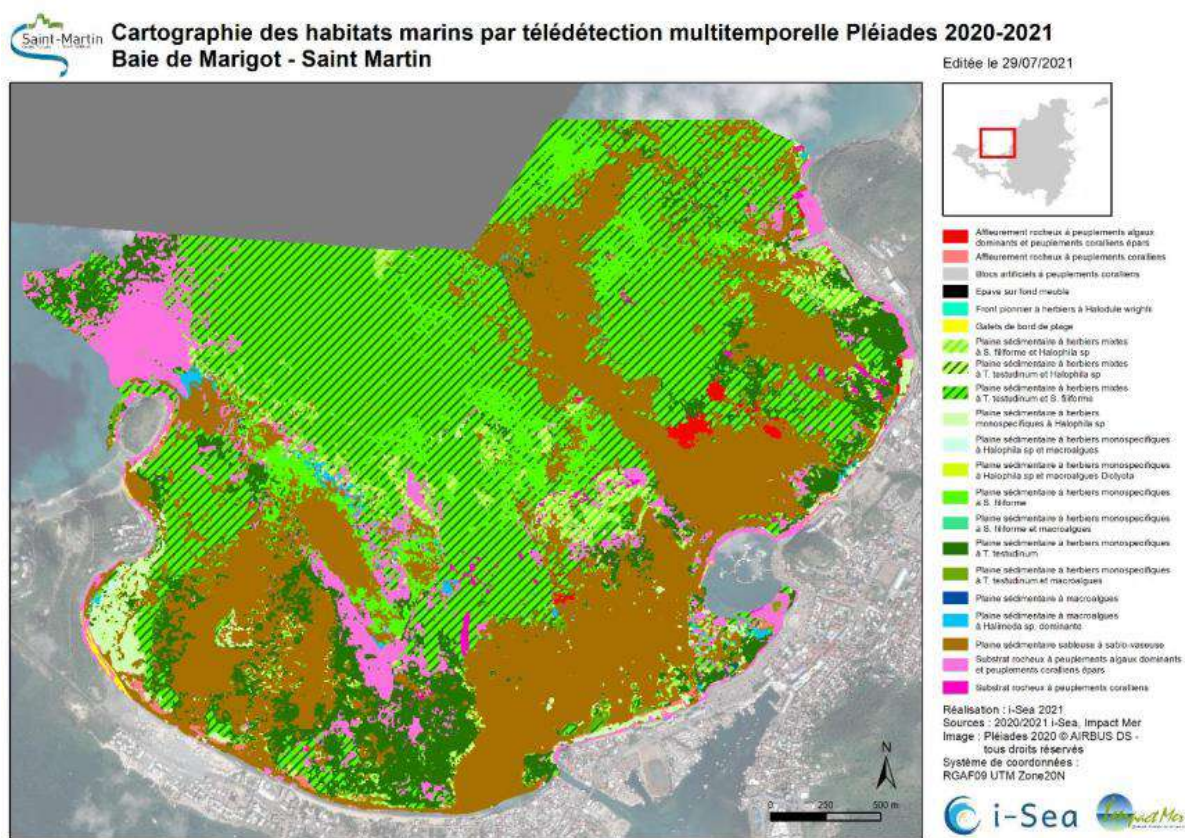


Figure 2. Cartographie des habitats marins de la Baie de Marigot par analyse d'images satellite.

Le présent rapport rend compte des travaux réalisés pour mettre en perspective la pression du mouillage sur les herbiers marins, travaux organisés suivant deux phases d'analyse.

Pour la **Phase 1** : L'approche proposée pour l'évaluation de la fréquentation nautique dans la Grand'Baie repose sur l'utilisation de données d'imagerie acquises par des capteurs à très haute résolution spatiale comme Pléiades (0,5 m). A cette échelle, tous les bateaux de taille supérieure à 2 m sont détectés (i-Sea, 2021¹).

L'île de Saint-Martin est particulièrement bien couverte par les données Pléiades. Cette base de données conséquente est disponible gratuitement grâce au dispositif Dinamis et est complétée par les images provenant de GoogleEarth. L'ensemble du catalogue d'images constitué va permettre de produire des comptages en sélectionnant plusieurs images pour chaque type de saison de navigation.

La multiplication des observations et dénombrements permet de recenser les mouillages et, par analyse statistique, d'apporter des éléments concrets sur les zones de mouillages (points d'impact) et connaître la fréquentation (nombre de navires, tailles, fréquences, ...) sur une période de référence.

¹ i-Sea, 2021. Détection et comptage de bateaux par analyse radiométrique et machine learning à partir d'images satellitaires Sentinel-2 et Pléiades en appui à l'évaluation des retombées économiques de la filière nautique de définition d'outils de suivi de la fréquentation nautique et de définition de la stratégie nautique de la Martinique. Rapport méthodologique, 29 p.

Pour des raisons d'éclairage solaire, les images Pléiades sont toujours acquises autour de la même heure, à savoir entre 10 et 11 heure locale. Le taux de fréquentation nautique estimé à partir de ces données sera donc toujours et uniquement représentatif de l'activité nautique réelle à cette heure de la journée, ce qui constitue une limite de l'approche satellitaire. Enfin, les images satellite très haute résolution spatiale ne donnent accès qu'à une vision temporelle très partielle, ne serait-ce que par l'effet occultant de la nébulosité. Pour pallier ces difficultés, il est important de compléter l'analyse spatiale par l'exploitation des données AIS.

La Phase 2, à partir de données AIS, l'objectif est d'obtenir une vision fine (H24, 7j/7) des activités de mouillage des navires équipés de cette technologie (cargos/tankers, navires de passagers, voiliers, yacht et bateaux de plaisance au long court) dans la baie.

Une analyse spécifique visant à sélectionner des sites de plongée (vérité terrain de l'impact des mouillages sur les herbiers) a également été réalisée afin de :

- Sélectionner les zones a priori les plus fortement impactées par des actions de mouillage lors de la période de l'étude
- Vérifier si des navires mouillent d'une manière redondante sur les sites sélectionnés

Cependant, les activités de mouillage des plus petits navires (généralement non équipés d'AIS) ne pourront pas être obtenues à partir de l'analyse des données AIS. Il y aura donc un biais pour ces catégories de navires que nous essaierons de combler par les données et les conclusions des analyses complémentaires réalisées à partir des images satellites de la phase 1.

Pour cette étude, les données et observations acquises au cours de ces 12 derniers mois qui ont vu une reprise significative des activités nautiques (post Irma et post Covid) ont été analysées.

2 METHODOLOGIE

Depuis la tempête Irma, l'île de Saint-Martin bénéficie de couvertures Pléiades très régulières. Ainsi, le Geostore Airbus propose 11 images de grande qualité sur la période mai 2021 – mai 2022, auxquelles s'ajoutent 5 images MAXAR (30 cm de résolution spatiale) visible sous Google Earth. Ces 2 bases de données cumulées forment un ensemble de 16 observations, partagées entre haute saison (février à mai, août et décembre) et basse saison touristique (juin-juillet, septembre à novembre et janvier).

2.1 Détection des bateaux par télédétection

2.1.1 Images Pléiades

La première étape de l'étude sur les images Pléiade est l'utilisation d'un modèle Deep Learning hérité d'une architecture mask-RCNN², affiné et adapté par i-Sea avec des bases de données d'apprentissage spécifiques. On obtient ainsi une prédiction qui est la délimitation des navires présents sur l'image. La Figure 3 présente un résultat sur une zone de la baie.

² Vijay Badrinarayanan, Alex Kendall, Roberto Cipolla (2015). SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. <https://arxiv.org/abs/1511.00561>.

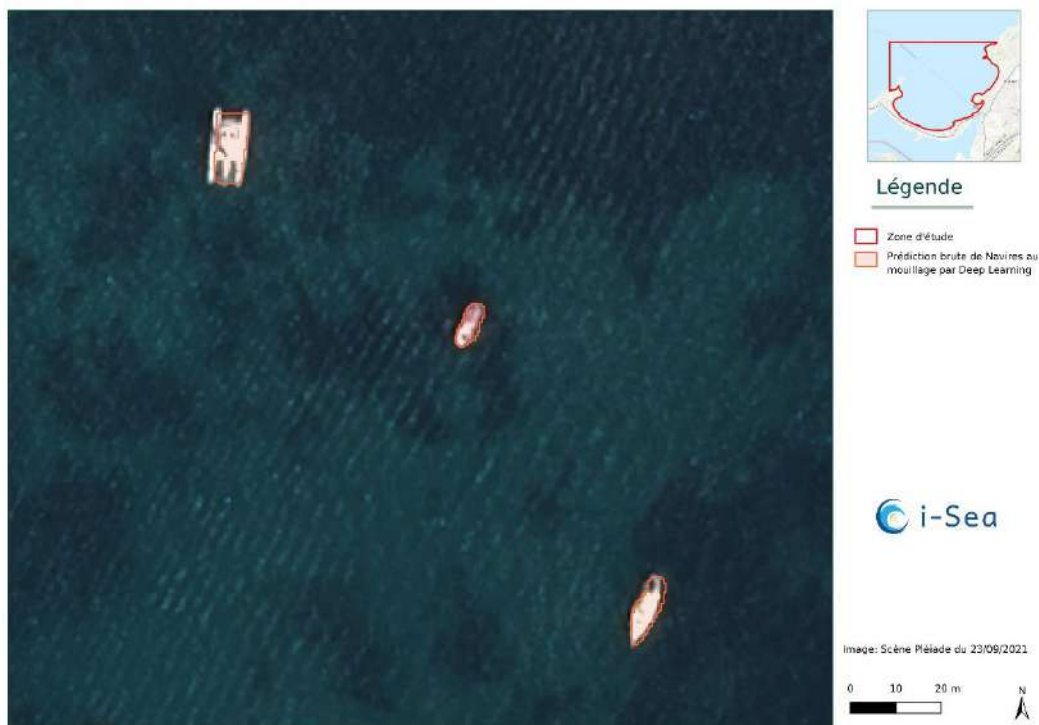


Figure 3. Prédiction brute de navires au mouillage par Deep Learning (polygones rouge) sur une zone de l'image Pléiade du 23/09/2021.

On applique ensuite à ces prédictions un algorithme permettant d'obtenir les dimensions du navire via l'emprise orientée minimale de chaque entité (Figure 4). On garde ensuite la plus grande des dimensions comme étant la longueur, et l'on crée quatre classes de tailles selon le Tableau 1.

Tableau 1. Définition des classes de taille de bateaux.

Classe	Taille
1	$L > 100\text{m}$
2	$100\text{m} \geq L > 50\text{m}$
3	$50\text{m} \geq L > 15\text{m}$
4	$15\text{m} \geq L$

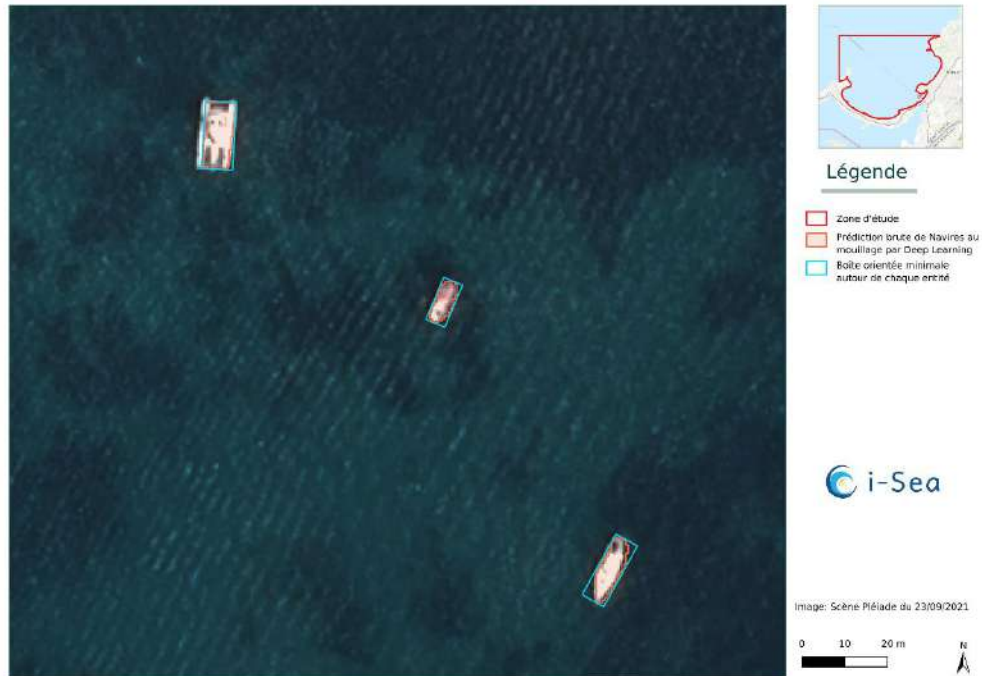


Figure 4. Illustration du processus d'extraction de la longueur des navires (rectangle bleu) au mouillage des prédictions sur une zone de l'image Pléiade du 23/09/2021.

On extrait ensuite la position ponctuelle de chaque navire au mouillage prédit, en y joignant la classe de taille (Figure 5).

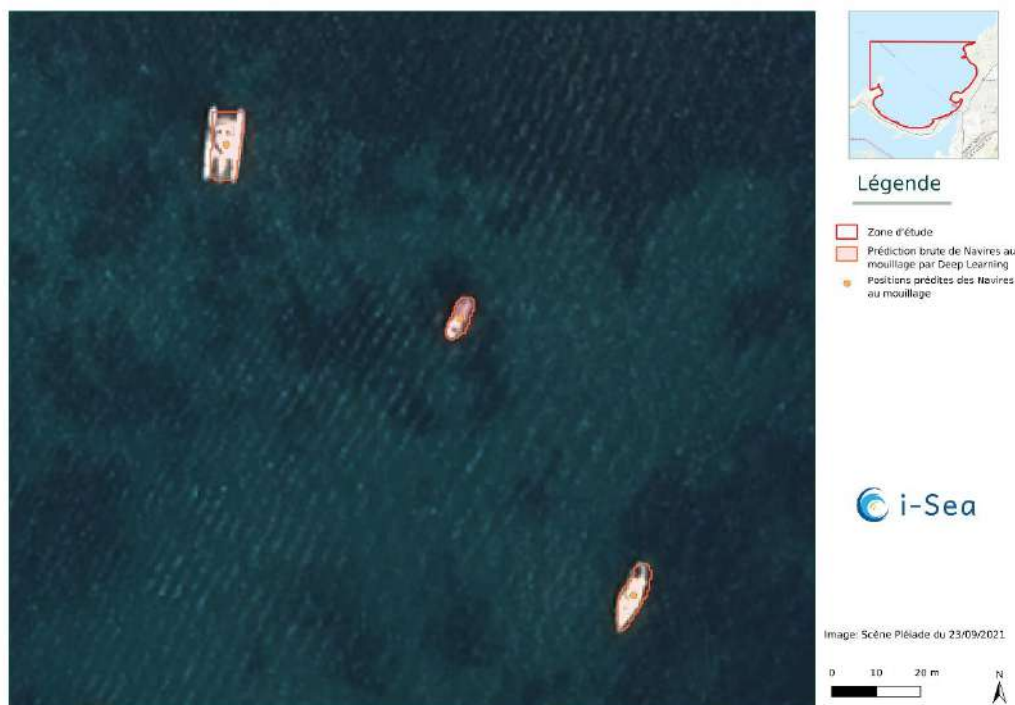


Figure 5. Positions prédites des navires au mouillage sur une zone de l'image Pléiade du 23/09/2021 (point orange).

Suite à ces étapes, il est possible que des erreurs subsistent (navires non prédits par exemple), on corrige les prédictions par photo-interprétation sur toutes les scènes Pléiade. Fait notable mais marginal, il est possible que la taille de certains navires ne puisse pas être récupérée lorsque le navire se situe sous un nuage, ces navires ne sont pas pris en compte par la suite lorsque la classe de taille des navires est considérée.

2.1.2 Scènes Worldview (Images Google Earth)

Chaque navire visible sur l'image est manuellement pointé par un opérateur, ce dernier mesurant également la longueur des navires pour renseigner la classe de taille pendant l'opération de pointage.

2.1.3 Prise en compte de la couverture nuageuse

Pour suivre l'impact de la couverture nuageuse sur la qualité des prédictions, on délimite aussi le contour des nuages par photo-interprétation sur toutes les scènes Pléiades (Figure 6).

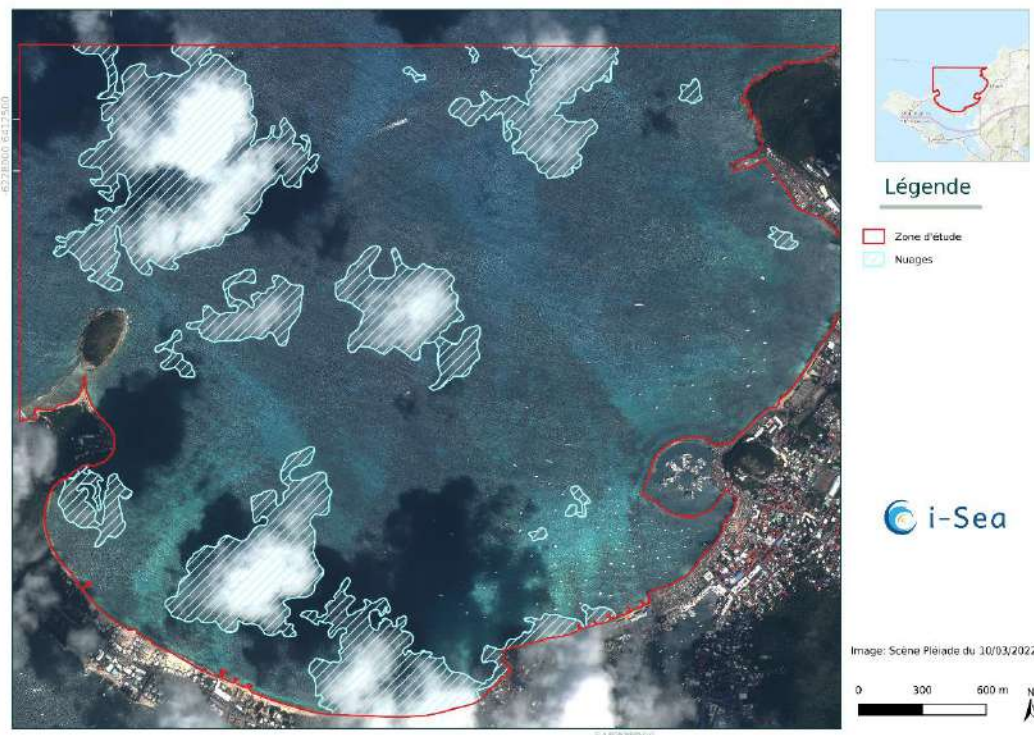


Figure 6. Nuages délimités par photo-interprétation sur l'image Pléiade du 10/03/2022.

2.2 Densité des bateaux au mouillage par télédétection

Pour chacune des scènes satellites, on obtient ainsi un pointage des positions de tous les navires au mouillage dans la baie (Figure 7).

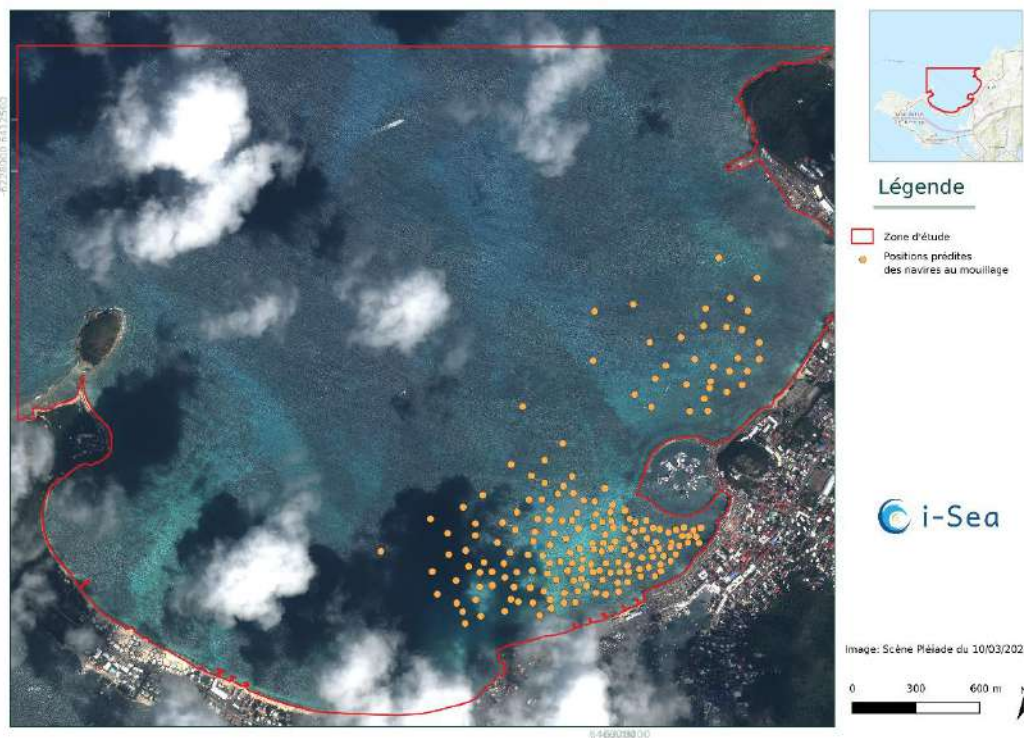


Figure 7. Positions prédites des navires au mouillage sur l'image Pléiade du 10/03/2022.

Au moyen d'une grille 10 m x 10 m, on rasterise chacune des couches contenant les positions des navires au mouillage, et on applique à ce résultat un filtre gaussien ($\sigma=1,5$). Cette dernière opération est mise en place pour pallier le nombre restreint de scènes satellites sur une année, on disperse ainsi la densité autour d'un point pour obtenir un résultat plus souple (Figure 8).

La Figure 9 montre la dispersion de densité autour des points. Xxx manque un bout de phrase pour introduire la Figure 10.

Enfin, pour passer à la carte de densité annuelle, on effectue la moyenne de toute les cartes de densité journalières sur la grille 10 m x 10 m utilisée précédemment. On effectue le même traitement en sélectionnant les navires selon leur taille, il en résulte des cartes de densité journalières et annuelles par classes de tailles. Un exemple est présenté Figure 11.

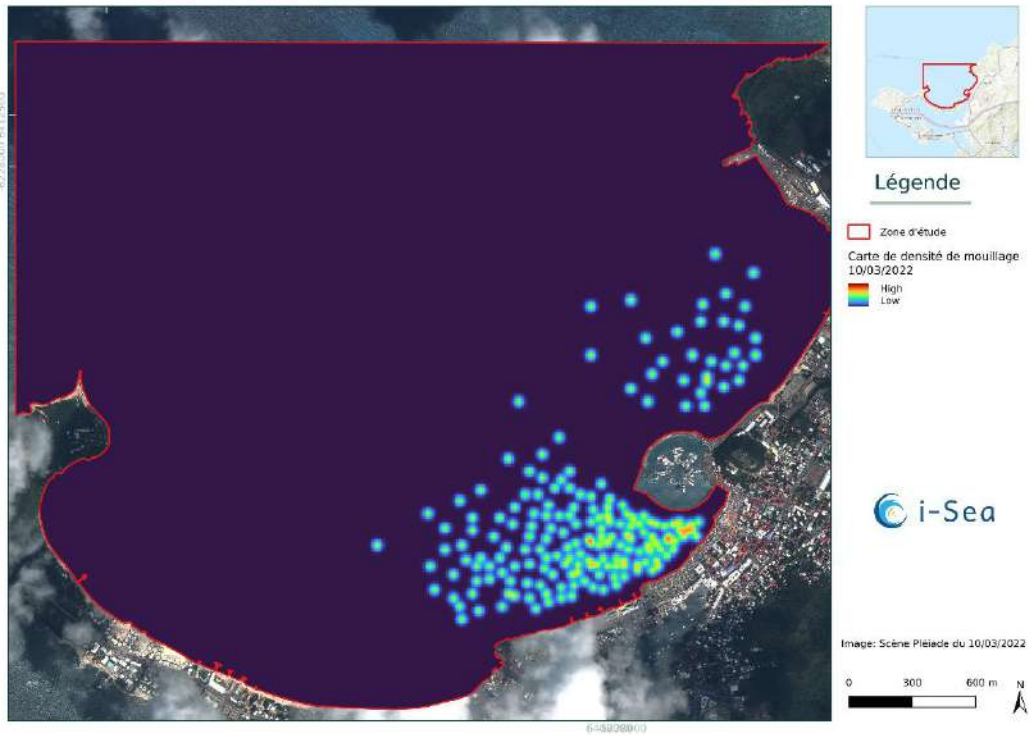


Figure 8 . Carte de densité de mouillage au 10/03/2021.

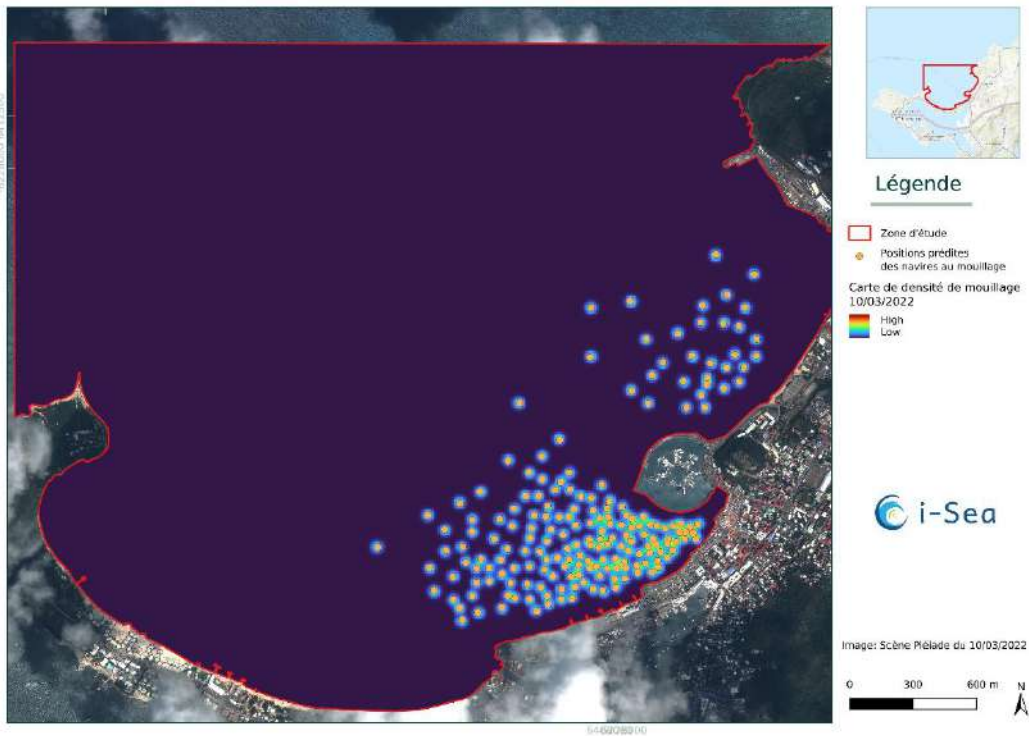


Figure 9. Superposition des positions prédites de navires au mouillage avec la carte de densité de mouillage pour le 10/03/2021.

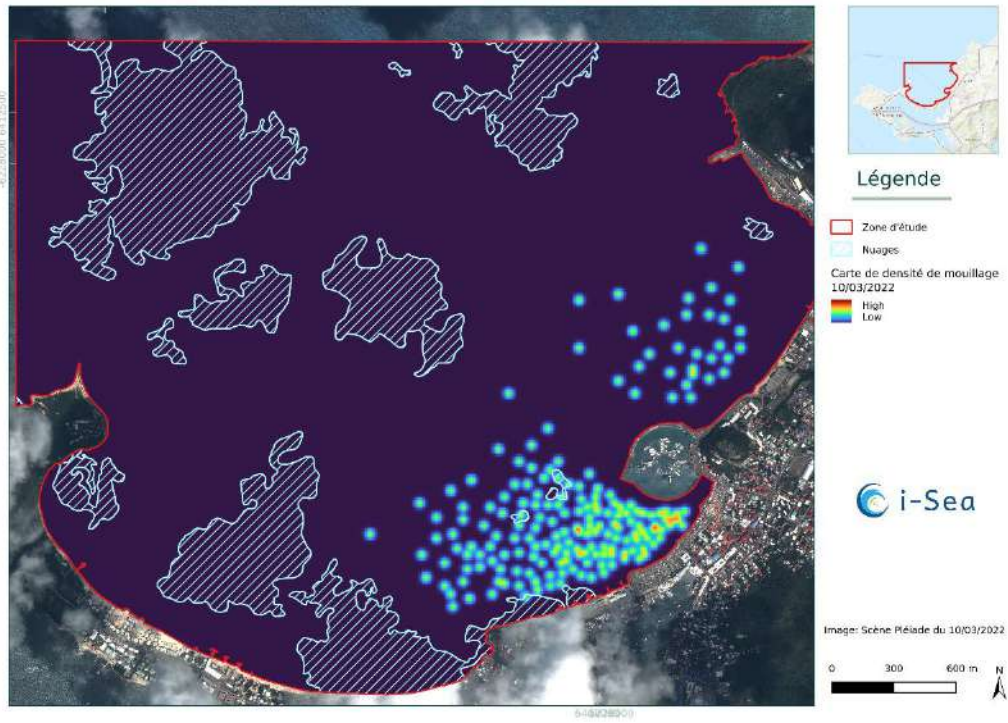


Figure 10. Illustration de l'impact potentiel des nuages sur la carte de densité de mouillage au 10/03/2021.

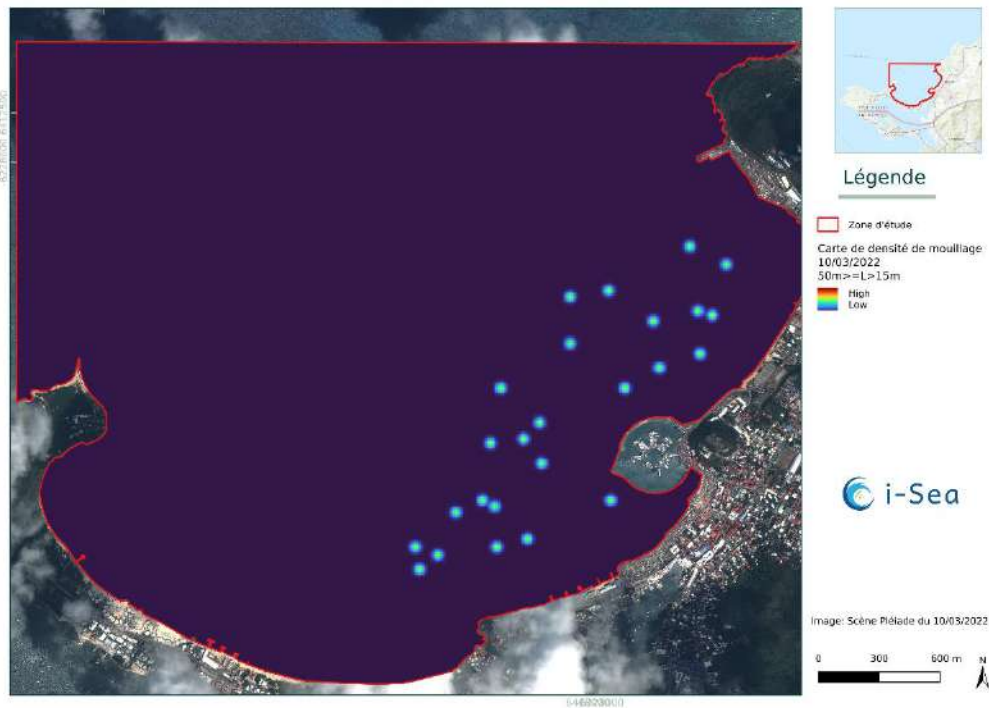


Figure 11 Carte de densité de mouillage au 10/03/2021 pour les navires de longueurs comprises entre 15 et 50 m.

2.3 Densité des bateaux au mouillage à partir de données AIS

L'objectif de ce volet est, à partir de données AIS, d'obtenir une vision spatio-temporelle complémentaire des activités de mouillage (par type de navire) dans la baie sur la période entre mai 2021 et mai 2022.

Tache	Description
1	Acquisition des données AIS (cf. 3.2 Données AIS)
2	<p>Prétraitements</p> <ul style="list-style-type: none"> • Import des données brutes (format CSV) et structuration dans une GeoDatabase géographiquement et sémantiquement cohérente • Traitement préalable (nettoyage) visant à corriger les anomalies (suppression des positions localisées à terre, des signaux dupliqués, des MMSI mal renseignés...). • Recherche systématique sur le site MarineTraffic (Vessels database) pour vérifier les types de navires enregistrés comme « Other/unspecified »
3	<p>Typologie et quantification des navires</p> <ul style="list-style-type: none"> • Extraction d'une liste exhaustive (tableur) des navires par type (avec qualification : nom, mmsi, type et longueur) • Quantification (nombre de navires différents) par type (tanker, cargo, passagers, yachts, voiliers, divers) • Production d'un tableau de synthèse et de graphiques des résultats obtenus
4	<p>Cartographies et analyses spatio-temporelles des zones de mouillage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cartographies des positions au mouillage pour tous navires et par type de navire • Cartographies des densités de positions pour tous navires et par type de navire mettant en évidence les zones préférentielles utilisées • Quantification (nombre de navires différents) des navires ayant mouillés dans la baie pour l'année par type et par mois (et si besoin par zone de mouillage) / Présentation des résultats sous forme de graphiques
5	<p>Sélection et cartographies des sites de plongées</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sélection des zones avec densité de positions fortes et/ou présence de navires de taille importante pour 3 types : Cargo/Tanker, Passagers et Yacht • Estimation de la position de l'ancre en se basant sur la ligne de courbure des positions au mouillage • Analyses statistiques pour estimer si des navires mouillent d'une manière redondante (analyse par dates pour chaque navire des positions au mouillage) • Analyses temporelles pour identifier la durée des mouillages (nombre de jours) par navire sur chaque zone.
6	<p>Analyse comparée Phase 1 – Phase 2</p> <p>Analyse comparée avec les résultats obtenus en phase 1 à partir d'analyse d'images (photographies aériennes et satellites) afin de recouper les résultats et confirmer les zones de mouillage et les types de navires associés.</p>

3 DONNEES

3.1 Images satellitaires

Un nombre important d'images satellitaires a été pris en compte pour cette étude. Nous avons pu, grâce au dispositif Dinamis, disposer de 11 images Pléiades. Cette série d'images a été complétée par des images Worldview, analysées depuis Google Earth. Le **Tableau 2** résume l'ensemble des images utilisées pour la détection des navires.

Tableau 2. Bilan des données images traitées pour l'étude.

Source de l'image	Date d'acquisition	Heure d'acquisition (UTC)	Image utilisée pour la comparaison
WORLDVIEW	2021-05-16	14:10:00	oui
PLEIADES	2021-09-10	14:52:07	oui
PLEIADES	2021-09-23	14:52:14	non
PLEIADES	2021-09-24	14:44:50	non
PLEIADES	2021-10-25	14:56:11	oui
PLEIADES	2021-11-01	14:52:11	oui
PLEIADES	2021-11-07	14:55:36	oui
PLEIADES	2021-12-17	14:48:30	oui
WORLDVIEW	2022-01-01	14:10:00	oui
PLEIADES	2022-01-11	14:55:29	oui
WORLDVIEW	2022-02-11	14:10:00	oui
WORLDVIEW	2022-03-08	14:10:00	oui
PLEIADES	2022-03-10	14:59:18	oui
PLEIADES	2022-04-06	14:51:32	oui
PLEIADES	2022-04-13	14:47:50	oui
WORLDVIEW	2022-04-28	14:10:00	oui

3.2 Données AIS

Les données AIS sont acquises auprès de MarineTraffic selon les caractéristiques suivantes :

- Données AIS terrestres et satellitaires
- Couverture temporelle : 01/05/2021 au 01/05/2022
- Types de navires : TOUS
- Données attributaires : MMSI, Nom, Type, Longueur, Statut, Heure et Vitesse
- Extraction des positions pour lesquelles les navires sont a priori au mouillage : vitesse < 1 nœud et/ou statut = 1 ("at anchor") et/ou statut = 5 ("moored")

4 RESULTATS

4.1 Cartes des détections de bateaux par télédétection

L'ensemble des images sélectionnées ont été traitées (soit de façon automatique pour les images Pléiades, soit par photo-interprétation pour les scènes Google Earth). Pour chaque image traitée, une carte de détection des bateaux et de leur taille a été produite. Les Figure 12 (traitement Pléiades) et Figure 13 (traitement WorldView / Google Earth) présentent des exemples de ces cartographies (l'ensemble des données dérivées du traitement des images au format png est mis à la disposition de l'Etablissement portuaire de St Martin ainsi que les données géographiques au format shapefile).



Figure 12. Cartographie des positions et tailles de navires au mouillage, détection automatique sur la scène Pléiades du 10/09/2021.

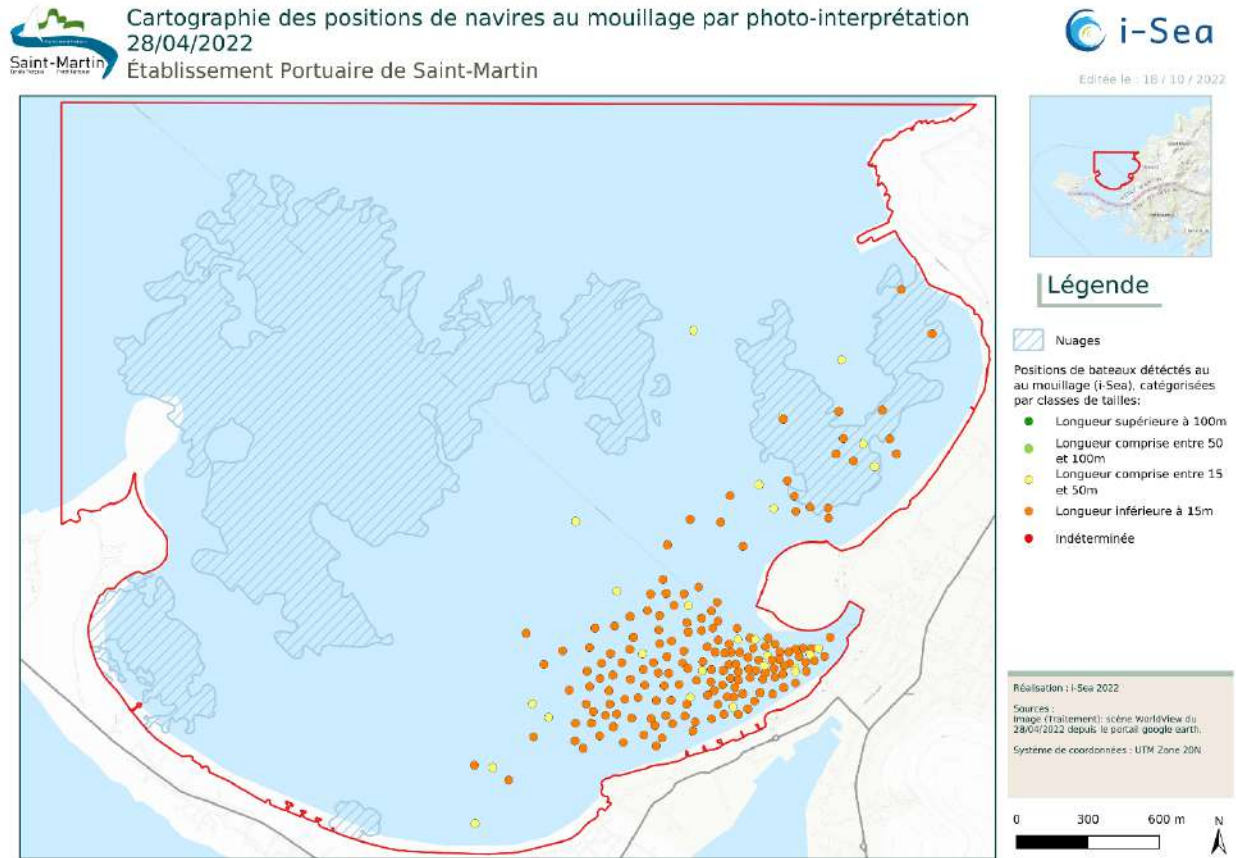


Figure 13 Cartographie des postions et tailles de navires au mouillage, photo-interprétation sur une scène Google Earth 28/04/2022.

4.2 Cartes des densités de bateaux au mouillage par télédétection

Cette section présente les résultats des cartes de densité de navires au mouillage annuelles pour les différentes classes de taille de navires.

Les Figure 14 à Figure 17 présentent les cartographies de densité pour les navires par classes de tailles croissantes. La Figure 18 présente une compilation de l'ensemble de ces couches de données et enfin, la Figure 19, une superposition les densités de navires au mouillage (toutes classes de tailles confondues) avec les emprises d'herbier.

Le Tableau 3 présente un récapitulatif des comptages de navires par classe de taille sur toutes les dates analysées. En complément, le Tableau 4 présente un récapitulatif similaire, avec des classes de tailles comprises entre 15 m et 50 m explosée en plusieurs classes (15 m à 25 m, 25 m à 30 m, 30 m à 50 m). Seules les dates concernant les scènes Pléiades ont été prises en compte dans cette seconde analyse. ...

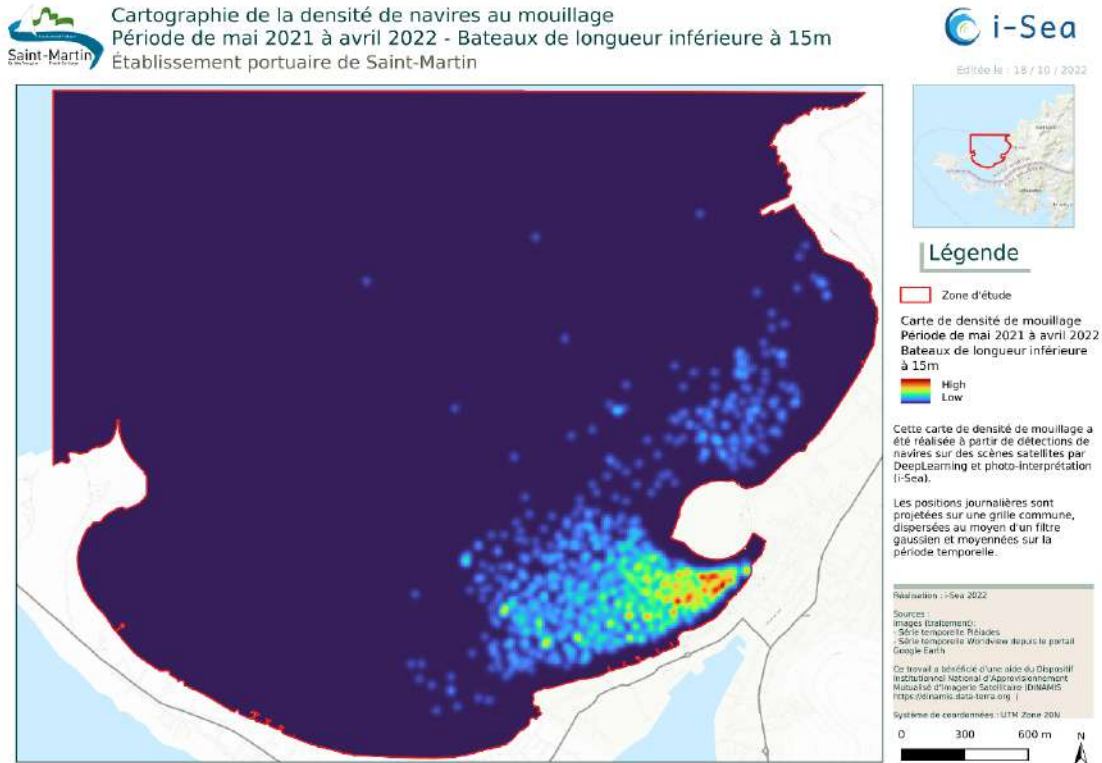


Figure 14. Cartographie de la densité de navires inférieurs à 15 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).

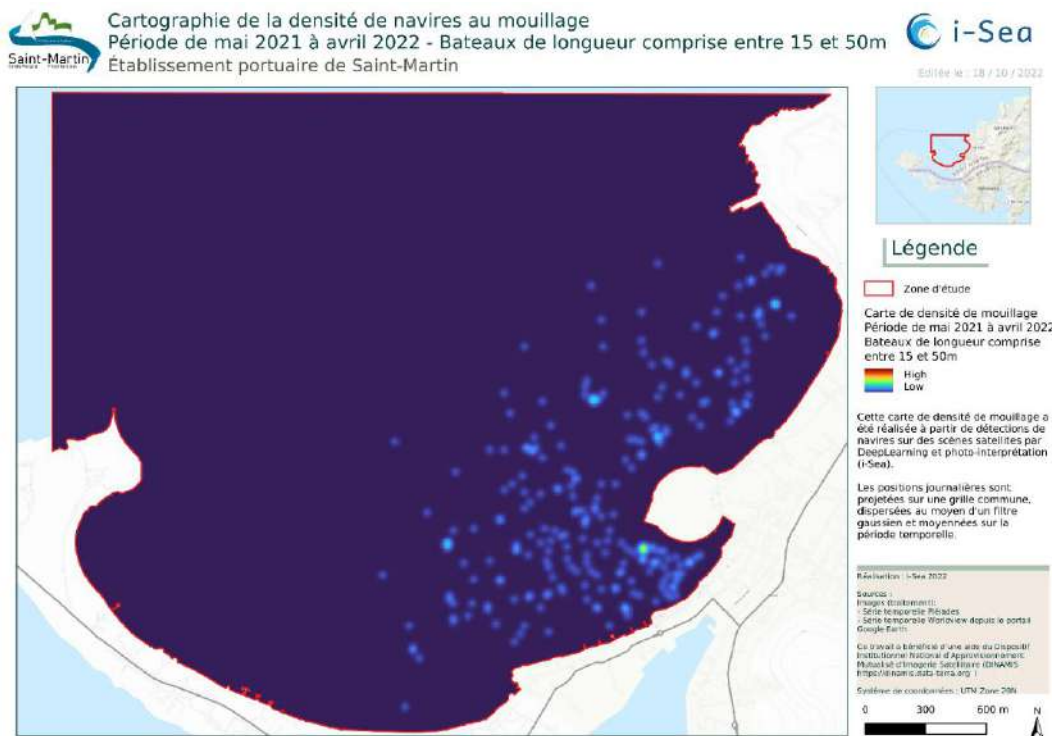


Figure 15. Cartographie de la densité de navires d'une longueur comprise entre 15 m et 50 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).

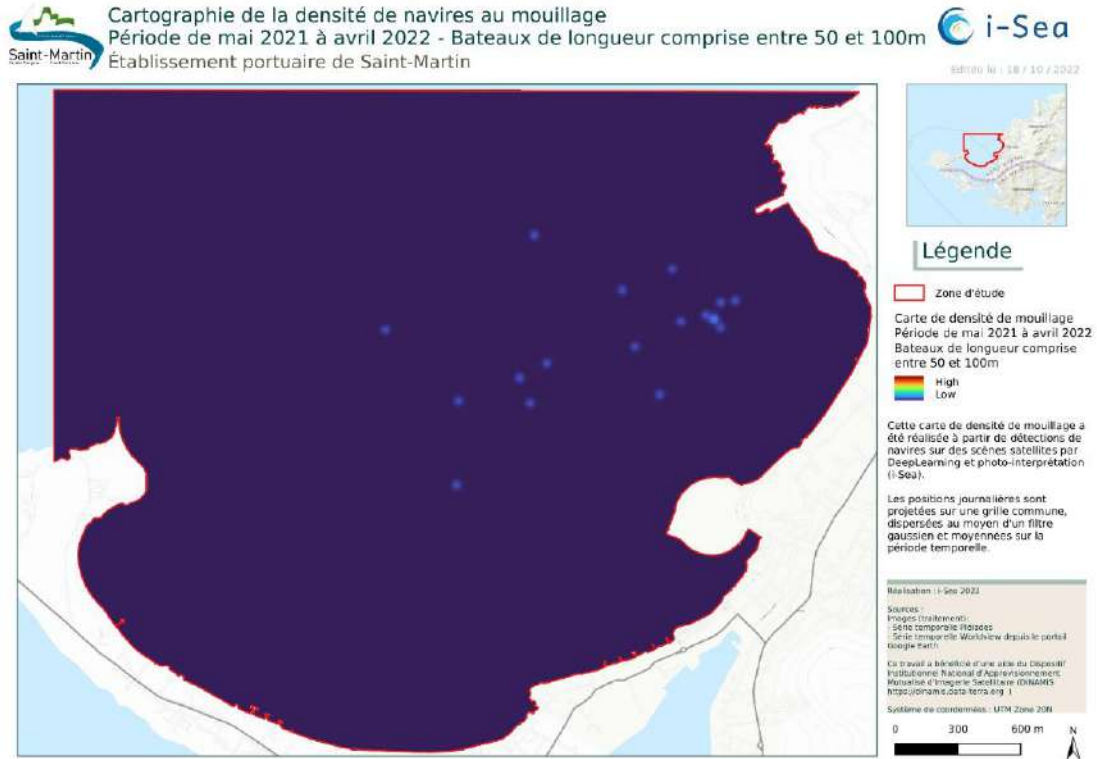


Figure 16. Cartographie de la densité de navires d'une longueur comprise entre 50 m et 100 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).

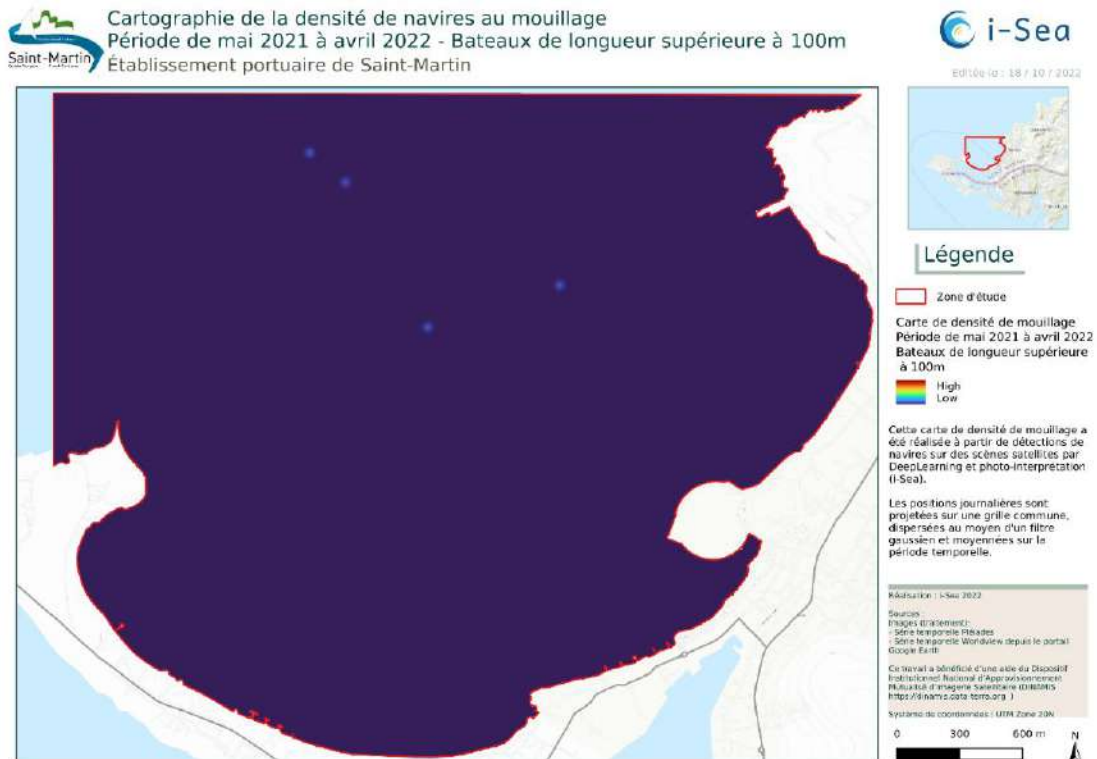


Figure 17. Cartographie de la densité de navires d'une supérieure à 100 m au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).

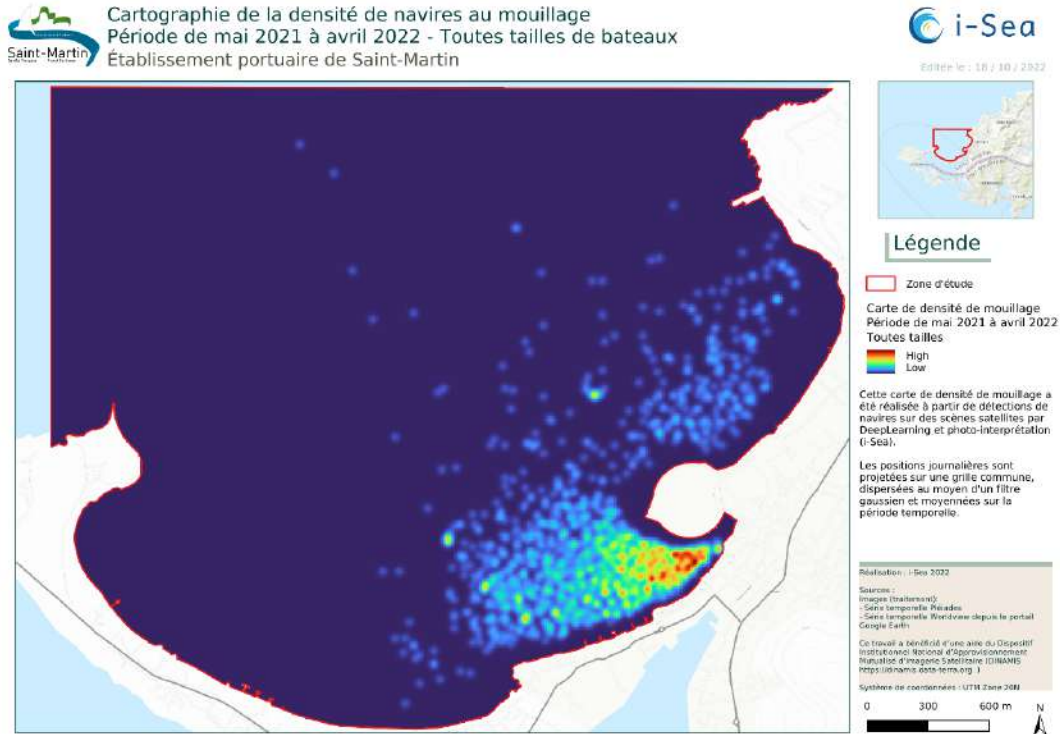


Figure 18. Cartographie de la densité de navires (de toute taille) au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022).

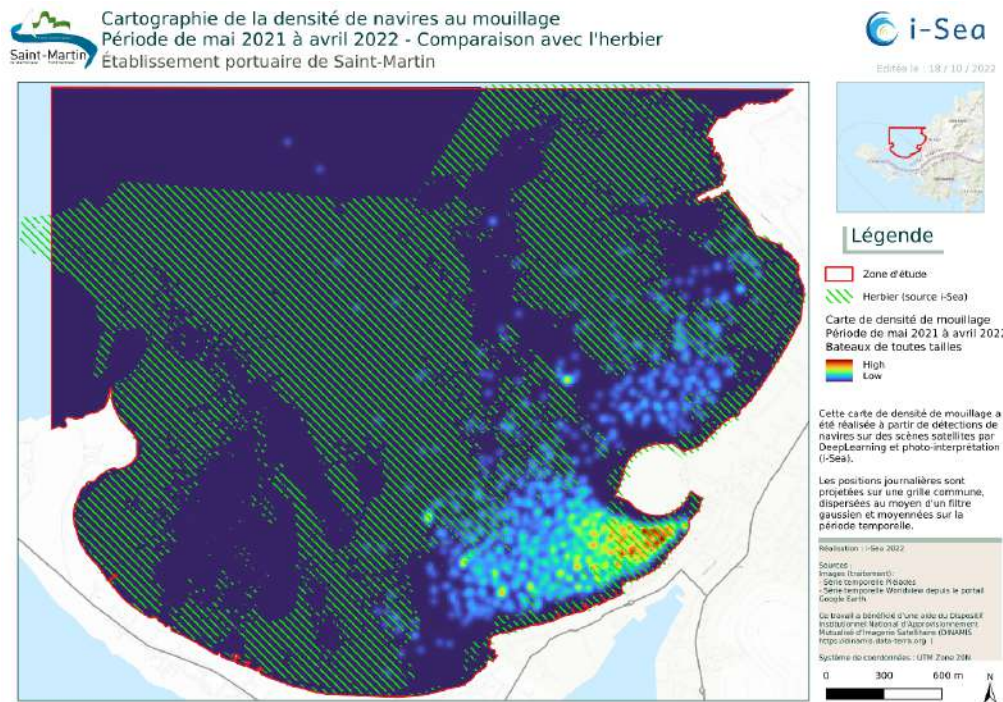


Figure 19. Cartographie de la densité de navires (de toute taille) au mouillage (entre les mois de mai 2021 et avril 2022), et de la surface de répartition des herbiers prédites (i-Sea 2021).

	20210516	20210910	20210923	20210924	20211025	20211101	20211107	20211217	20220101	20220111	20220211	20220308	20220310	20220406	20220413	20220428	Toutes dates
Longueur inférieure à 15 m	102	23	21	7	32	22	40	79	85	92	126	152	165	147	161	166	1420
Longueur comprise entre 15 et 50 m	16	7	5	2	2	3	7	33	33	20		20	25	23	20	26	242
Longueur comprise entre 50 et 100 m	1	1			2	1	1	2	2	5		1		1			17
Longueur supérieure à 100 m						1					2			1			4
Longueur indéterminée										1							1
Toutes longueurs confondues	119	31	26	9	36	27	48	114	120	118	128	173	190	172	181	192	1684

Tableau 3. Tableau de comptage récapitulatif par classes de tailles.

	20210910	20210923	20210924	20211025	20211101	20211107	20211217	20220111	20220310	20220406	20220413	Toutes dates
Longueur inférieure à 15 m	23	21	7	32	22	40	79	92	165	147	161	789
Longueur comprise entre 15 et 25 m	4	4	1	1	2	5	30	15	20	19	17	118
Longueur comprise entre 25 et 30 m	2	1		1		1		2	4	2	2	15
Longueur comprise entre 30 et 50 m	1		1		1	1	3	3	1	2	1	14
Longueur comprise entre 50 et 100 m	1			2	1	1	2	5		1		13
Longueur supérieure à 100 m					1					1		2
Longueur indéterminée								1				1
Toutes longueurs confondues	31	26	9	36	27	48	114	118	190	172	181	952

Tableau 4. Tableau de comptage récapitulatif par classes de tailles précises (images Pléiades seulement).

4.3 Cartes des densités de bateaux au mouillage par AIS

Pour chaque type de navire (Tous types de navires ; cargo/tanker ; voiliers ; loisir/yacht ; passagers ; divers) sont présentées les :

- Carte des positions AIS (Figure 20),
- Carte de la densité des positions AIS (Figure 21),
- Analyse mensuelle de la fréquentation des zones de mouillage (Figure 22).

Toutes les cartes sont visibles en format paysage pleine page dans la présentation jointe en annexe à ce rapport.

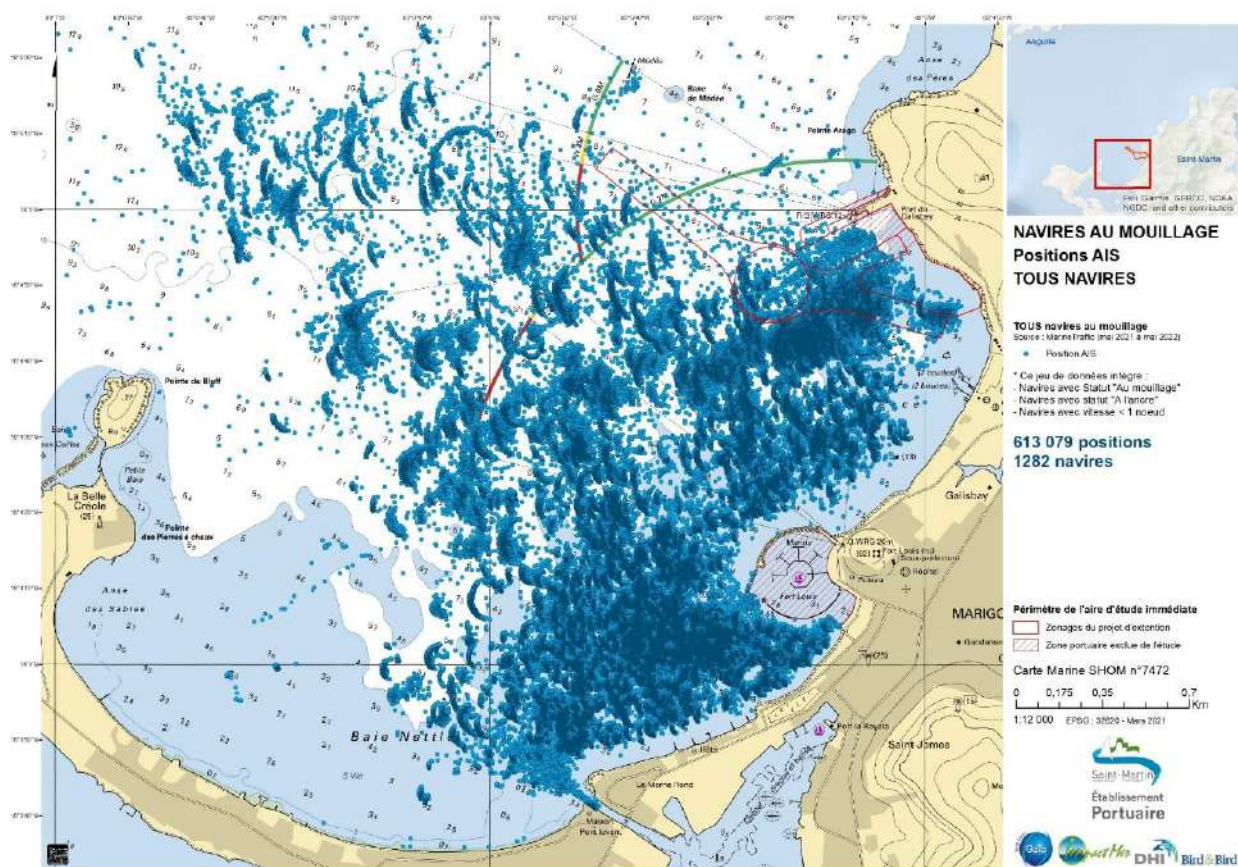


Figure 20. Positions AIS – TOUS Navires.

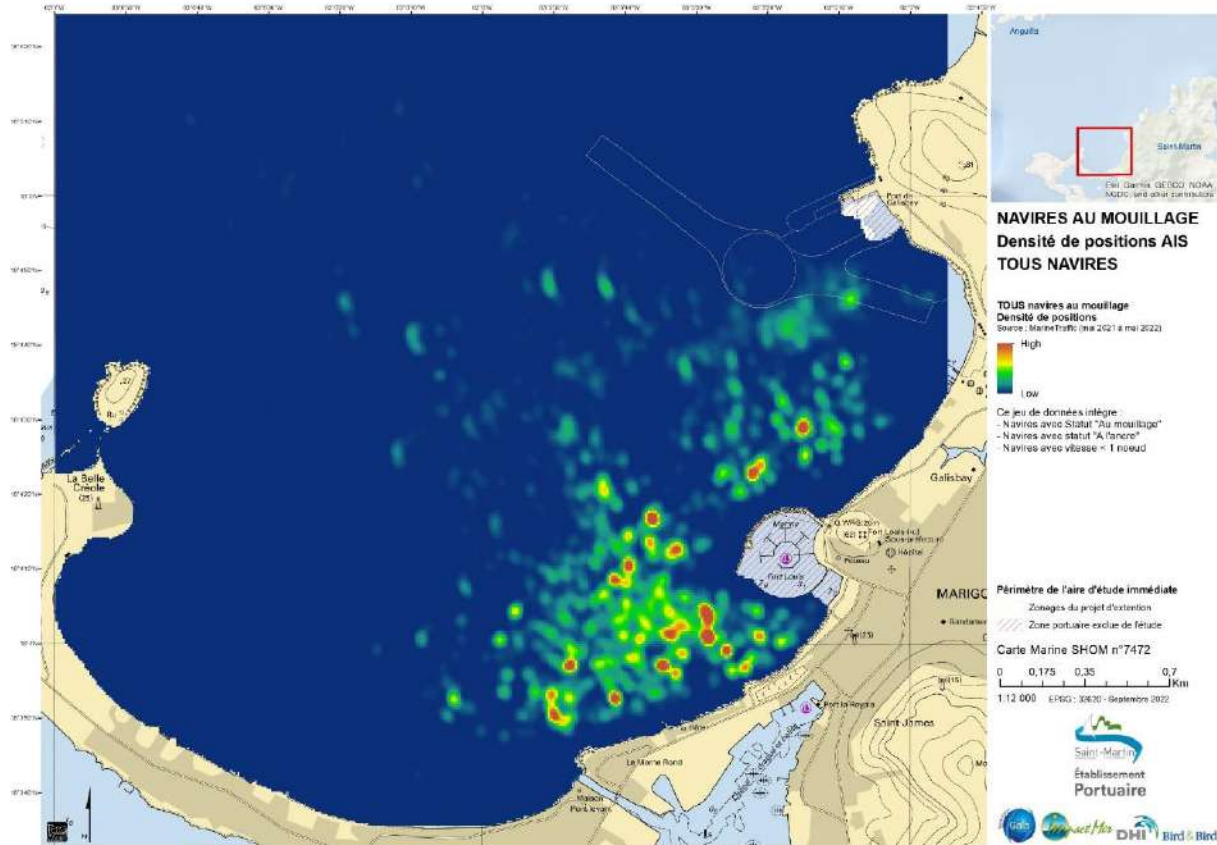


Figure 21. Densité de positions AIS – TOUS Navires.

Type	Positions	Navires
Voiliers	424 584	798
Loisir - Yachts	131 505	414
Divers	13 565	31
Cargo - Tanker	22 898	21
Passagers	20 527	18
Total	613 079	1282

Divers « Special Craft » et « Other » :

- Landing Craft
- Offshore Supply Ship
- Pilot Vessel
- Tug
- Military Ops
- Utility Vessel
- Dredger
- Crew Boat
- Port Tender
- Fishing
- Supply Vessel
- Training Ship
- Other
- Unspecified

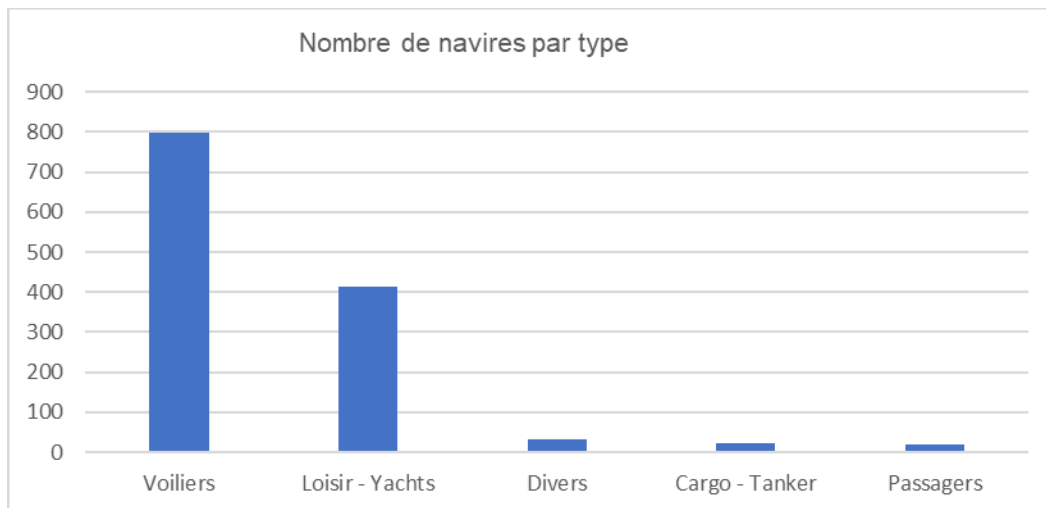
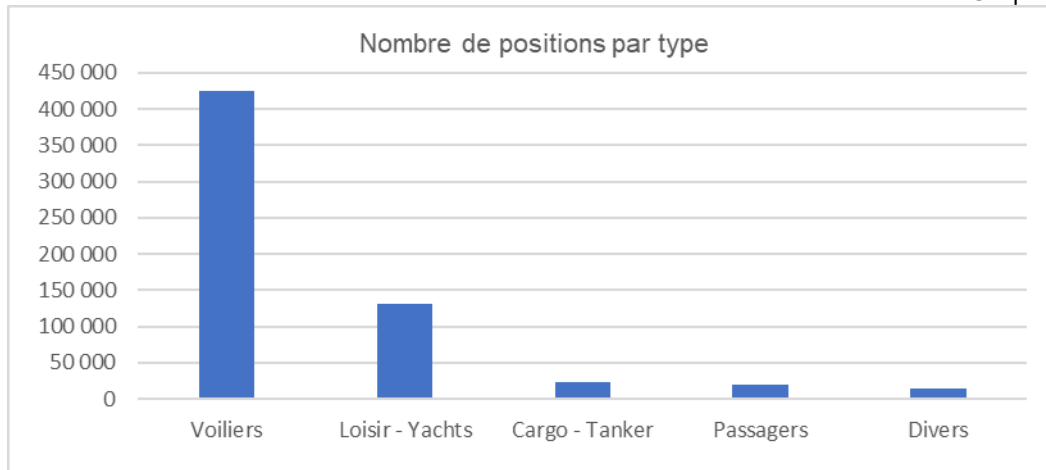


Figure 22. Typologie des navires au mouillage et nombre de positions/navires par type.

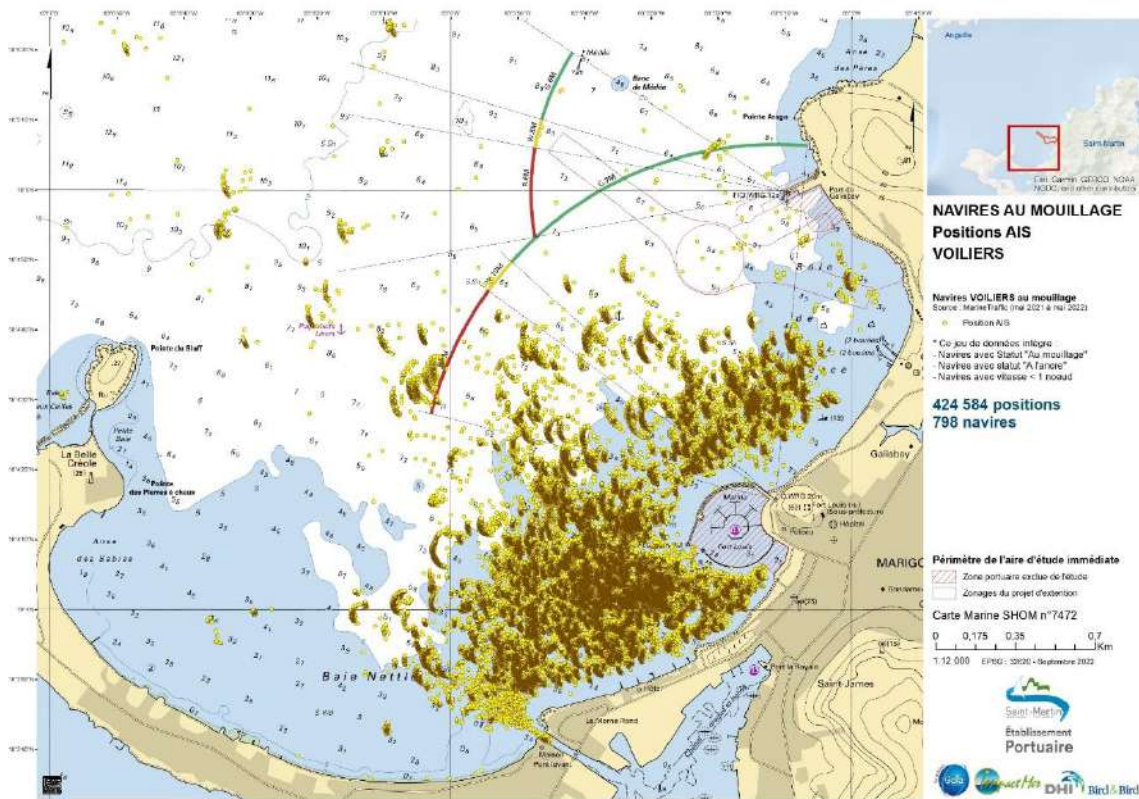


Figure 23. Positions AIS – Voiliers.

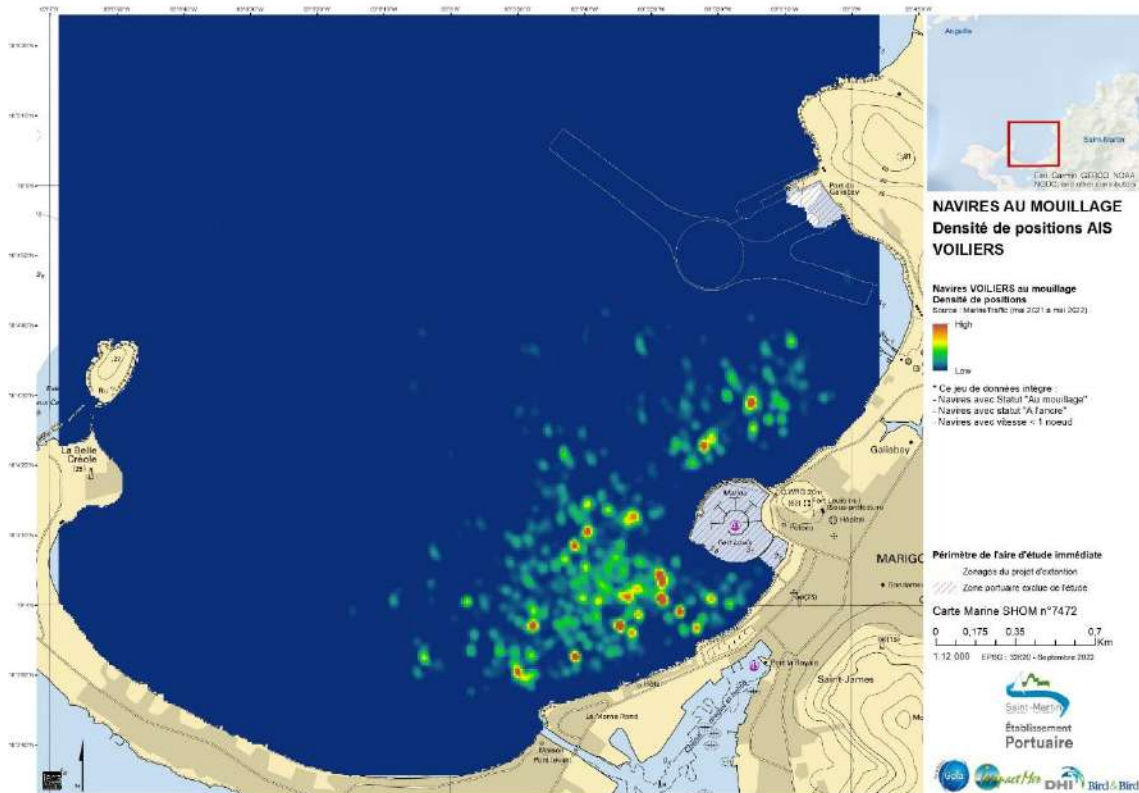


Figure 24. Densité de positions AIS – Voiliers.

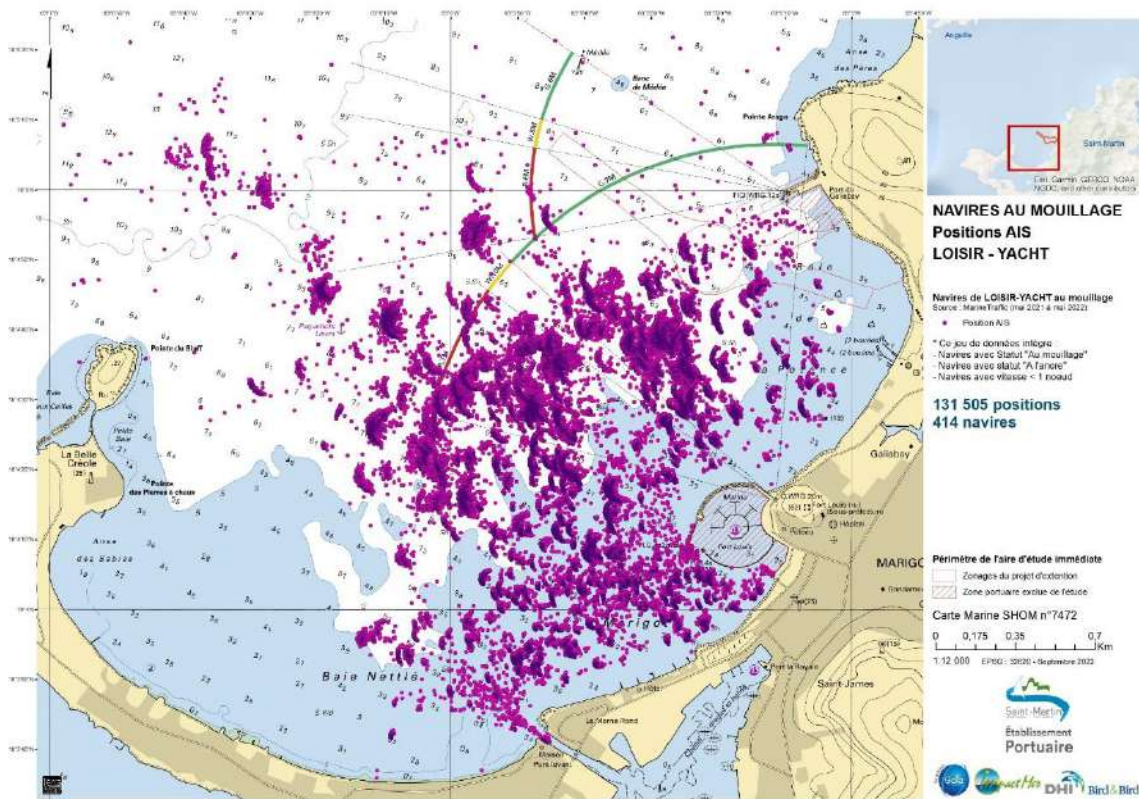


Figure 25. Positions AIS – Navires de Loisirs – Yacht.

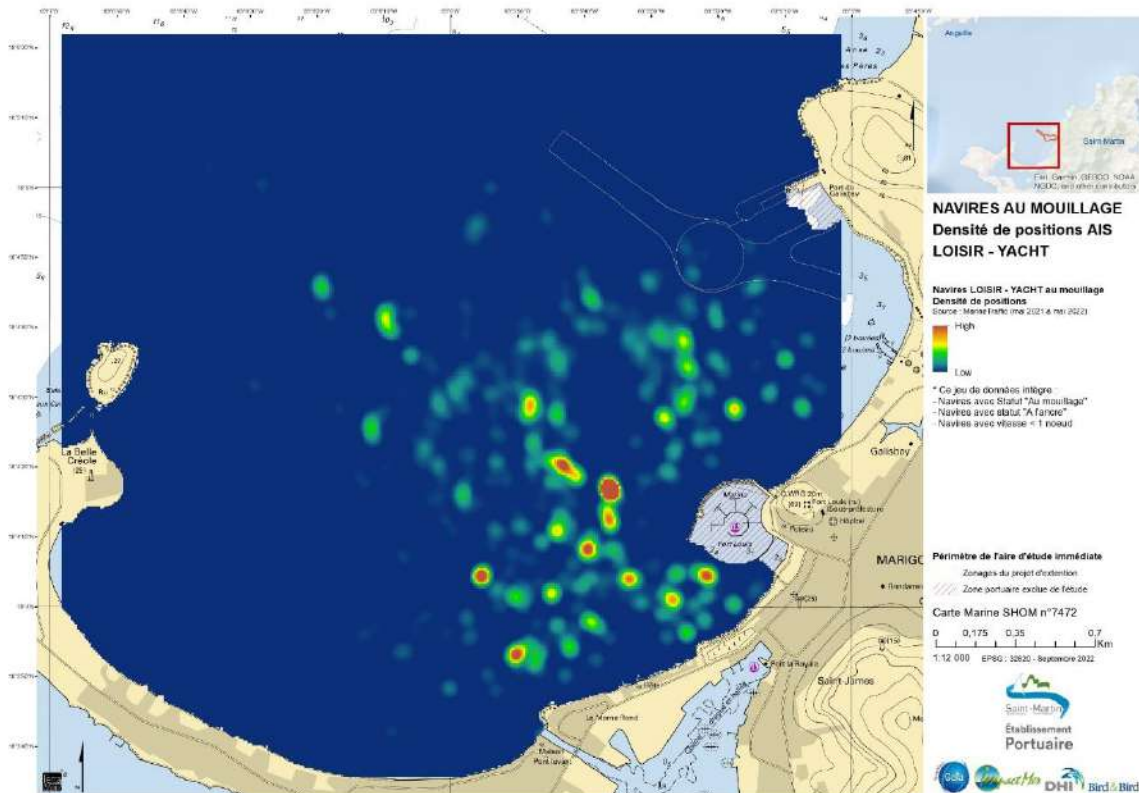


Figure 26. Densité de positions AIS – Navires de loisir – Yacht.

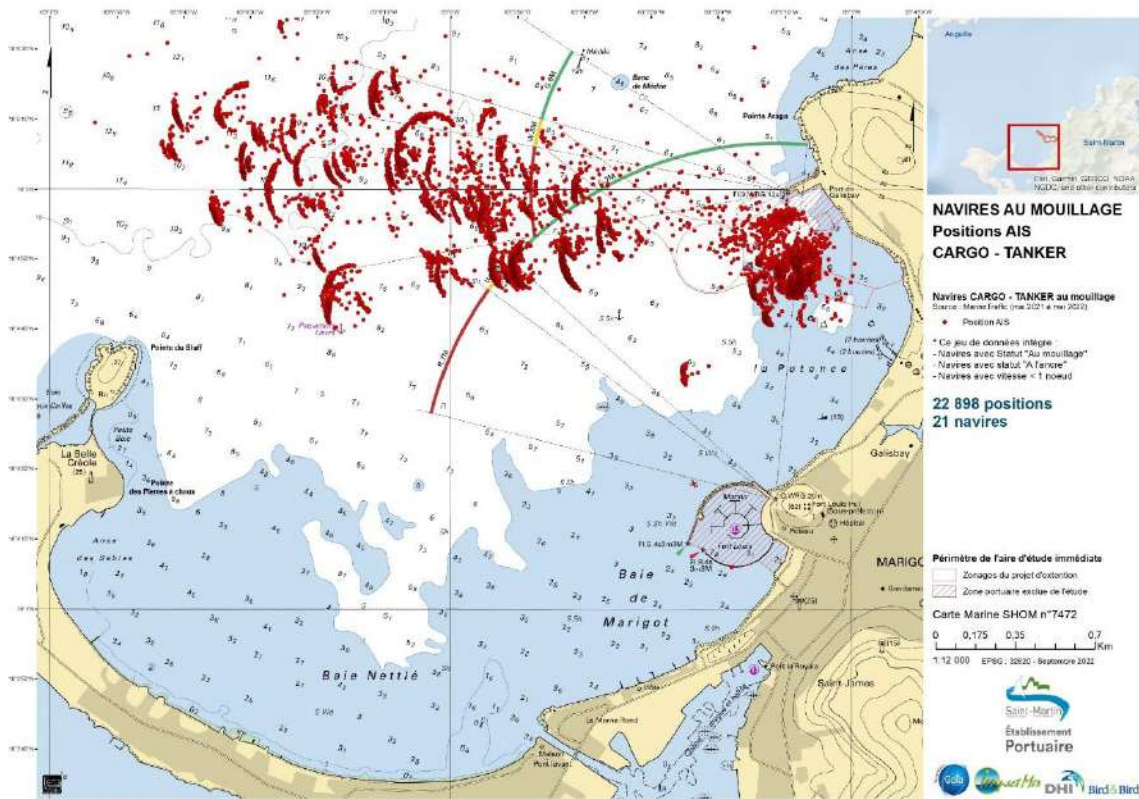


Figure 27. Positions AIS – Cargo et Tanker.

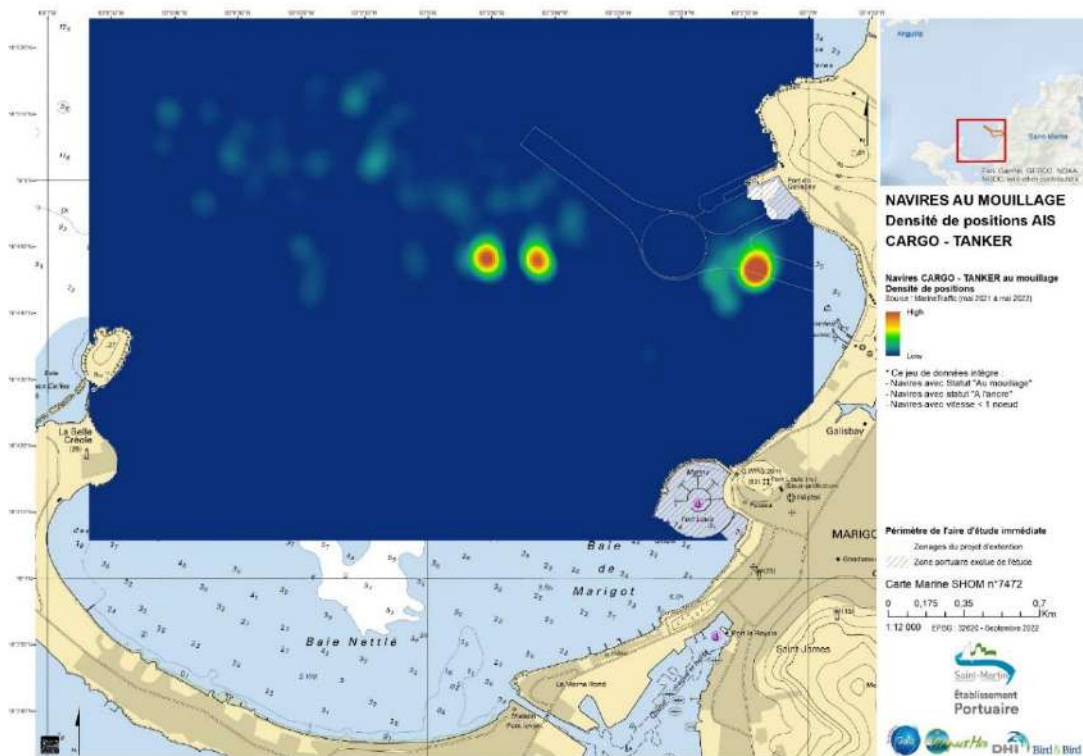


Figure 28. Densité de positions AIS – Cargo et Tanker.

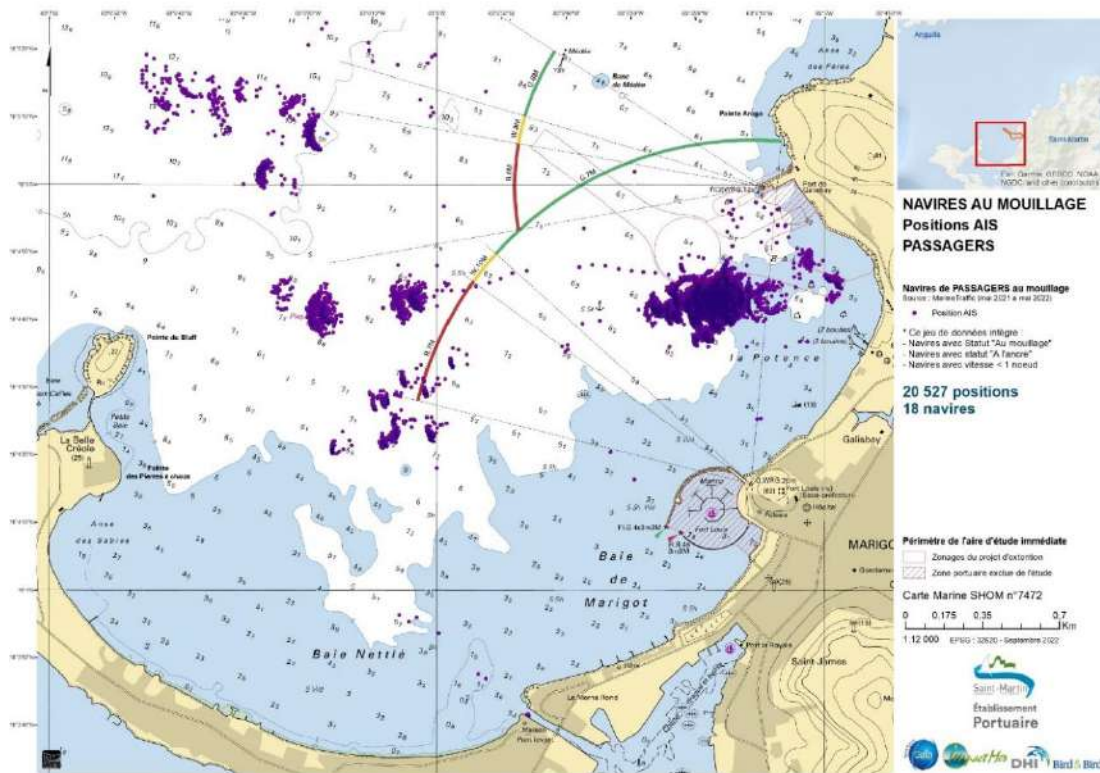


Figure 29. Positions AIS – Navires de passagers.

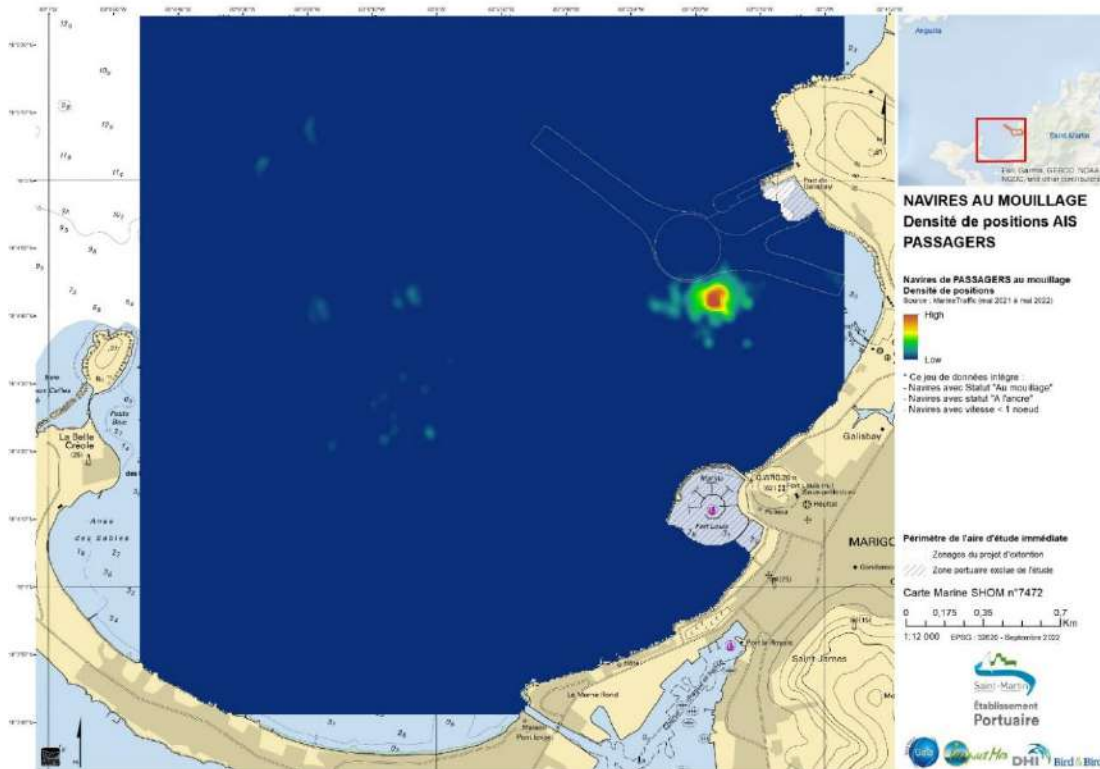


Figure 30. Densité de positions AIS – Navires de passagers.

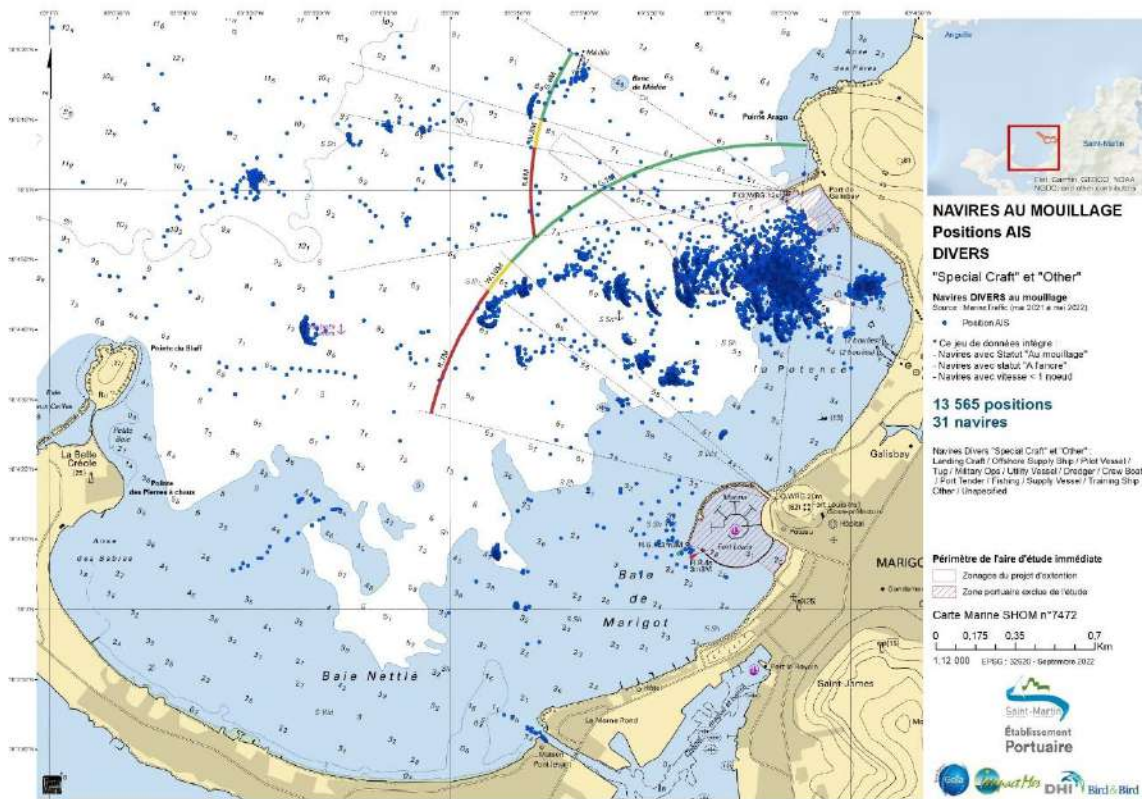


Figure 31. Positions AIS – Divers types de navires.

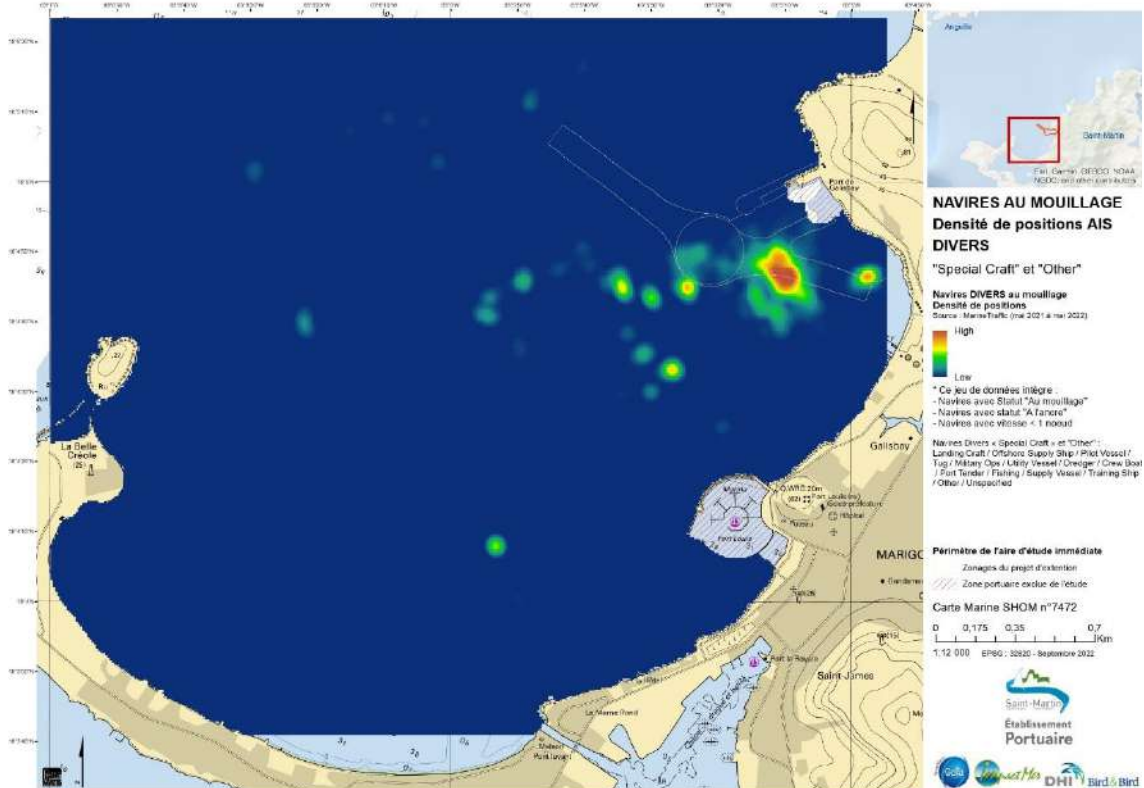


Figure 32. Densité de positions AIS – Divers types.

Les graphiques compilés dans la Figure 33 présentent l'évolution mensuelle du nombre de positions détectées par l'AIS par type de navire.

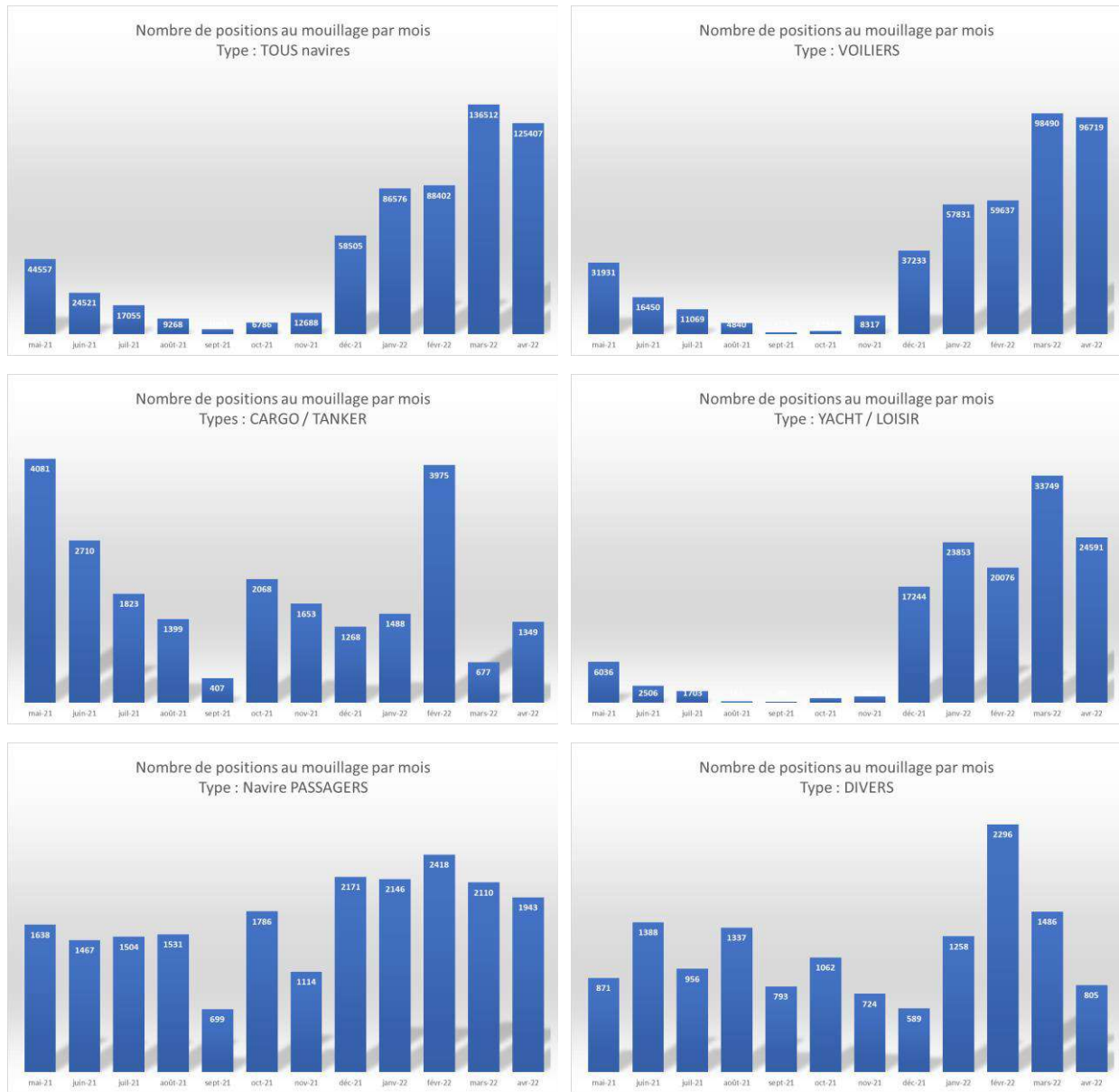


Figure 33. Evolution mensuelle par type de navire entre mai 2021 et mai 2022.

4.4 Comparaison des détections de navires par télédétection et données AIS

4.4.1 Résultats

Les relevés AIS sont filtrés selon les dates et heures d'acquisition des scènes satellite. Pour chacune des scènes Pléiades, on connaît l'heure d'acquisition précise. Pour les images Worldview, utilisées par Google Earth, on ne dispose pas de cette information, le choix a donc été fait de filtrer les relevés AIS concernés selon une heure d'acquisition déterminée empiriquement comme étant celle qui donnait la meilleure correspondance entre les deux sources de données.. Le Tableau 2 résume ces informations pour chaque image utilisée dans l'étude.

Les images des 23 et 24 septembre 2021 ne sont pas prises en compte pour la comparaison, faute de relevés AIS exploitables sur ces deux dates. Le protocole de comparaison associe les deux étapes suivantes.

a) Filtrage des données AIS

On applique la méthodologie suivante pour chaque date. Tout d'abord, on extrait la liste de navires présents sur la baie dans la journée de la base de données AIS, puis pour chaque navire, on extrait le relevé le plus proche temporellement de l'heure d'acquisition. Si ce relevé se trouve dans une fenêtre d'une heure autour de l'heure d'acquisition, il est sélectionné.

On obtient ainsi une liste de relevés ayant été émis dans une fenêtre temporelle proche de celle de l'acquisition de l'image pour que le bateau émetteur soit visible sur l'image.

b) Association des relevés AIS sélectionnés avec les positions détectées par satellite

Pour associer chaque position AIS à une position de bateau détectée par l'image, on crée autour de chaque position une zone tampon de 15 mètres de rayon. Si la zone tampon d'une position AIS coïncide avec la zone tampon d'une position détectée sur l'image, on considère que ces deux positions correspondent et qu'il s'agit bien du même navire au mouillage.

Cette méthode prend en compte un écart temporel, allant jusqu'à 30 minutes, entre l'acquisition de l'image satellite et le relevé. La valeur de 15 m a été obtenue empiriquement et semble convenir aux besoins de l'étude. Une voie d'amélioration pourrait être l'utilisation des relevés AIS d'un navire sur la journée pour déterminer sa zone de présence plus précisément. Des exemples de comparaison AIS / image sont présentés Figure 34 (illustration de la méthode) et Figure 35 (résultat obtenu pour la date du 10/03/2022).

c) Comparaison des classes de taille de bateaux

De ces paires de points correspondants, on extrait les informations de longueur du navire fournies par l'AIS, ainsi que la classe qui a été attribuée lors de l'étape de détection. On peut ainsi vérifier la cohérence des appariements.

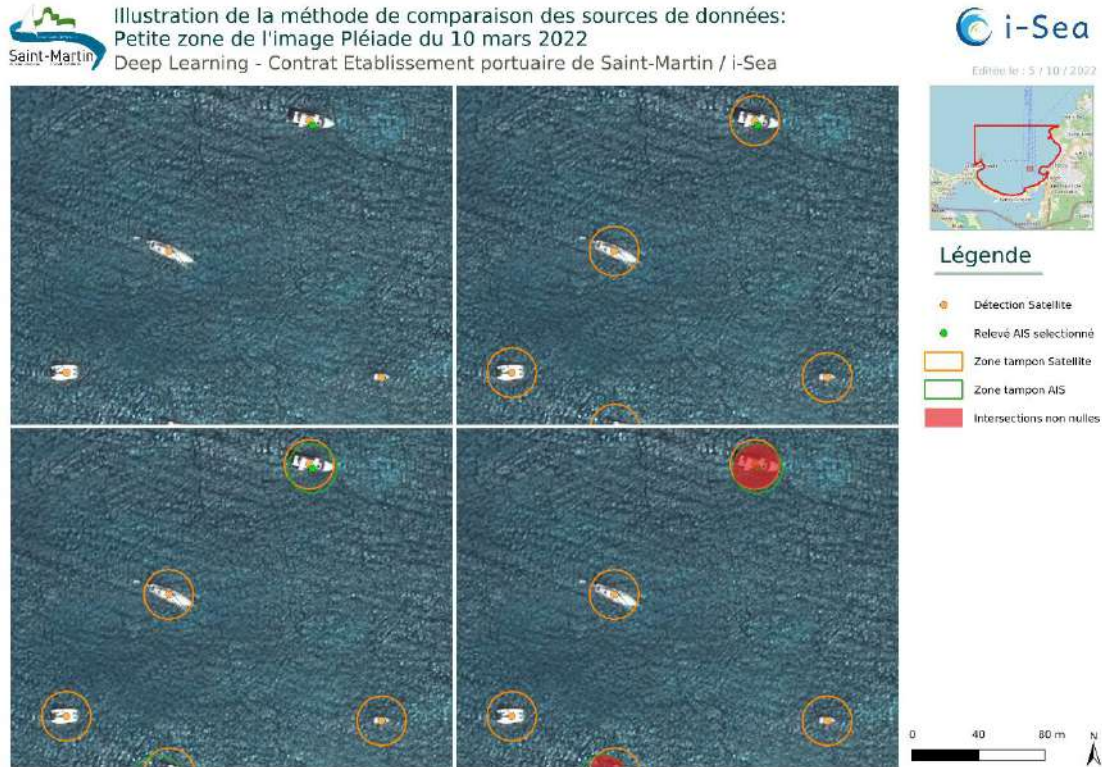


Figure 34. Illustration de la méthode d'association des relevés sélectionnés avec les positions détectées par satellite.

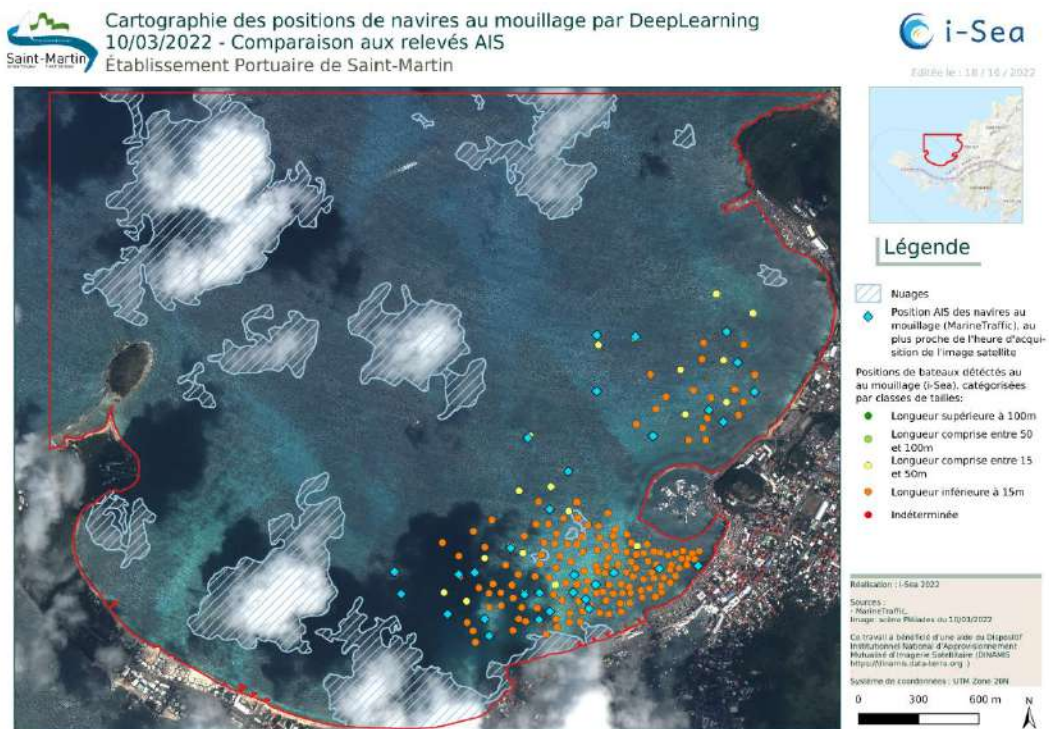


Figure 35. Exemple de positions de bateaux détectées par télédétection et repérés par AIS.

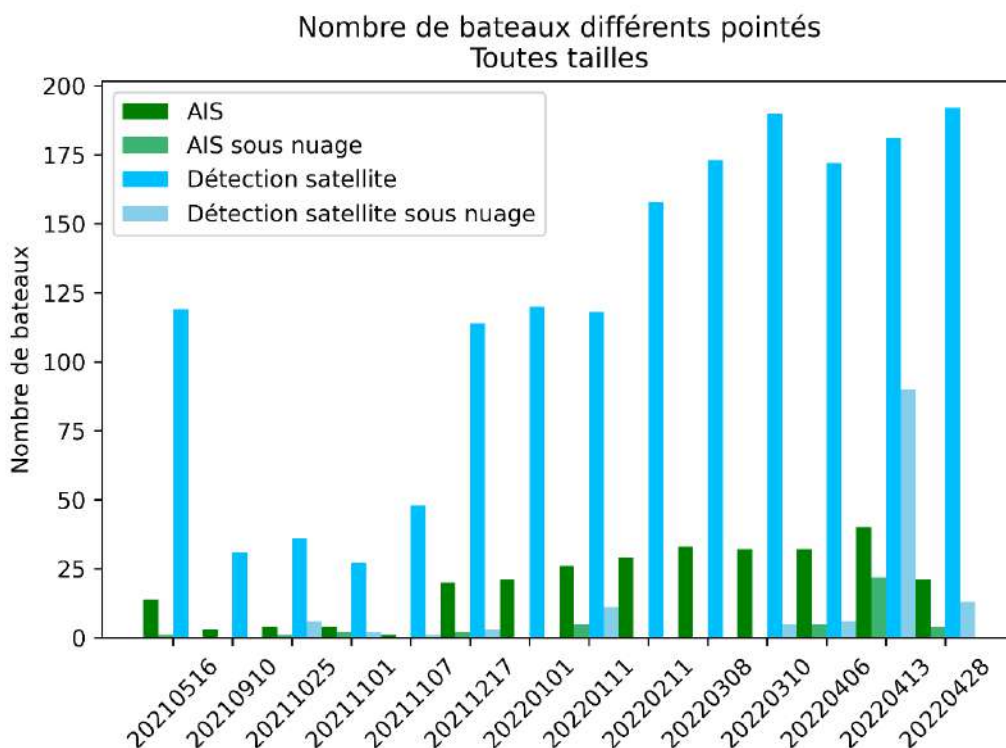


Figure 36. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes.

La Figure 36 résume le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour chaque date d'acquisition. On y trouve également l'information du nombre de navires pointés sous un nuage.

Ce résultat montre plusieurs faits intéressants :

- Pour les jours/heures sélectionnés en fonction de la disponibilité des images, la détection de navires par satellite pointe un plus grand nombre de navires que les relevés AIS,
- Sur cette série temporelle, les nuages impactent peu le nombre de détection par satellite,
- On remarque plus généralement une évolution de la fréquentation au mouillage selon les saisons.

Les Figure 37 à Figure 40 détaillent ces résultats par classe de tailles.

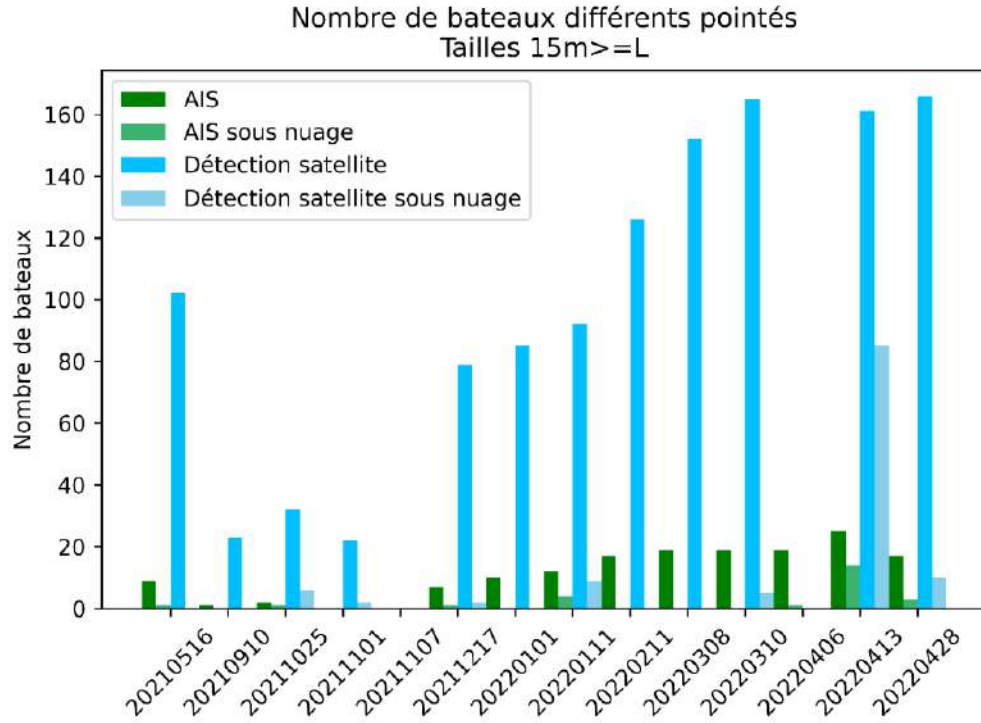


Figure 37. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires de taille inférieure à 15 m.

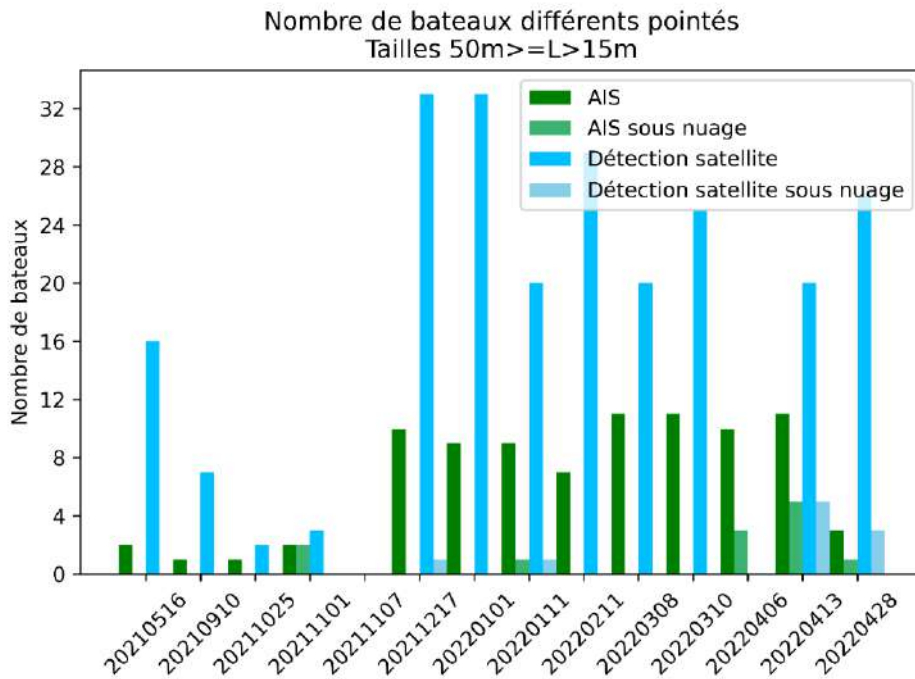


Figure 38. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires ayant une taille comprise entre 15 et 50 m.

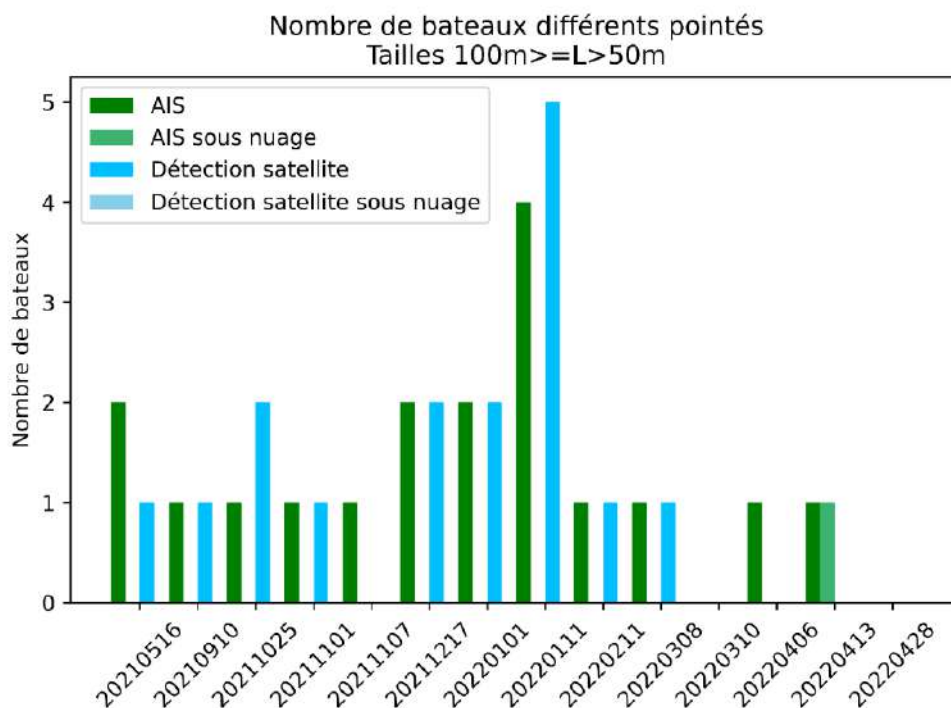


Figure 39. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires ayant une taille comprise entre 50 et 100 m.

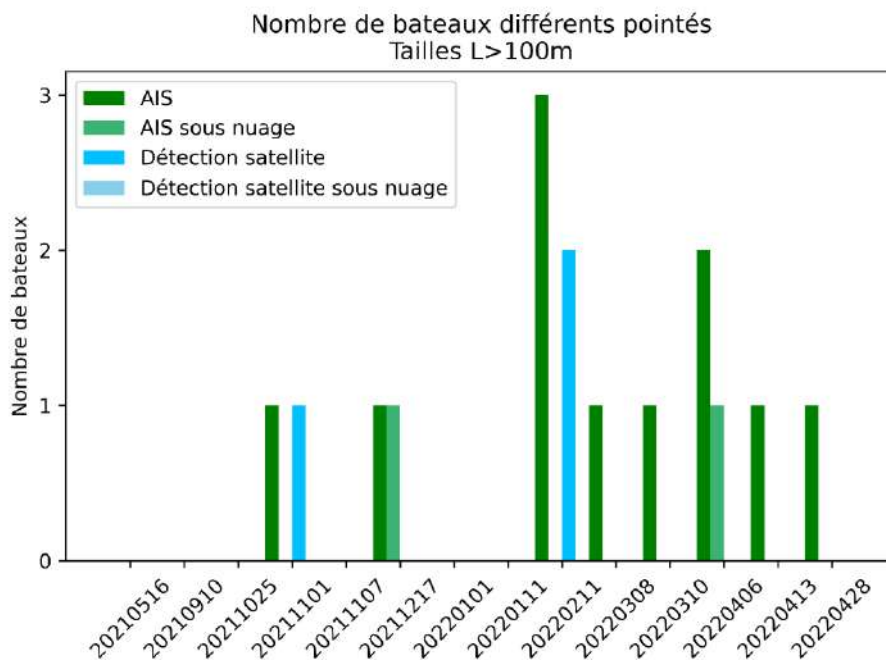


Figure 40. Graphique présentant le nombre de bateaux différents pointés par les deux méthodes pour les navires de taille supérieure à 100 m.

Globalement, les résultats semblent cohérents pour les navires de petites à moyennes tailles (plus grand nombre de petits navires détectés par imagerie satellite et nombre similaire pour les navires de taille moyenne). On peut cependant noter que pour les plus grandes tailles de navires, les deux sources de données qui devraient en théorie aboutir aux mêmes résultats (navires équipés d'AIS et d'autant plus facilement repérables sur les images), produisent en fait des résultats différents. Des navires au mouillage détectés par l'AIS ne le sont pas par l'imagerie. Cela peut s'expliquer par un délai entre les relevés AIS et les acquisitions, par une erreur dans l'attribution des classes de taille ou par des erreurs (champ date/heure) dans les relevés AIS. Ces différents biais seront développés dans la section suivante.

En conclusion de cette première analyse, on a montré que la détection de navires par satellite permettait de prendre en compte ponctuellement (à un instant t) beaucoup plus de navires de petite taille que les relevés AIS, et que les couvertures nuageuses avaient peu d'impact sur la détection par image satellite. Seuls les navires présents sous des nuages très denses ne sont pas détectés, ceux présents sous des nuages diffus le sont bien. La Figure 41 montre des cas de bonnes détections de navires sous des nuages relativement transparents.

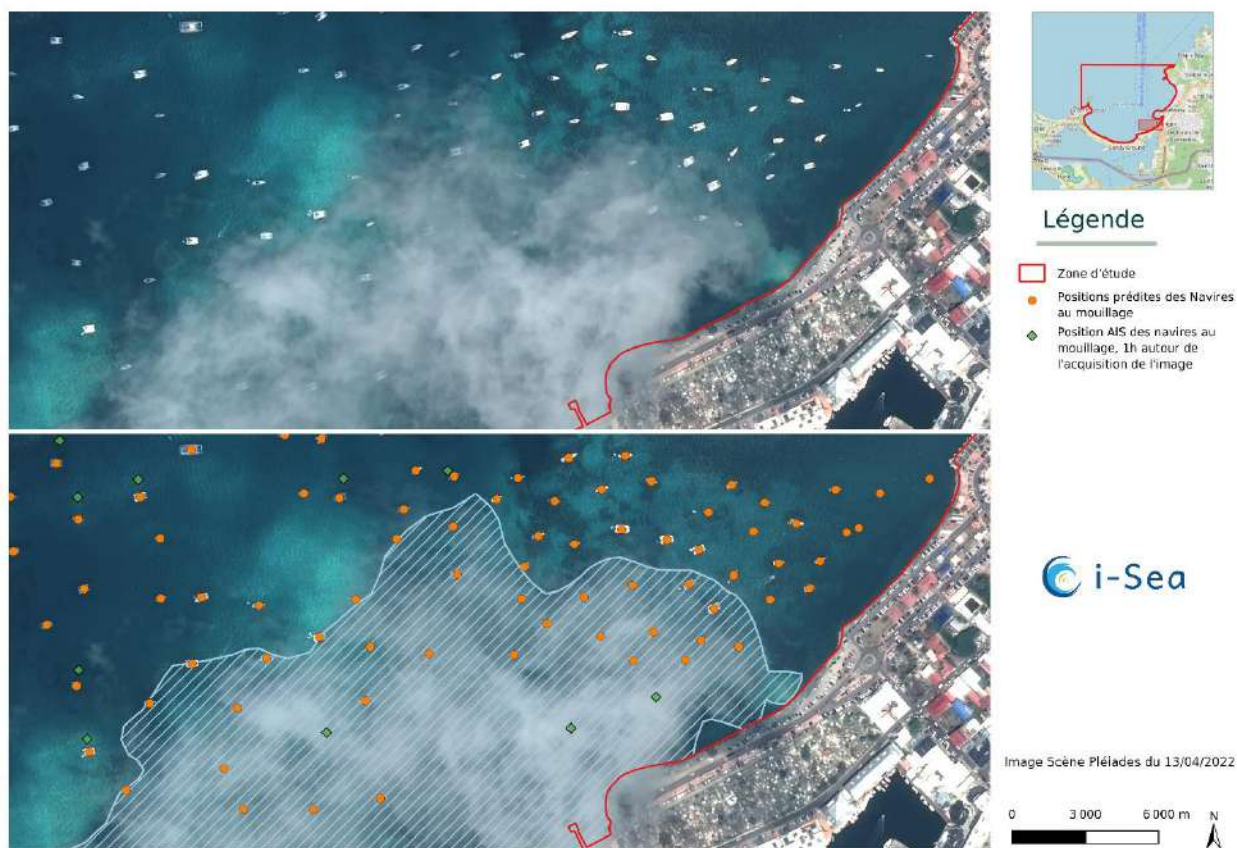


Figure 41. Comparaison des détections de bateaux par télédétection et AIS, contexte nuageux.

4.4.2 Analyse des biais d'observation

a. Cohérence des deux sources de données

En moyenne, on attribue 74% des relevés AIS sélectionnés à un navire détecté par satellite. A l'inverse, seulement 12% des navires détectés par satellite se trouvent associé à un relevé AIS. Ce 12% illustre encore le fait que peu de navires de petites tailles sont équipés du système AIS ou le conservent activés au mouillage. Le Tableau 5 présente les résultats de l'analyse.

Ces résultats sont à nuancer notamment concernant les tailles de navire plus élevées, puisque le nombre de navires de grande taille est assez faible. De plus, la comparaison des tailles de bateau dérivées des deux sources de données est entachée d'erreur (voir point suivant).

Tableau 5. Statistiques des appariements entre les deux sources de données pour différentes tailles de navire.

Taille du navire (L)	Pourcentage moyen de relevés AIS détectés par satellite	Pourcentage moyen de détections satellites associées à un relevé AIS
L ≤ 15 m	76	8
15 m < L ≤ 50 m	68	22
50 m < L ≤ 100 m	59	48
L > 100 m	17	19
Toutes tailles	74	12

b. Réflexions sur la taille des navires

Lorsqu'on s'intéresse aux différences entre les classes de tailles attribuées par satellites et celles dérivées de l'AIS pour les points appariés, on obtient les résultats présentés sur la Figure 42.

Bien qu'on ait une bonne correspondance entre les classes de tailles, il reste des inconsistances, qui semblent venir de plusieurs facteurs (exemple Figure 43) :

- Plusieurs bateaux sont classés dans la classe adjacente à leur longueur selon l'AIS – 14,5 m de longueur selon le relevé, un peu plus de 15 m selon la mesure sur l'image. Cela peut provenir de petites erreurs sur les prédictions des délimitations des navires lors des premières étapes du traitement des images,
- De nombreux relevés AIS présentent des longueurs aberrantes, 500 m pour un navire de plaisance ou même 0 m pour plusieurs relevés.

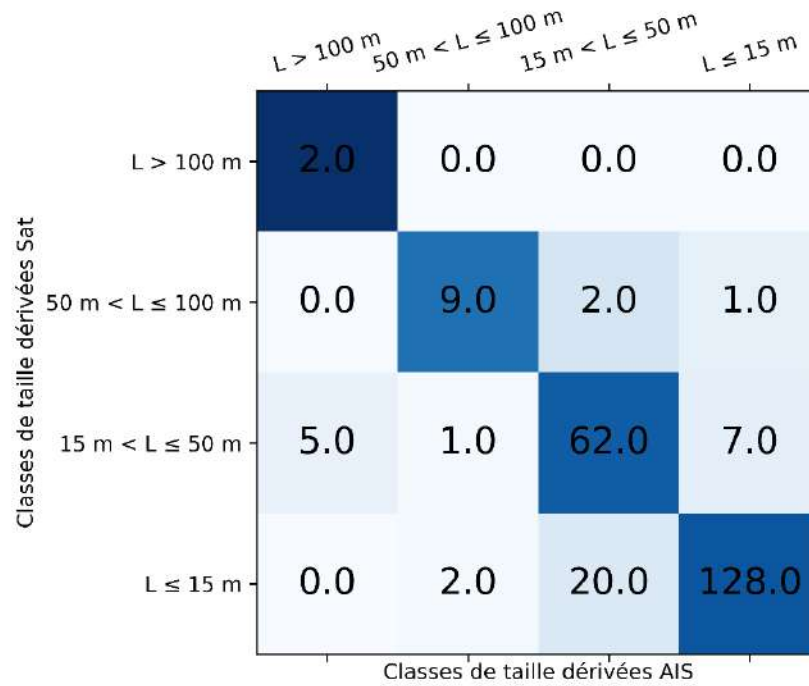


Figure 42. Matrice de confusion des classes de tailles entre les détections satellite (ordonnées) et les relevés AIS (abscisses).

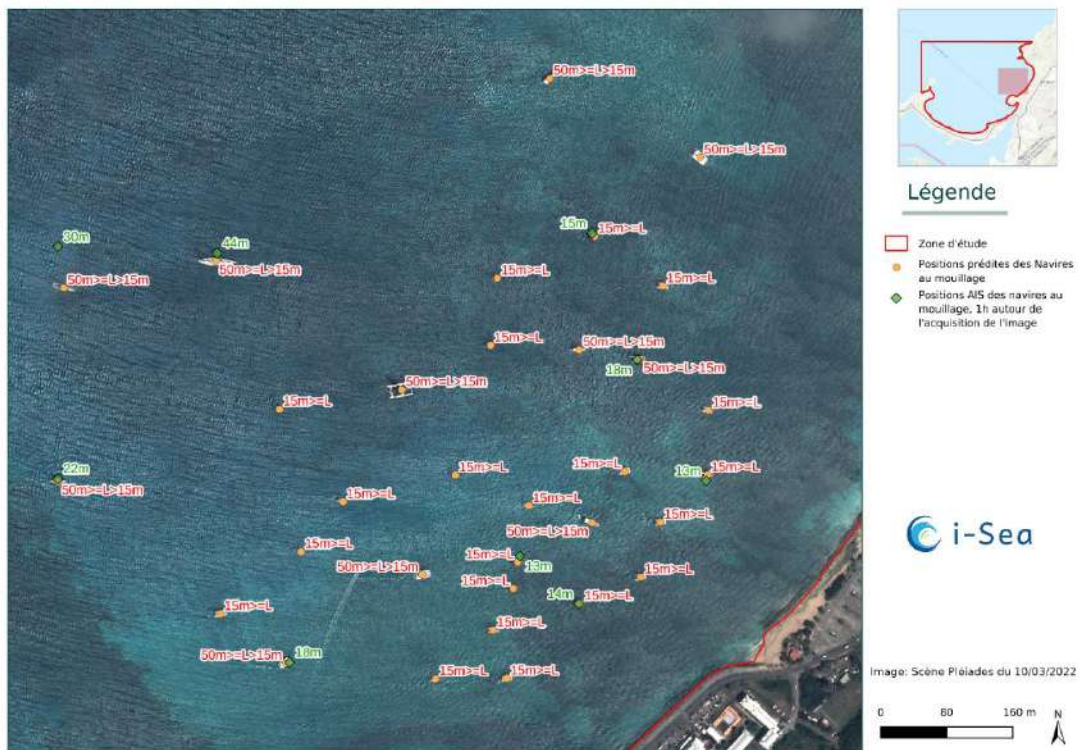


Figure 43. Comparaison des tailles de bateaux détectées par télédétection et renseignées par AIS.

4.5 Sélection des sites de plongée

Afin de proposer des sites de plongée sous-marine pertinents (vérification sur le terrain de l'impact des ancres et des chaînes lors des épisodes de mouillage), une analyse complémentaire à partir de données AIS a été réalisée. Une sélection de sites avec fortes densités de positions et avec présence de navires de taille importante pour 3 types (Cargo/Tanker, Passagers et Yacht) a été effectuée. Pour chaque site, les principaux résultats obtenus sont les suivants et sont présentés sur les Figure 44 à Figure 47.

- Estimation de la position de l'ancre en se basant sur la ligne de courbure des positions au mouillage,
- Extraction des coordonnées géographiques des sites de plongée proposés (cf. fichier Excel joint à ce rapport),
- Production d'une liste des navires (et caractéristiques associées : nom, type, sous-type, longueur) ayant mouillés (cf. fichier Excel joint) sur chaque site. Ce qui permet notamment de vérifier si des navires mouillent de manière récurrente sur le site,
- Analyses temporelles pour identifier la durée des mouillages (nombre de jours) par navire sur chaque site (cf. fichier Excel joint).

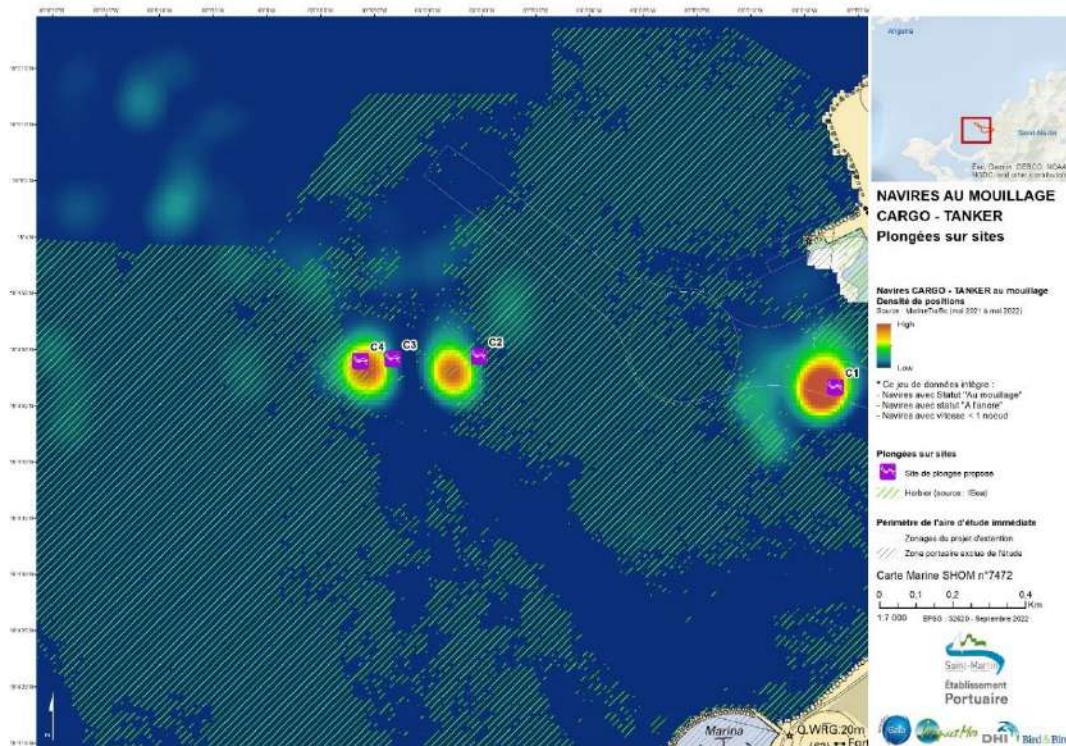


Figure 44. Sites de plongée sous-marine sélectionnés pour les navires de type cargo/tanker.

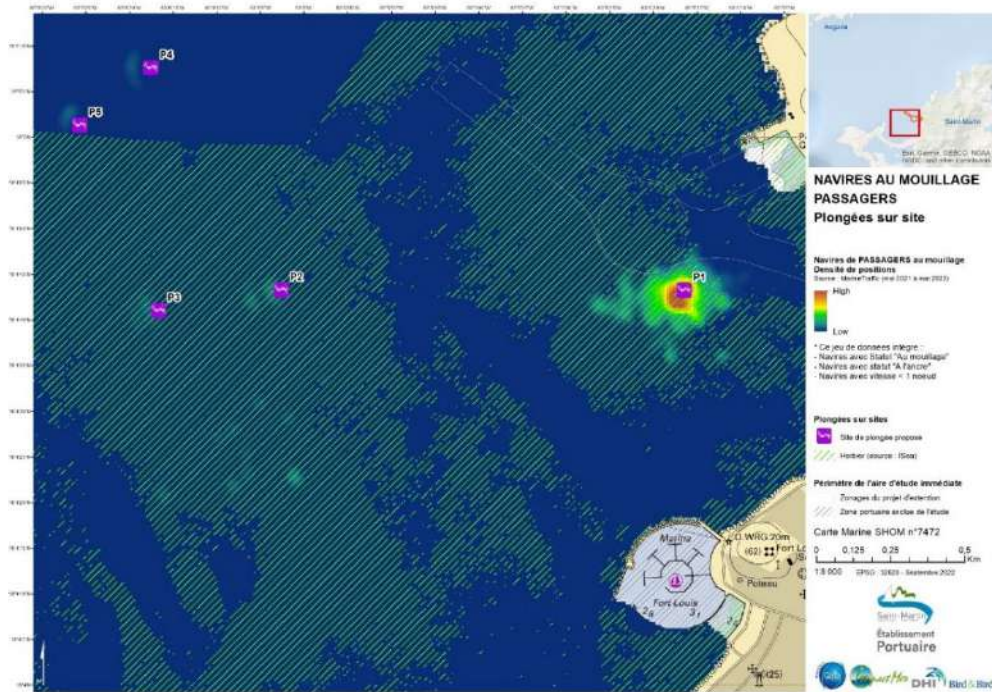


Figure 45. Sites de plongée sous-marine sélectionnés pour les navires de passagers.

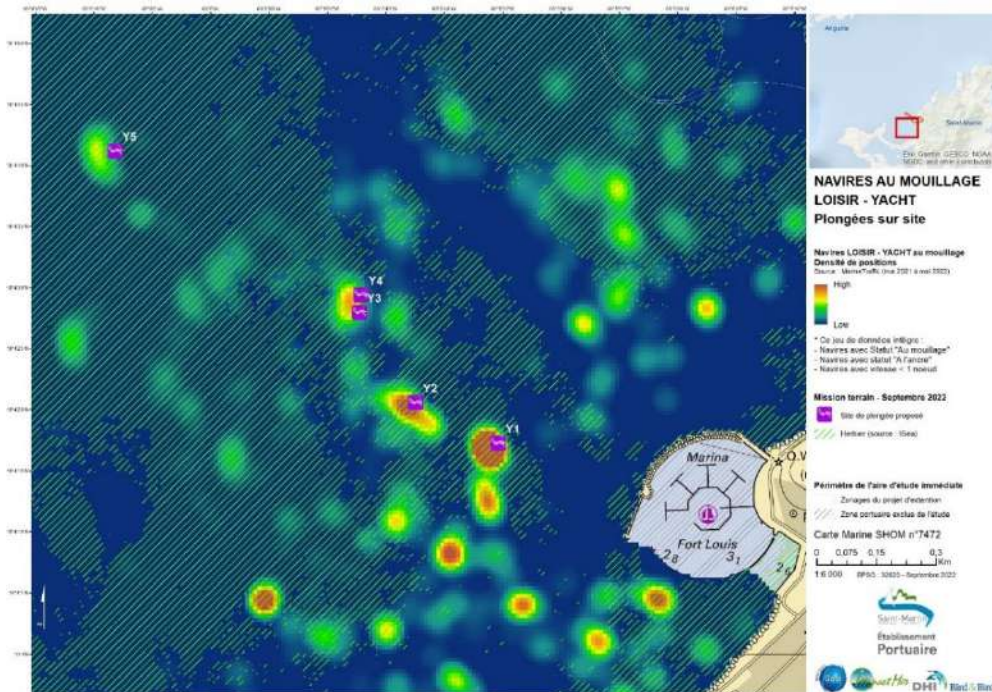


Figure 46. Sites de plongée sous-marine sélectionnés pour les navires de type Loisir / Yacht.

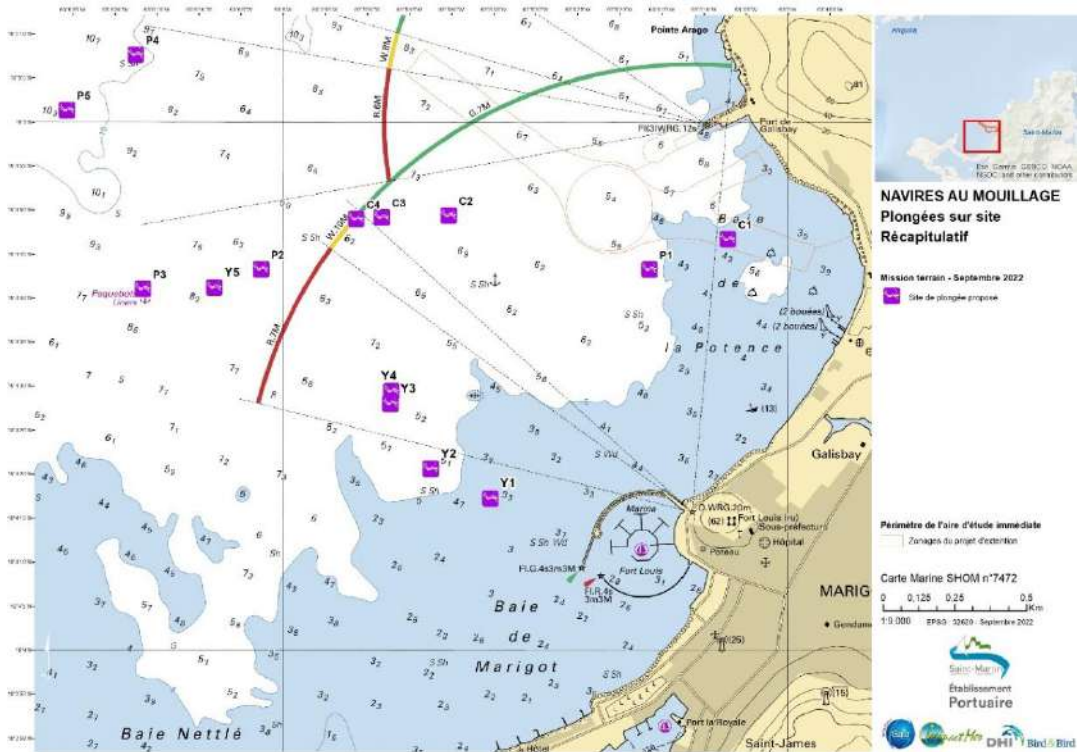


Figure 47. Cartographie récapitulative des sites de plongée sélectionnés.

5 CONCLUSIONS

La présente étude a été menée à bien par i-Sea et Terramaris pour l'analyse de la fréquentation nautique de la Grand'Baie de Saint Martin entre le mois de mai 2021 et le mois de mai 2022 pour le compte de l'Etablissement Portuaire de Saint-Martin. L'objectif était d'appliquer deux types de méthodes complémentaires estimer la pression du mouillage sur les herbiers de plantes aquatiques, l'une basée sur la détection des navires dans des images satellitaires (i-Sea) et l'autre à partir de données AIS (Terramaris).

Pour l'analyse de la fréquentation nautique à partir de données de télédétection, i-Sea a travaillé sur un ensemble d'images Pléiades (0,5 m de résolution spatiale) à partir de méthodes de détection automatique basées sur l'usage du Deep Learning et plus précisément des réseaux de neurones convolutifs. Cette approche a montré sa pertinence en produisant des détections de grande qualité, en permettant d'estimer aussi la longueur des navires avec précision, cela même sous des couverts nuageux fins (lorsque les nuages sont épais, la télédétection optique est inopérante). Ces détections automatiques ont été complétées par des détections par photo-interprétation sur des images Google Earth. L'ensemble de ces cartes journalières a permis de construire des cartes de densités de navires au mouillage sur l'ensemble de la période considérée.

Pour l'analyse de la fréquentation à partir de données AIS, Terra Maris a travaillé à partir de données MarineTraffic. Suite aux traitements et analyses spatiales, des cartographies des positions et des densités de positions sont proposées pour tous navires et par type de navires. Les zones préférentielles occupées par les navires au mouillage sont ainsi mises en évidence ; plutôt en proche côtier pour les voiliers et les yachts, et plus au large pour les navires de commerce et de passagers. Sachant que les zones de fortes densités de positions sont générées soit par la présence d'un navire sur une période importante, soit par la présence successive de plusieurs navires au mouillage (les analyses fines réalisées sur les sites de plongée illustrent bien cet aspect et donnent des indications sur la durée des mouillages qui varient en général entre 1 et 15 jours). La typologie réalisée à partir des données AIS montre une forte prédominance des voiliers et yachts en termes de nombre de navires et nombre de positions. L'analyse des évolutions mensuelles montre une saisonnalité marquée pour les voiliers et les yachts (haute saison entre décembre et avril).

La comparaison entre les détections de navires produites par télédétection et celles produites par les données AIS a montré la complémentarité entre les deux approches. Si les données AIS permettent un suivi temporel très fin, quasi continu, elles ne permettent pas d'observer les petits navires dans la baie. Les données de télédétection, quant à elles, permettent de détecter tous les bateaux (sauf ceux présents sous des nuages épais) mais ne permettent pas un suivi continu dû à une fréquence d'échantillonnage temporel trop sporadique. Lorsque l'on couple les deux approches, la fréquentation nautique au mouillage est renseignée au mieux et permet donc à l'Etablissement Portuaire de Saint-Martin de mieux appréhender l'impact potentiel des zones de mouillage sur l'intégrité des petits fonds.

- Fin du document -