

Énergies renouvelables en mer

Le potentiel de développement de la Martinique

RAPPORT D'ÉTUDE

Juillet 2024

Photo de couverture : © Daniel Joseph-Reinette / Terra

N° NOVA : 23-RE-0235

Produit conçu avec le système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Énergies renouvelables en mer

Le potentiel de développement de la Martinique

Commanditaire : ADEME

Auteur : Nicolas Ferellec

Responsable du rapport

Nicolas FERELLEC – Département Risques, Eaux et Littoral – Groupe Mer et Littoral

Tel : +33 2 98 05 67 71 Mob : +33 7 64 80 50 93

Courrier : nicolas.ferellec@cerema.fr

Direction Technique Risques, eau et mer - 155 rue Pierre Bouguer / 29280 Plouzané

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V1	30 janvier 2024	Chapitres 1 à 3
V2	23 février 2024	Prise en compte des commentaires.
V3	1 ^{er} mars 2024	Commentaires de la DEAL, Ademe et Collectivité Territoriale de Martinique (CTM) Validation chapitres 1 à 3
V4	20 juin 2024	Ajout introduction et chapitres 4 à 6
V5	30 juillet 2024	Version finale
V6	8 octobre 2024	Version approuvée

Références

N° d'affaire : 23-RE-0235

Partenaires : ADEME

Convention de coopération n°2023MA000210

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Nicolas Ferellec	DtecREM/DREL/ML	Auteur principal		
Laurélène Rincé	DtecREM/DREL/ML	Contributeur		
Simon Pradeau	DterOM/Guyane	Contributeur		
Yannis Césarín	DterOM/Antilles	Valideur		

Résumé de l'étude

Le développement d'une filière d'énergie marine à la Martinique passe par l'identification des gisements exploitables en fonction du niveau de maturité des technologies. Cette étude permet d'identifier des zones d'implantation favorables à l'installation de projets de production d'EMR à l'horizon 2030. Elle aborde également la question des infrastructures portuaires nécessaires pour leur construction.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Énergie	Outre-mer
Énergie marine renouvelable (EMR)	Martinique
Éolien	Infrastructures portuaires
Hydrolien	Risques naturels
Houlomoteur	Zone non-interconnectée (ZNI)

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

Accès libre : document accessible au public sur internet

Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema

Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Contexte et objet de l'étude

Les territoires d'outre-mer doivent répondre aux objectifs fixés par la loi de transition énergétique pour la croissance verte, notamment atteindre 100% d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie et l'autonomie énergétique à l'horizon 2030. Ces objectifs ambitieux reposent sur les atouts du territoire en matière d'énergies renouvelables, raison pour laquelle l'identification de l'ensemble des potentialités doit être prise en compte.

L'étude du gisement des énergies marines renouvelables est inscrite dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) de la Martinique qui porte sur les périodes 2016-2023. Cette dernière est actuellement en phase de révision et pourrait dans sa prochaine publication comporter des objectifs de développement, par filière, incluant les Énergies Marines Renouvelables (EMR).

Le développement d'une filière d'énergie marine passe par l'identification des gisements exploitables en fonction du niveau de maturité des technologies. Il faut également veiller à ce que le développement de ces dispositifs ne contrevienne pas aux prescriptions environnementales, en particulier à la préservation de la biodiversité marine.

Les actions proposées permettront l'identification des zones d'implantation favorables à l'installation de projets de production d'EMR à l'horizon 2030, à partir des gisements physiques et des contraintes techniques, environnementales, réglementaires, paysagères, contraintes liées au conflit d'usage, etc.

A noter qu'en parallèle de la présente étude, une analyse de l'adaptation des EMR face aux conditions extrêmes a été réalisée pour s'assurer de l'opportunité de développer des EMR sur des territoires où les risques naturels sont très présents. Les conclusions de cette analyse sont rappelées dans le présent rapport.

Sommaire

Synthèse.....	7
1 Les énergies renouvelables à la Martinique.....	11
1.1 Programmation pluriannuelle de l'énergie	13
1.2 La planification spatiale maritime	13
1.3 Les études prospectives sur les énergies en mer	14
2 Gisement techniquement exploitable	17
2.1 Energie éolienne	17
2.2 Potentiel hydrolien	43
2.3 Potentiel houlomoteur.....	46
2.4 Potentiel Énergie Thermique des Mers (ETM).....	54
2.5 Potentiel énergie osmotique.....	58
2.6 Conclusion	59
3 Intégration des Enjeux.....	60
3.1 Environnement.....	60
3.2 Défense nationale	65
3.3 Pêche professionnelle.....	66
3.4 Trafic maritime et action de l'État en mer.....	70
3.5 Trafic aérien	73
3.6 Radars	74
3.7 Réseau électrique haute tension HTB (63kV).....	75
3.8 Paysage et patrimoine.....	76
3.9 Croisement des enjeux et du potentiel	77
4 Identification des capacités portuaires et industrielles	83
4.1 Infrastructure portuaire nécessaire	83
4.2 Grand port maritime de la Martinique (GPMLM)	86
4.3 Grand port maritime de Guadeloupe (GPMG)	93
4.4 Les ports dans la Caraïbe	95
5 Recommandations	98
6 Conclusion.....	99

SYNTHESE

Dans le contexte de préparation de la révision de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de la Martinique qui porte sur la période 2016-2023, le Cerema a réalisé cette étude qui vise à quantifier et caractériser l'ensemble du potentiel des énergies renouvelables en mer à la Martinique, afin de contribuer à la définition des nouveaux objectifs de développement par filière.

Le retour d'expérience des exercices précédents d'identification du potentiel dans l'hexagone a servi de base au développement de la méthodologie pour cette nouvelle étude. En tenant compte des paramètres techniques impactant l'économie du projet, des enjeux de préservation de la biodiversité et des contraintes liées aux autres usages de la mer, l'étude complète les travaux conduits dès 2007 et fournit des recommandations sur les zones les plus favorables, et qui devraient être caractérisées en priorité afin d'y développer des projets.

Dans un premier temps, l'étude caractérise les gisements de chaque filière (éolien, hydrolien, houlomoteur, ETM et osmotique) afin d'estimer le potentiel à partir de critères techniques et sur la base d'hypothèses concernant des évolutions technologiques.

Tableau 1 Synthèse des gisements techniquement exploitables par source d'énergie

Eolien	Le potentiel technique est de 11,8 GW dont 63% a minima de flottant, essentiellement au Nord-Est. La distance minimale à la côte peut réduire très fortement le potentiel
Hydrolien	Il n'y a pas de potentiel .
Houlomoteur	En l'état actuel des technologies, le potentiel est très faible .
Energie thermique des mers (ETM) dont SWAC	Le gisement est abondant, mais la maturité technologique est incertaine pour la production d'électricité. Le potentiel SWAC est à explorer sur la côte Caraïbe.
Energie osmotique	Aucun potentiel n'a été défini . Cette technologie cible plutôt les estuaires.

Dans un deuxième temps, le potentiel technique est mis en perspective avec une synthèse des enjeux environnementaux mais aussi de d'autres activités et usages de la mer, regroupés selon des thématiques spécifiques : radars, navigation maritime, pêche professionnelle, défense nationale paysage et patrimoine. Ce rapport est complété par un visualiseur de données :

<https://geolittoral-data.cerema.fr/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=637a7c2602484c44bcd9f4442c914e0>

Le croisement des gisements établis dans un premier temps avec des enjeux identifiés par le Cerema comme sensibles (zones ZICO, la zone de tir, les principaux secteurs de pêche professionnelle, les enjeux de sécurité et de sûreté maritimes, les zones de protection radar, et les servitudes aéroportuaires) a permis de mettre en lumière des macro-zones favorables à l'implantation d'EMR.

Pour l'éolien en mer, une **large zone à privilégier de 700 km²** se dégage au Nord-Est du territoire. Elle est divisée en huit zones, détaillées dans le tableau ci-dessous. Des choix devront être opérés entre ces zones, notamment en considérant la bathymétrie, la facilité de raccordement, ainsi que la distance à la côte.

Le potentiel maximum exploitable de l'éolien en mer flottant serait ainsi d'au moins 765 MW¹ à une profondeur inférieure à 100m, 1 GW entre 100 et 500m, et 1,7 GW entre 500 et 1 000m.

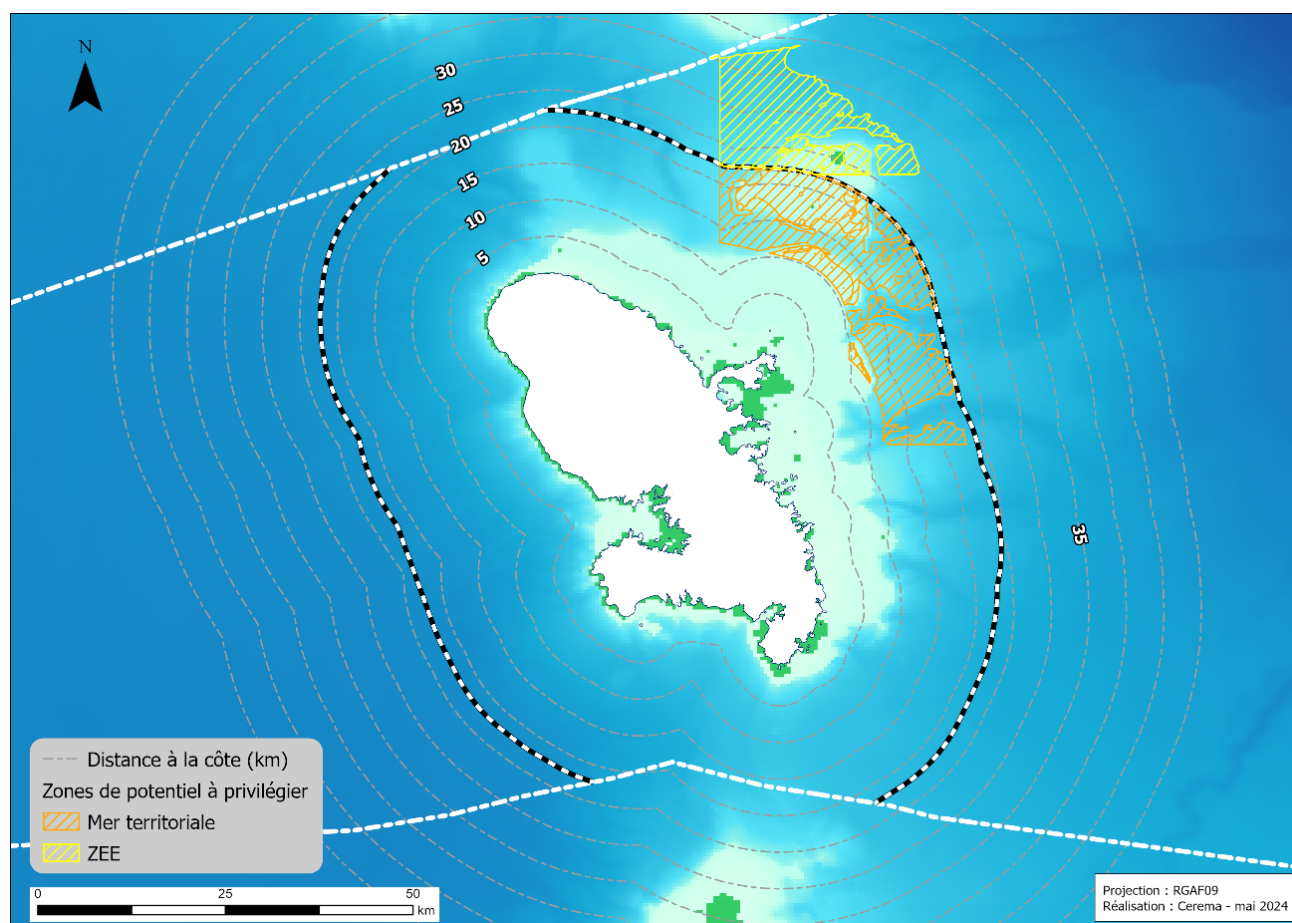


Figure 1 Zones à privilégier pour le développement de l'éolien en mer à la Martinique

Tableau 2 Zones à privilégier pour le développement de l'éolien en mer territoriale

Bathymétrie	Numéro	Surface (km ²)	Puissance indicative (MW) (5 à 10 MW/km ²)	Distance à la côte (km)	Avantages	Inconvénients
- 40 m - 100 m	MT1	88	440 à 880	15	Éloignement > 15 km Bathymétrie favorable	Raccordement au-delà du plateau continental
	MT2	5	25 à 50	10	Bathymétrie favorable	Surface très limitée Distance à la côte
	MT3	26	130 à 260	10	Surface adaptée Bathymétrie favorable	Distance à la côte
- 100 m - 500 m	MT4	164	820 à 1 640	10	Surface importante	Forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental
- 500 m - 1 000 m	MT5	150	750 à 1 500	15	Surface importante Éloignement > 15 km	Très forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental

Nota Bene : pour l'identification des zones différentes zones décrites, se référer au paragraphe 3.9.1

¹ Densité de 5 MW/km² : voir 2.1.2.6 pour les hypothèses de densité énergétique

² Voir 2.1.2.6 pour les hypothèses de densité énergétique

Tableau 3 Zones à privilégier pour le développement de l'éolien en ZEE

Bathymétrie	Numéro	Surface (km ²)	Puissance indicative (MW) (5 à 10 MW/km ³)	Distance à la côte (km)	Avantages	Inconvénients
- 40 m - 100 m	ZEE1	34	170 à 340	24	Surface adaptée Éloignement > 24 km Bathymétrie favorable	Raccordement au-delà du plateau continental
- 100 m - 500 m	ZEE2	39	195 à 390	24	Surface adaptée Éloignement	Forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental
- 500 m - 1 000 m	ZEE3	195	975 à 1 950	24	Surface importante Éloignement	Très forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental

Enfin, un travail plus précis sur l'activité de pêche professionnelle, en lien avec les acteurs de la filière, semble indispensable. Les données actuellement disponibles à l'échelle d'un secteur statistique de 10 x 10 km ne permettent pas de spatialiser finement l'activité ni de connaître la technique utilisée.

Pour le houlomoteur, les technologies de récupération de l'énergie de la houle sont très diverses et chacune a ses contraintes propres notamment en termes de bathymétrie et de nature des fonds marins selon que le système soit simplement ancré ou qu'une partie du dispositif soit posée sur le fond.

Ainsi, aucune zone précise n'est ici identifiée pour le développement de projets houlomoteurs, seulement une vaste zone à privilégier, sous réserve d'un potentiel physique suffisant.

La dernière partie de cette étude analyse les infrastructures portuaires disponibles pour le développement des EMR et plus particulièrement de l'éolien flottant, en s'appuyant sur l'expérience dans l'hexagone.



Figure 2 : Plan d'exécution pour la ferme pilote flottante Provence Grand Large (Source – Cerema)

³ Voir 2.1.2.6 pour les hypothèses de densité énergétique

A l'horizon 2030, les plus petites éoliennes en mer disponibles sur le marché devraient présenter des puissances de 14 ou 15MW, ce qui est presque deux fois plus que celles des parcs français qui entrent en exploitation en 2024. Ces dimensions nécessitent donc d'identifier les ports qui pourront accueillir leur assemblage.

Qu'elles soient européennes (Vestas, General Electric, Siemens Gamesa) ou chinoises (Mingyang, Goldwind), les éoliennes en mer sont déjà adaptées aux conditions extrêmes de vent grâce à des technologies résistantes aux cyclones, comme le démonstrateur d'éolienne flottante Hibiki au Japon, qui a subi au moins 24 typhons en quelques années.

Un rapport dédié à l'analyse de la résistance des EMR dans des conditions extrêmes a été produit par le Cerema en parallèle de la présente étude et est disponible en libre accès notamment sur la base documentaire du Cerema (CeremaDoc).

En conclusion de ce rapport d'étude, plusieurs zones favorables à l'implantation d'éoliennes en mer ont été identifiées. Le potentiel de ces zones permet de répondre aux besoins en énergie visés dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie. Le travail mené a aussi permis de déterminer certaines contraintes au développement des EMR telles que la capacité actuelle du réseau électrique à supporter une installation d'EMR conséquente (supérieure 50 MW) ou encore la complexité à réunir à l'échelle des Antilles voire même de la Caraïbe l'ensemble des éléments de la chaîne de valeur nécessaire à la mise en œuvre d'un projet EMR (infrastructures portuaires).

Aussi, suite de l'identification des zones d'implantation favorables à l'installation de projets de production d'EMR à l'horizon 2030, nous recommandons que soient menées les actions suivantes :

→ **Consulter les parties prenantes afin de**

- Clarifier la faisabilité technique de l'éolien flottant dans les zones de fortes pentes, ainsi que pour les zones où la bathymétrie est comprise en -500 et -1 000m, en lien avec la filière.
- Ouvrir une réflexion sur la prise en compte des enjeux paysagers et notamment sur la distance à la côte acceptable.
- Réaliser un travail plus précis sur l'activité de pêche professionnelle, notamment en tenant compte de la technique utilisée, en lien avec les acteurs de la filière.
- Poursuivre le travail de réflexion sur les infrastructures portuaires mobilisables à l'échelle locale, régionale et internationale.
- Clarifier la faisabilité du raccordement électrique maritime et terrestre et ses implications techniques et financières, en lien avec le gestionnaire du réseau de transport.

→ **Mener des études de caractérisation**

- Sur la zone à privilégier pour l'éolien en mer, en particulier concernant le vent (étude de productible) et la bathymétrie à une résolution fine, en lien avec la DGEC.
- Sur les zones potentielles de raccordement électrique en mer, en particulier concernant la nature des fonds marins, en lien avec le gestionnaire du réseau (EDF-SEI) pour déterminer les meilleures configurations possibles pour le raccordement au réseau électrique.
- Sur la côte Atlantique pour déterminer plus finement le potentiel houlomoteur, en se rapprochant du réseau Candhis pour le déploiement d'un houlographe qui permettrait de fiabiliser les données issues de différents modèles de houle.

→ **Se rapprocher du projet "EnRezo"** conduit par le Cerema, avec le soutien de l'ADEME et de la DGEC, pour le développement du potentiel « SWAC »

1 LES ENERGIES RENOUVELABLES A LA MARTINIQUE

En 2019, la Collectivité Territoriale de Martinique (CTM) a créé l'Observatoire Territorial de la Transition Écologique et Énergétique (OTTEE) qui, dans son premier bilan énergétique du territoire⁴, souligne la forte progression des énergies renouvelables qui permet de réduire la très forte dépendance aux énergies fossiles de 95% en 2015 à 83,9% en 2021 pour la consommation totale d'énergie primaire (transport, électricité et activités industrielles) et 74% pour l'électricité uniquement.

Mais si la dépendance aux produits pétroliers a diminué, la dépendance aux énergies importées reste forte (91,8% en 2021) car la ressource biomasse combustible de la centrale biomasse-bagasse d'Albioma est exclusivement importée.

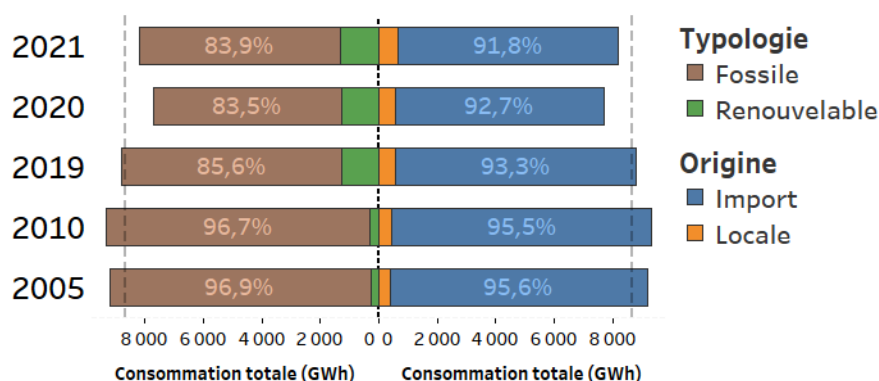


Figure 3 Evolution de la consommation d'énergie par origine et typologie (Source OTTEE)

Le réseau électrique de la Martinique se compose d'unités de production thermique au fioul et de moyens de production basés sur les énergies renouvelables (une centrale de biomasse-bagasse, un incinérateur d'ordures ménagères, deux centres de production de biogaz, un parc éolien et des parcs de panneaux photovoltaïques). La Martinique héberge la seule raffinerie des Antilles françaises, implantée au Lamentin et exploitée par la Société Anonyme de Raffinerie des Antilles (SARA)⁵.

La puissance de production électrique installée en 2021 est de 561,7 MW, dont 73,6% d'origine fossile, 24,2% d'origine renouvelable et 2,1% de stockage. La puissance de pointe maximale de l'énergie livrée au réseau se situe entre 228 et 253 MW depuis 2010⁶.

En 2021, la production totale de 1 510 GWh a été assurée à 25,4% par les énergies renouvelables dont la biomasse (15%), le photovoltaïque (6%) et l'éolien (3%).

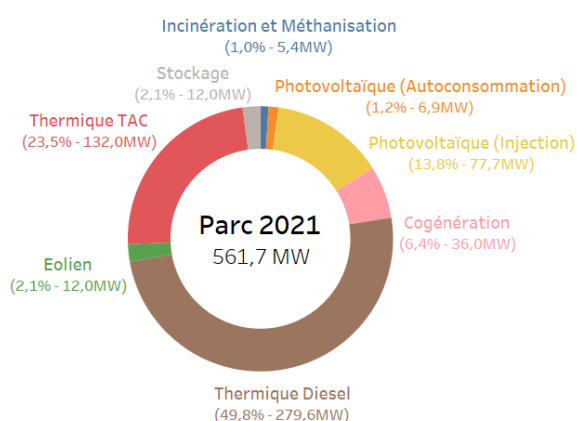


Figure 4 Répartition du parc électrique en 2021 par typologie (Source OTTEE)

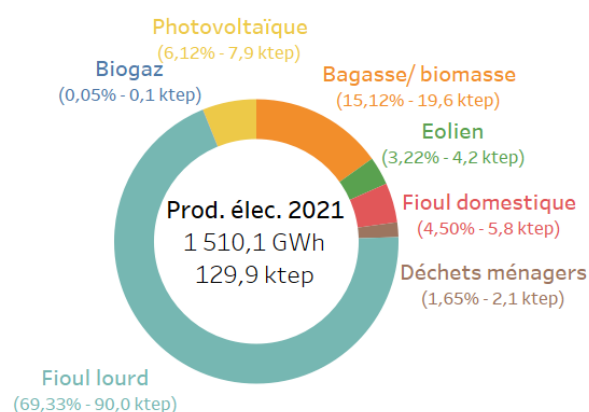
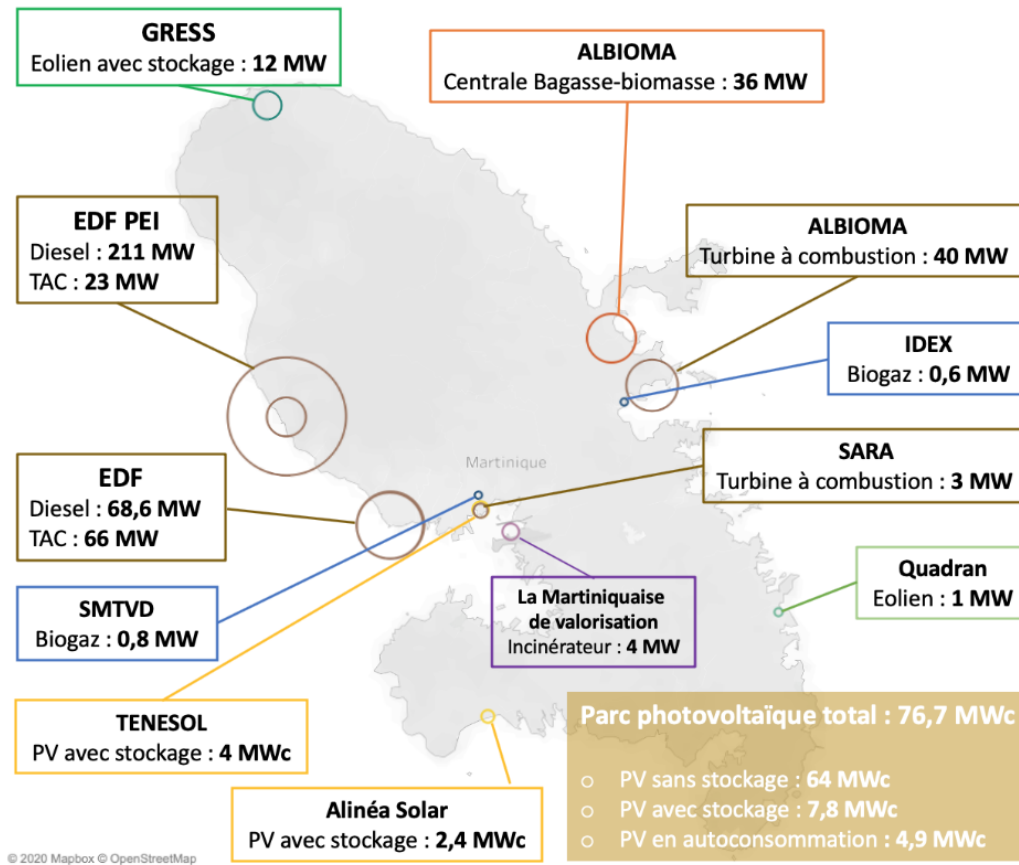


Figure 5 Répartition de la production électrique en 2021 par ressource (Source OTTEE)

⁴ <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4102-bilan-energetique-martinique-2019.html>

⁵ Rimane D., Ratenon J.H., Députés, rapport d'information sur l'autonomie énergétique des outre-mer, 19 juillet 2023

⁶ EDF SEI – Bilan prévisionnel 2022 - https://www.edf.mq/sites/sei_mq/files/2023-01/BP_22_Martinique.pdf



Sources : EDF/ Producteurs d'électricité – Auteur : OTTEE

Figure 6 Capacité de production installée en 2019

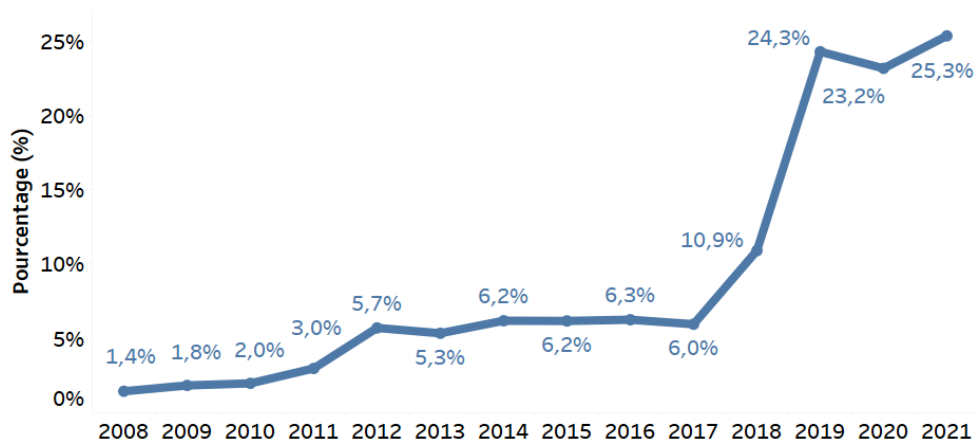


Figure 7 Evolution du taux des EnR dans la production électrique de 2008 à 2021 (Source OTTEE)

1.1 Programmation pluriannuelle de l'énergie

La loi de transition énergétique de 2015⁷ a fixé des objectifs ambitieux pour l'Outre-mer : générer 50% de l'énergie consommée à partir de sources renouvelables en 2020 et atteindre l'**autonomie énergétique à l'horizon 2030**. La loi APER de 2023⁸ confirme l'objectif d'autonomie et porte l'ambition de production d'**électricité à 100% d'origine renouvelable** à l'horizon 2030.

Cette loi a également créé les Programmes Pluriannuels de l'Energie (PPE), outils de pilotage de la politique énergétique, qui concernent respectivement la métropole continentale et chacune des zones dites non interconnectées (ZNI). La PPE de chaque ZNI, dont celle de la Martinique, est co-élaborée tous les 5 ans par l'Etat et la Collectivité Territoriale⁹.

La Programmation Pluriannuelle de l'Energie de la Martinique a été adoptée en 2018 et prévoit notamment une augmentation de la part des énergies renouvelables dans la production électrique (+805%) qui doit permettre d'atteindre 55,6 % d'énergies renouvelables électriques en 2023.

Cette PPE est actuellement en cours de révision pour la période 2024-2033. Les informations sur la révision sont disponibles en ligne¹⁰.

1.2 La planification spatiale maritime

La **stratégie nationale pour la mer et le littoral** (SNML), adoptée en 2017 et révisée en 2024, a la responsabilité de donner un cadre de référence pour les politiques publiques concernant la mer et le littoral. Cette stratégie nationale se décline en outre-mer par des **documents stratégiques de bassin maritime** (DSBM), qui ont pour vocation de coordonner toutes les politiques sectorielles s'exerçant en mer ou sur le littoral.

Le document stratégique de bassin maritime des Antilles a été approuvé en juin 2021¹¹ pour une durée de 6 ans. Il correspond aux littoraux et aux eaux sous souveraineté ou juridiction françaises bordant la Martinique, la Guadeloupe, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Le Code de l'environnement¹² impose une obligation de compatibilité avec les objectifs du DSBM pour tout projet de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements en mer.

Le DSBM des Antilles est organisé autour de 10 thématiques, dont « ressources marines » qui traite des énergies marines renouvelables.

Le DSBM souligne que le bassin maritime des Antilles possède des atouts considérables en matière d'énergies marines renouvelables : des alizés constants pour l'éolien en mer, une mer chaude et des fonds marins profonds proches des côtes pour l'Energie Thermique des Mers (ETM) et le Sea Water Air Conditioning (SWAC), ou encore des trains de houle réguliers.

Toutefois, il ne fournit pas de carte de potentiel de ces énergies, ni de zone identifiée pour le développement de projets.

⁷ Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

⁸ Loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables

⁹ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

¹⁰ <https://www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/programmation-pluriannuelle-de-l-energie-ppe-r597.html>

¹¹ <https://www.dm.martinique.developpement-durable.gouv.fr/le-document-strategique-de-bassin-maritime-a115.html>

¹² Article L219-4 du Code de l'Environnement - https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042017283

1.3 Les études prospectives sur les énergies en mer

1.3.1 Exploitation des ressources marines destinées à la production d'électricité dans les Régions Ultra Périphériques

En 2007, le Conseil Régional de la Martinique a été à l'initiative d'une étude portant sur l'« Exploitation des ressources marines destinées à la production d'électricité dans les Régions Ultra Périphériques ». Sur la base d'une cartographie des différentes contraintes (physiques, environnementales, socio-économiques), cette étude a abouti aux conclusions suivantes pour la Martinique :

- Filière houle : très bonnes potentialités, principalement à l'Est et au Nord Est de l'île ;
- Filière gradient thermique des mers : très fortes potentialités, principalement sur la façade Ouest de l'île en mer des Caraïbes avec environ 350 km² de surface utilisable à l'intérieur de la zone étudiée ;
- Filière vent : bonnes potentialités, principalement sur les façades Est et Sud Est de l'île avec environ 40 km² de surface utilisable à l'intérieur de la zone étudiée ;
- Filière courant : pas de bonne potentialité identifiée à ce jour pour la Martinique.

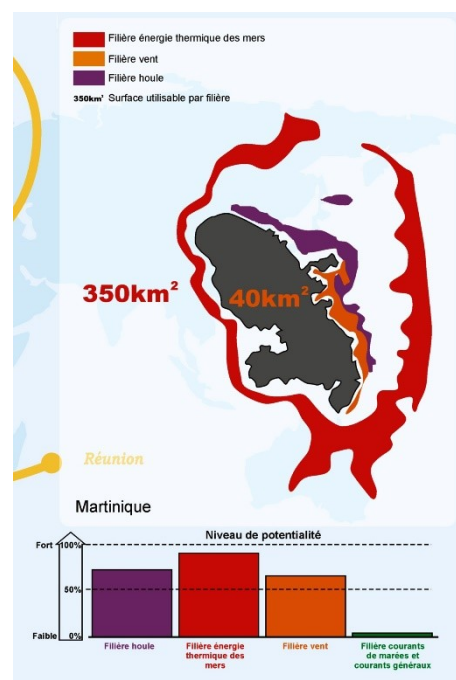


Figure 8 Synthèse du potentiel des EMR en Martinique – Etude 2007

Tableau 4 Paramètres d'évaluation du potentiel de chaque filière – étude conseil régional de 2007

	Vent	Courant	Houlomoteur	ETM
Ressource énergétique	Energie moyenne annuelle à une hauteur de 10m Mini 0,192 MWh/m ² .an > 5,176 MWh/m ² .an - fort potentiel	Vitesse moyenne annuelle Mini 0,64 m/s > 3 m/s – fort potentiel	Puissance moyenne Mini 5 kW/m > 20 kW/m – fort potentiel	Gradient thermique Mini 19 °C > 24°C – fort potentiel
Bathymétrie	0 à 15 m : fort intérêt > 30 m très peu d'intérêt Sauf flottant – pas de limite	30 m = optimal > 10 m et < 60 m	60 m = optimal > 10 m et < 150 m	> 1 000 m et < 1 500 m
Distance à la côte	< 50 km			

1.3.2 Vers l'autonomie énergétique en ZNI en Martinique à l'horizon 2030

Publié par l'ADEME en 2018, ce rapport évalue les implications techniques, organisationnelles et économiques qu'aurait un mix électrique très fortement renouvelable en Martinique à l'horizon 2030.

Concernant l'éolien en mer, il retient une zone potentielle susceptible d'accueillir un parc de taille commerciale de l'ordre de 50 MW, raccordé sur le poste source Marigot. L'atterrage du câble électrique et le raccordement électrique sur ce poste source devrait être possible dans la mesure où il s'agit du poste source retenu pour le projet de raccordement électrique avec la Dominique.

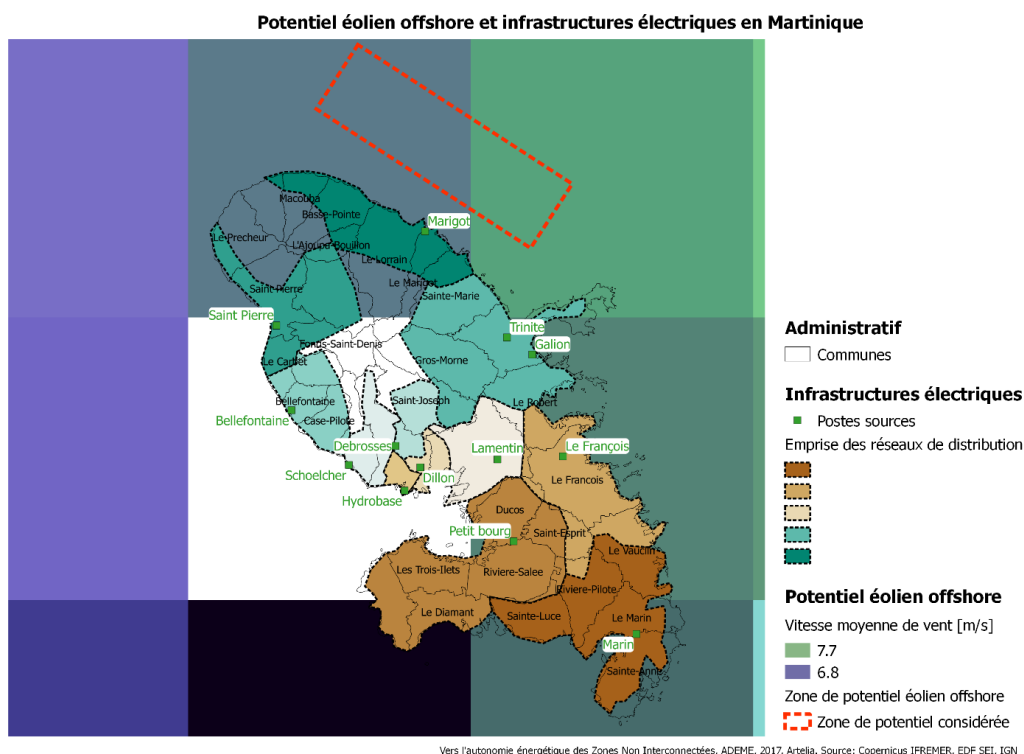


Figure 9 Cartographie de l'attractivité du littoral vis-à-vis de l'éolien offshore (Etude ADEME 2018)

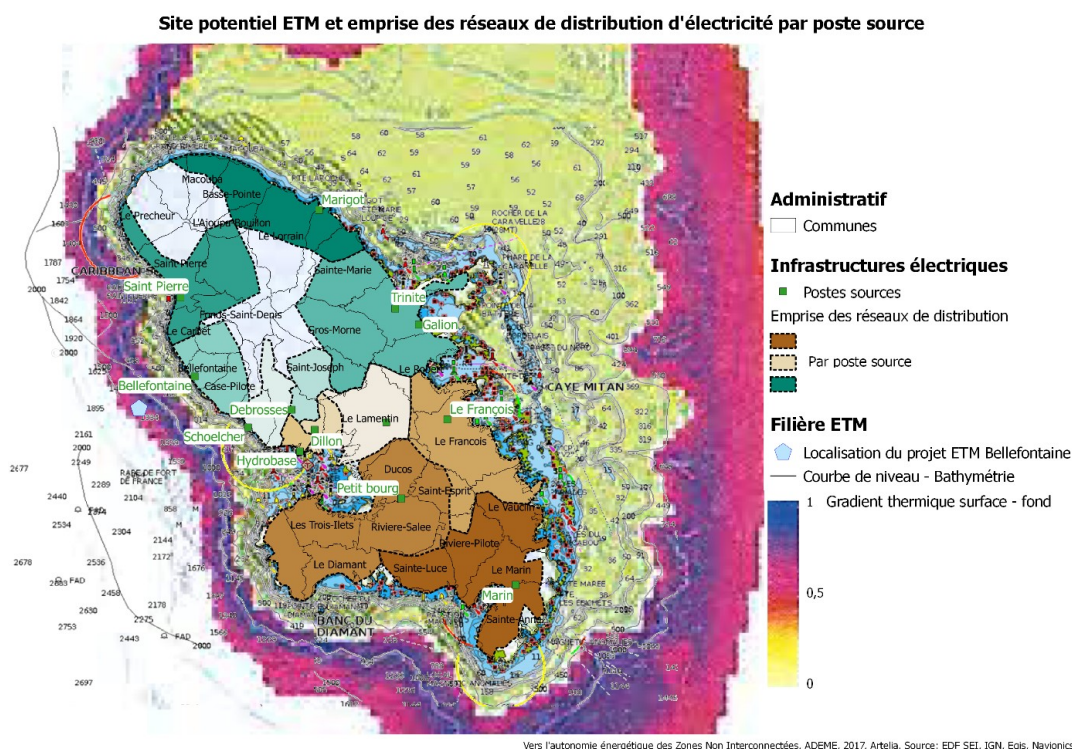


Figure 10 Cartographie des potentiels ETM (Etude ADEME 2018)

1.3.3 État de l'art des EMR - Schéma Régional des Energies de la Mer – La Réunion

Le Schéma Régional des Energies de la Mer de la Réunion réalisé en 2019 présente en détail l'état de l'art de ces technologies, et il a été convenu de ne pas revenir ici sur ces éléments.

Un premier Schéma Régional des Energies de la Mer (SREMER)¹³ avait été réalisé en 2009 par l'Agence Régionale de l'Energie Réunion (ARER). Il a été mis à jour en 2019 afin d'éclairer les décideurs sur le potentiel de développement des énergies marines à la Réunion et sur les pistes d'actions pour valoriser ce potentiel. Il n'a pas de valeur réglementaire mais s'inscrit en complément de la PPE.

Le SREMER montre un grand foisonnement de technologies, une évolution rapide du secteur mais un développement qui stagne au stade de prototypes pré-commerciaux pour les EMR et les technologies de stockage comme les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) marines ou sous-marines. Les raisons de la faible maturité sont parfois techniques, et parfois liées au coût trop élevé de la technologie.

Tableau 5 Paramètres d'évaluation du potentiel de chaque filière – SREMER La Réunion

	Vent	Courant	Houle	Réseau de froid (SWAC)
Ressource énergétique	Mini 6,5 m/s à hauteur de nacelle	Mini 0,5 à 1,5 m/s Maxi 4 – 5 m/s Optimal 2 – 3 m/s	Plusieurs seuils testés : Aucun seuil mini 10 kW/ml mini 15 kW/ml	Température de la masse d'eau au fond de la mer Optimal 5°C > 3°C et < 10°C
Bathymétrie	2 scénarios : Max -1 000m Aucune limite		20 à 50 m = optimal > 20 m et < 120 m	Altimétrie 60 m
Distance à la côte	> 10 km de la côte < 40 km d'un port		< 25 km d'un port	< 12 km (conduites)
Ratio énergétique	3 à 5 MW/km²		Densité de puissance médiane de 12,5 kW/ml.	

1.3.4 Résistance aux conditions extrêmes

En parallèle de la présente étude sur la définition du potentiel des énergies marines renouvelables à la Martinique, le Cerema a produit un rapport dédié à l'analyse de la résistance des EMR aux conditions extrêmes en se basant sur des retours d'expériences sur des EMR ayant été exposées à de tels phénomènes.

Ce rapport est disponible en accès libre sur la plateforme documentaire du Cerema (CeremaDoc).

En conclusion de ce rapport, il est fait état de la prise en compte par les acteurs de la filière EMR de la nécessité de dimensionner les matériels en conditions extrêmes. Ainsi certains systèmes normatifs intègrent plusieurs classes de vent dont les vents extrêmes (norme internationales IEC 61400-1 par exemple). De plus, les développeurs industriels équipent désormais leurs technologies de système dit de « survie » afin d'assurer l'intégrité des matériels face à des conditions extrêmes. Le fabricant d'éolienne Vestas propose par exemple un système de secours en cas d'événements climatiques extrêmes, nommé Yaw Power Backup System.

Aussi, il est conclu que les conditions extrêmes ne sont pas une contrainte bloquante pour le développement des EMR en Martinique.

¹³ <http://energies-reunion.com/nos-actions/energies-renouvelables/energies-marines/sremer>

2 GISEMENT TECHNIQUEMENT EXPLOITABLE

La superficie du territoire de la Martinique est de 1 128 km², avec un linéaire de côtes de 452 km. Son domaine public maritime est presque 5 fois plus vaste avec ses 5 423 km², auquel s'ajoute une zone économique exclusive (ZEE) de 123 483 km² commune avec la Guadeloupe.

2.1 Energie éolienne

2.1.1 Paramètres d'évaluation

2.1.1.1 Vitesse du vent

Le paramètre déterminant dans la performance énergétique d'une zone d'implantation d'éoliennes est la vitesse du vent.

La puissance instantanée du vent repose sur la formule suivante : $P_{\text{vent}} = 1/2 \rho * S * V^3$

Où :

- ρ = masse volumique de l'air (kg/m³)
- S = surface traversée par le vent (m²) (ou balayée par les pales de l'éolienne)
- V = vitesse du vent (m/s)

Ainsi la puissance dépend du **cube de la vitesse du vent**. Un vent 2 fois plus rapide offre donc 8 fois plus de puissance. De plus, puisque la surface balayée dépend du carré du rayon du rotor ($S = \pi * R^2$), la puissance dépend également du **carré du rayon de l'éolienne**. Un rotor 2 fois plus long offre donc 4 fois plus de puissance.

L'énergie du vent étant variable dans le temps, il est ensuite souhaitable de connaître la distribution du vent afin de calculer l'énergie moyenne annuelle en MWh/m².an. Dans un contexte de planification à l'échelle régionale, la vitesse moyenne du vent à hauteur de la nacelle permet cependant d'obtenir une première indication directe du potentiel de production de la zone.

Une vitesse minimale de **7 m/s à l'altitude de la nacelle** a été retenue dans les travaux précédents du Cerema en concertation avec France Energie Eolienne (*devenu France Renouvelables*). Une vitesse minimale de 7 m/s est également le critère retenu dans la méthodologie d'autres études, comme le SREMER de la Réunion, celles de la banque mondiale¹⁴, du Global Wind Energy Council, ou encore de l'administration américaine¹⁵. Une étude récente pour Wind Europe¹⁶ retient un critère de 8 m/s.

Le schéma régional éolien de Martinique de 2013, qui concerne l'éolien terrestre, fixe le seuil minimal à 4,5 m/s à 100 mètres de hauteur. Le schéma régional éolien de Guadeloupe va plus loin et fixe quatre classes :

- **Faible** < 170 W/m² ou < 5,9 m/s ;
- **Assez favorable** entre 170 et 270 W/m² ou entre 5,9 et 6,9 m/s ;
- **Favorable** entre 270 et 370 W/m² ou entre 6,9 et 7,9 m/s ;
- **Très favorable** > 370 W/m² ou > 7,9 m/s

L'étude du conseil régional de la Martinique de 2007 fixait une limite basse de 0,192 MWh/m².an soit 22W/m² et un fort potentiel au-delà de 5,176 MWh/m².an soit 591 W/m².

¹⁴ World Bank Group - Energy Sector Management Assistance Program - <https://esmap.org>

¹⁵ Musial, W.; Heimiller, D.; Breiter, P.; Scott, G.; Draxl, C. (National Renewable Energy Laboratory) : « Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States », septembre 2016.

¹⁶ Hundleby, G.; Freeman, K. (BVG Associates pour WindEurope) : « Unleashing Europe's offshore wind potential – A new resource assessment », juin 2017.

2.1.1.2 Bathymétrie

Si le vent permet de déterminer la performance des zones, la bathymétrie est également un paramètre important à prendre en compte à la fois pour l'éolienne et pour le raccordement électrique. Il s'agit à la fois de faisabilité technique, et d'impact sur les coûts d'investissement.

Technologies posées

Les trois premiers projets français reposent sur des technologies posées :

- Monopieu : Saint Nazaire (profondeur 12-25 m)
- Jacket : Saint Brieuc (profondeur 35 m)
- Gravitaire : Fécamp (profondeur 30 m)

Les zones de bathymétrie inférieures à 8-10 m sont techniquement exclues pour des raisons de sécurité et d'accessibilité au site par des navires spécialisés pour l'installation des éoliennes.

La limite haute pourrait être discutée car elle a progressivement augmenté en fonction des évolutions technologiques (éoliennes, navires d'installation). Ainsi, l'étude de 2007 privilégiait des profondeurs allant de 0 à 15 m et excluait une profondeur supérieure à 30 m.

A l'horizon 2030 pour la construction, les différents types de fondations devraient permettre d'implanter des parcs jusqu'à une bathymétrie de -70 m et potentiellement jusqu'à -80 m, parfois appelé « éolien posé grande profondeur ».

La présente étude est basée sur les **limites -10 m et -70 m pour l'éolien posé**.

Technologies flottantes

Pour les parcs flottants, le tirant d'eau des flotteurs ainsi que leurs lignes d'ancrage imposent une profondeur minimale. S'il est techniquement possible de les ancrer à partir de 40 m de fond¹⁷, le coût des ancrages n'est pas optimal et une technologie posée sera très probablement plus compétitive.

Concernant la limite supérieure, il n'existe pas de limite technique claire et consensuelle à la profondeur maximale d'ancrage du flotteur. L'expérience du « oil & gas » montre toutefois que le coût d'une chaîne conventionnelle en acier serait optimal entre 100 m et 250 m, et reste même moins cher à 800m qu'à 60m¹⁸. Les nouveaux matériaux synthétiques

L'étude de Wind Europe et la méthodologie WBG-ESMAP¹⁹ retiennent une **bathymétrie maximale de -1 000 m** pour l'éolien flottant. C'est également la limite posée par l'un des deux scénarios du SREMER de La Réunion.

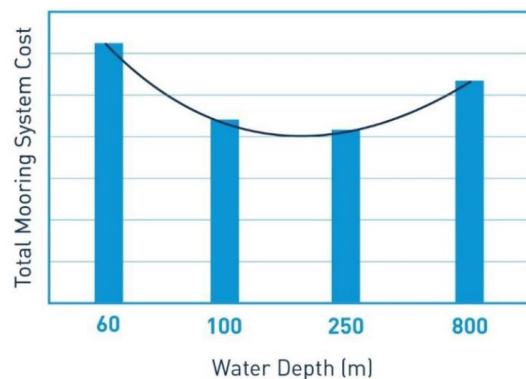


Figure 11 Coût d'un ancrage conventionnel en acier en fonction de la profondeur de l'eau (Source : Carbon Trust)

Enfin, si les démonstrateurs se trouvent actuellement dans des profondeurs situées entre 33 m (Floatgen) et 220 m (Hywind demo) les zones définies pour les projets éoliens flottants en cours en Californie (Etats-Unis) ont des profondeurs maximales de 759 m (Humboldt) et 1 012 m (Morro Bay).

La présente étude est basée sur les **limites -40 m et -1 000 m pour l'éolien flottant**. Il existe donc une zone de potentiel commune aux technologies posées ou flottantes entre -40 et -70m.

¹⁷ Review of the state of the art of mooring and anchoring designs, technical challenges and identification of relevant DLCs, projet Corewind H2020, février 2020

¹⁸ Floating Wind Joint Industry Project, Phase I Summary Report, Key findings from Electrical Systems, Mooring Systems, and Infrastructure & Logistics studies, Carbon Trust, May 2018

¹⁹ World Bank Group - Energy Sector Management Assistance Program

2.1.1.3 Ancrages d'éoliennes flottantes

Si la profondeur de la colonne d'eau n'est pas un obstacle majeur, la nature du sol, et notamment les fortes pentes peuvent limiter les possibilités d'ancrage des flotteurs.

En raison du faible nombre d'éoliennes flottantes déployées, le retour d'expérience reste très faible sur ces différents systèmes. Les connaissances sur les technologies d'ancrage éprouvées proviennent majoritairement des données issues des plateformes pétrolières offshore.

Le groupe de travail « fondations d'éoliennes flottantes » du Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, dont le Cerema fait partie, a travaillé de 2019 à 2023 sur un guide de recommandations sur la conception des ancrages²⁰, qui devrait paraître très prochainement, et qui traite de ce sujet.

Il n'est pas possible de fixer une limite de pente précise pour l'ensemble de la Martinique, car celle-ci dépend des conditions spécifiques à chaque site. Toutefois, **une limite assez large de 10° a été retenue pour exclure les zones non réalistes.**

En effet, 10° peut être considérée comme la pente maximale pour des conditions géotechniques "classiques", c'est-à-dire pour lesquelles la cause de l'instabilité de l'ancrage est principalement la gravité. C'est aussi la limite retenue dès 2011 dans les études du Cerema concernant le potentiel hydrien, en lien avec le Syndicat des Énergies Renouvelables.

A une échelle plus fine, il conviendrait toutefois d'analyser plus précisément d'autres facteurs, comme la sédimentation rapide ou le risque sismique, qui pourraient aggraver la stabilité pour des pentes plus faibles. Ainsi une étude de 2015 sur l'éolien flottant pour l'ADEME et le Conseil Régional de la **Guadeloupe** avait fixé une **limite de 5°** en soulignant que « *les zones de faibles pentes sont également à privilégier* »²¹.

2.1.1.4 Raccordement électrique en mer

Afin de transporter l'électricité produite par les éoliennes jusqu'au réseau terrestre, il est nécessaire d'installer des liaisons électriques sous-marines jusqu'au point d'atterrage. Le poste électrique en mer permet alors de concentrer la production électrique de toutes les éoliennes d'un parc, d'élever la tension du courant produit de 66 kV à 225 kV, et ainsi d'assurer le transit vers le continent avec un nombre réduit de câbles sous-marins de grande puissance (de 250 à 300 MW par câble).

Il n'existe pour l'instant pas de technologie de poste électrique flottant de grande puissance (500 MW). Aussi, même dans le cas d'un parc éolien flottant, ce poste électrique en mer sera installé sur une fondation posée comme le montre la figure ci-dessous. Pour le développement des projets en France métropolitaine, Réseau de Transport d'Électricité (RTE) considère qu'il est **techniquement envisageable de placer ce poste jusqu'à une profondeur de 100 mètres.**

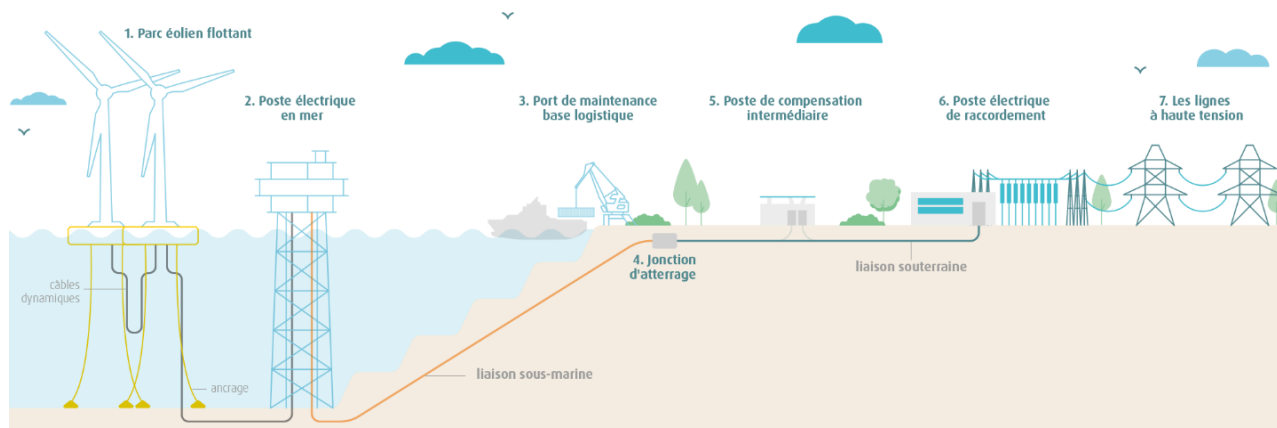


Figure 12 Principe de raccordement d'un parc en mer (Source Ministère de la Transition énergétique - RTE)

²⁰ Recommendations for planning and designing anchor foundations of floating wind turbines, Workgroup « Foundations of Floating Wind Turbines », CFMS, Document accessible uniquement aux membres du CFMS jusqu'au 01/09/2026.

²¹ Pré-diagnostic pour le développement éolien offshore flottant en Guadeloupe, Akuo Energy Caraïbes, juillet 2015

Dans le cas d'un parc avec un nombre réduit d'éoliennes, un poste électrique en mer n'est pas indispensable. La figure ci-dessous présente ainsi le principe de raccordement du projet pilote flottant « Provence Grand Large » situé au large de Fos-sur-Mer en Méditerranée. Il est composé de 3 éoliennes de 8 MW chacune. L'électricité produite est transportée via un câble de raccordement de 12 cm de diamètre et long d'environ 30 km, dont 19 km en mer, pour rejoindre le réseau électrique public.

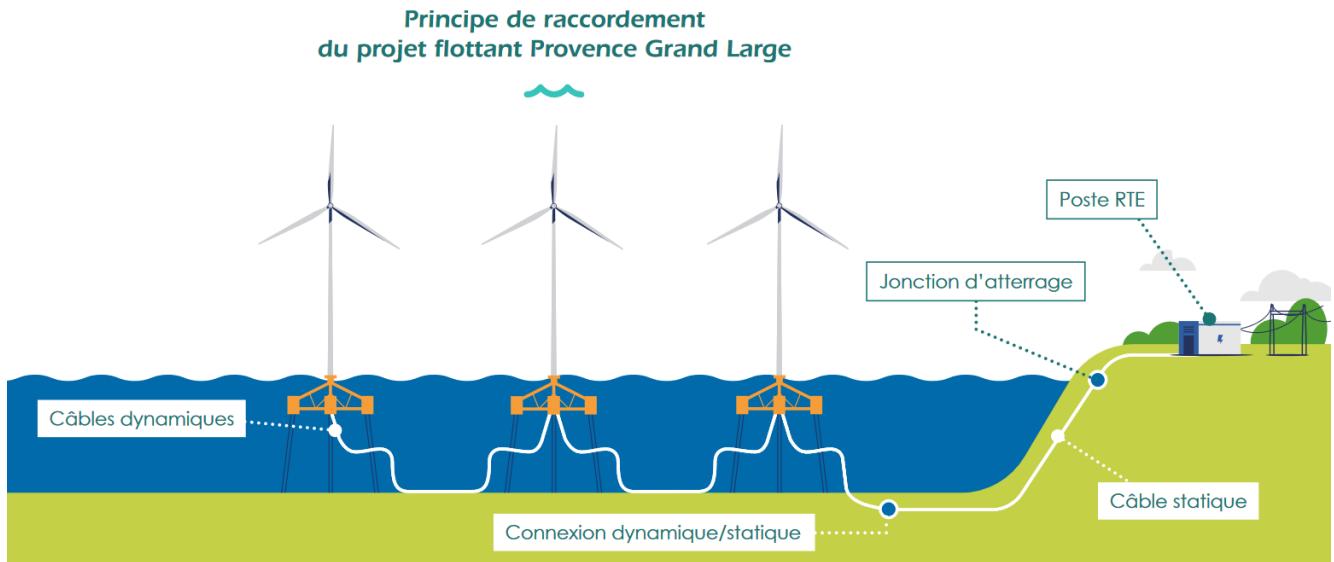


Figure 13 Principe de raccordement du parc éolien en mer flottant « Provence Grand Large »

Le projet français Eolmed, situé en Méditerranée a tout de même choisi d'installer un « hub électrique flottant » pour ce parc pilote de 30 MW, ce qui, contrairement à une connexion en série, permettra de déconnecter l'une des trois turbines sans perturber l'export de l'énergie produite par les deux autres.

Enfin, dans le cadre du développement de nouveaux projets en France métropolitaine, RTE, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité en métropole, avait indiqué que les **talus du Golfe du Lion et du Golfe de Gascogne constituent des limites physiques pour le raccordement** au-delà de la notion même de bathymétrie. Les fortes pentes et les reliefs très accidentés rendent la pose et la stabilité de la liaison sous-marine complexe.

La plupart des interconnexions électriques sous-marines dans le monde se trouvent dans une profondeur d'eau inférieure à 500m. En 2015, seuls 3 câbles dépassaient largement cette limite²² :

- Italie-Grèce : 1 000m de profondeur,
- Majorque-Espagne : 1 485m de profondeur
- Sardaigne-Italie – SA.PE.I. : 1 650m de profondeur (1 000 MW, 500 kV)

L'expérience des câbles de télécommunications recommande d'éviter les canyons sous-marins actifs, alimentés par des rivières à fort débit. Cependant, cela implique de choisir un itinéraire alternatif, qui peut être plus long et entraîner un coût plus élevé.²³

²² Mircea Ardelean, Philip Minnebo, « HVDC Submarine Power Cables in the World », JRC technical reports, Report EUR 27527 EN, 2015 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97720/Id-na-27527-en-n.pdf>

²³ Ibid, page 25

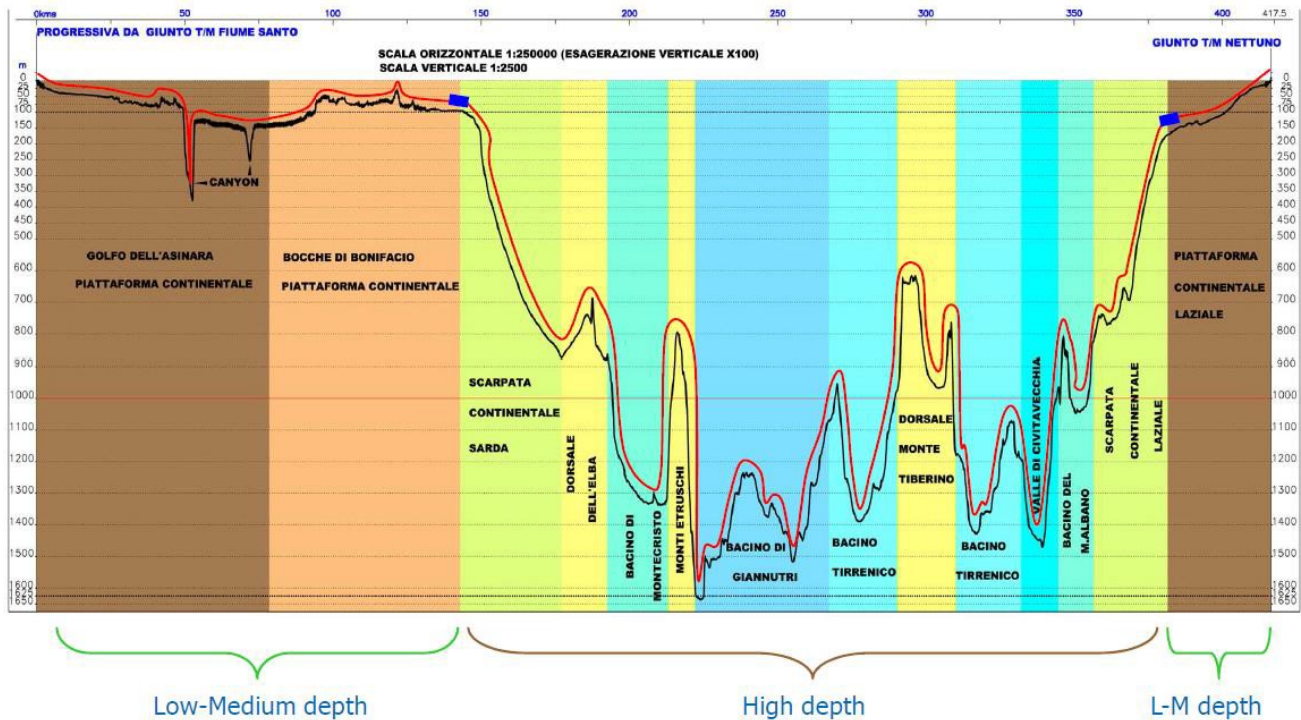


Figure 14 Profil du câble HVDC SA.PE.I. entre la Sardaigne et l'Italie continentale (Source : JRC - CIGRE 2014)

Une solution pour franchir les dénivelés très importants serait d'utiliser des câbles dynamiques au-delà du plateau. Les câbles dynamiques inter-éoliennes de 66 kV pourraient d'ailleurs rester en suspension dans la colonne d'eau, sans toucher le fond, à une profondeur suffisamment importante pour garantir la sécurité de la navigation.²⁴

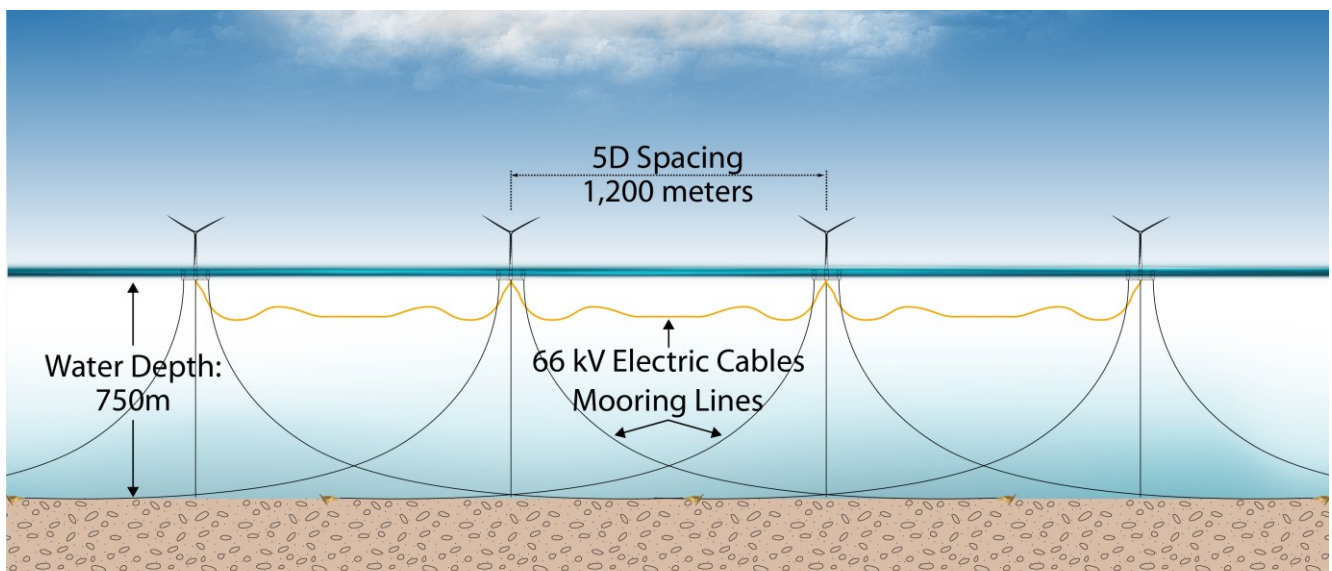


Figure 15 Vue en coupe de la colonne d'eau avec les lignes d'ancrage et les câbles électriques de 4 turbines distantes chacune de 5 fois le diamètre du rotor. Le rayon de la ligne d'ancrage fait environ deux fois la profondeur d'eau. (Source Josh Bauer, NREL)

²⁴ Shields, Matt, Patrick Duffy, Walt Musial, Michael Laurienti, Donna Heimiller, Rob Spencer, and Mike Optis. 2021. The Cost and Feasibility of Floating Offshore Wind Energy in the O'ahu Region. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP- 5000-80808. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/80808.pdf>

Il y a donc lieu d'examiner la complexité des fonds marins sur la zone d'étude afin de déterminer, en lien avec le gestionnaire du réseau, l'opportunité de limiter l'étendue du gisement uniquement aux zones favorables à un raccordement électrique par câble. Si le raccordement électrique est impossible, il reste possible d'envisager un autre vecteur énergétique, comme l'hydrogène ou l'air comprimé. Ce point n'est pas approfondi dans le cadre de cette étude.

2.1.1.5 Synthèse des paramètres retenus

Tableau 6 Limites techniques retenues pour la définition des 3 gisements techniquement exploitables, compte tenu des contraintes liées à l'implantation des éoliennes et de leur raccordement électrique.

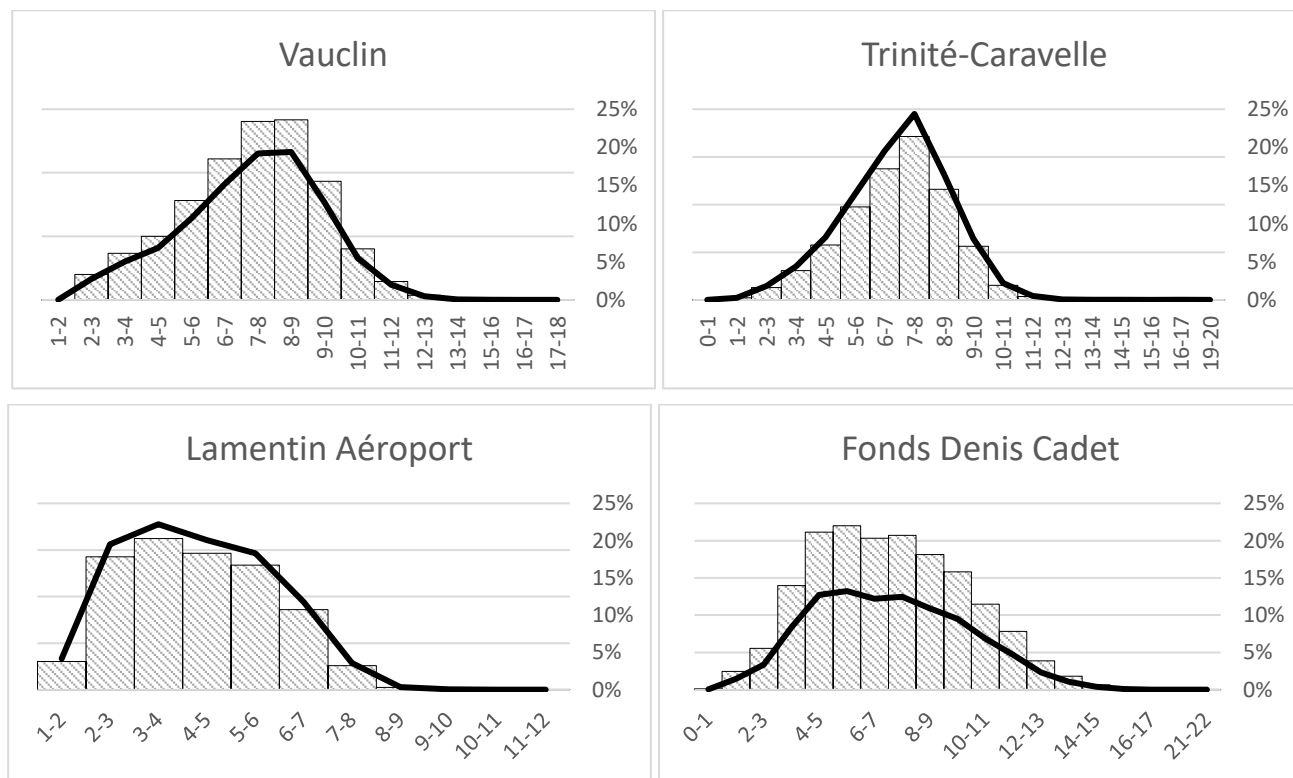
	Technologie	Vent	Bathymétrie	Pente	Distance à la côte
1	Eolien posé	Faible < 6 m/s Assez favorable 6-7 m/s Favorable 7-8 m/s Très favorable > 8 m/s	- 10 m / - 40 m		60 km
2	Eolien posé ou flottant		- 40 m / - 70 m		
3	Eolien flottant avec poste électrique posé		- 70 m / - 100 m	< 10°	
4	Eolien flottant		100 m à 1 000 m		

Enfin, les zones d'une surface inférieure à 2 km² ont été exclues pour obtenir des zones homogènes.

2.1.2 Application à la zone d'étude

2.1.2.1 Vitesse du vent

Aux Antilles, les alizés soufflent assez régulièrement toute l'année (80%) du secteur Est à Nord-Est selon les saisons. Le flux d'alizé se caractérise notamment par une régularité importante des vents moyens comme le montre la figure suivante sur 4 sites à la Martinique.



* Données manquantes sur la période 06-2004 à 01-2006 et 08 à 10-2007

Figure 16 Distribution fréquentielle des vitesses moyennes quotidiennes du vent mesurées à 10 m sur 4 postes météorologiques à la Martinique sur la période 2002-2021 (Source données Météo-France, analyse Cerema)



Figure 17 Localisation des postes météorologiques étudiés (Source Météo-France)

Il existe deux régimes de vent saisonniers principaux, comme illustré par la Figure 18 :

- Saison sèche (décembre-mai) : régime anticyclonique avec des vents stables et soutenus.
- Saison des pluies (juin-novembre) : régime cyclonique avec des vents plus variables tant en intensité qu'en direction, pouvant occasionner des dépressions tropicales, tempêtes ou même des épisodes cycloniques avec des vents instantanés très violents pouvant dépasser les 200 km/h.

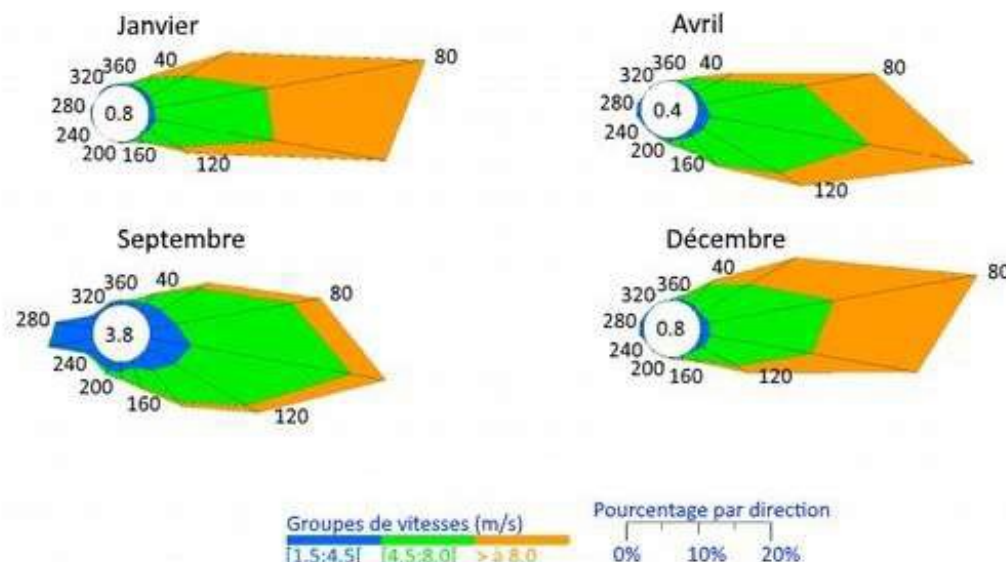


Figure 18 Roses saisonnières des vents moyens tri-horaires à 10 m au Vauclin (Martinique) 2001-2010 (Source DSBM Antilles – Météo France)

Tableau 7 Vitesses de vent moyennes mesurées à la Martinique sur la période 2002-2021 (Source : Météo-France)

Poste météorologique	Altitude du poste (m)	Vitesse moyenne du vent (à 10 m en m/s)
Fond-Denis-Cadet (Nord-Ouest) <i>Données manquantes sur la période 06-2004 à 01-2006 et 08 à 10-2007</i>	493	7,0
Trinite-Caravelle (Nord-Est)	26	6,9
Vauclin (Sud-Est)	12	7,3
Fort-De-France Desaix (Ouest)	143	4,7
Lamentin-Aéroport (Ouest)	3	4,3

Depuis décembre 2023, une partie des données de Météo France est accessible librement. C'est notamment le cas des données climatologiques quotidiennes mesurées à terre par différentes stations météorologiques de la Martinique présentées ci-dessus. En revanche, les archives des données du modèle AROME, qui couvre l'ensemble de la zone « Antilles », ne sont pas encore disponibles librement. Elles devraient l'être courant 2024.

Aussi, les données de vent de la présente étude sont issues du modèle de l'Atlas mondial des ressources éoliennes (GWA) réalisé par le département de l'énergie éolienne de l'Université technique du Danemark (DTU Wind Energy) dans le cadre d'une coopération internationale²⁵. Il utilise les données ERA5 du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMPT), qui sont des données de réanalyse pour la période de 2008-2017²⁶.

²⁵ <https://globalwindatlas.info/fr/about/introduction>

²⁶ <https://globalwindatlas.info/fr/about/method>

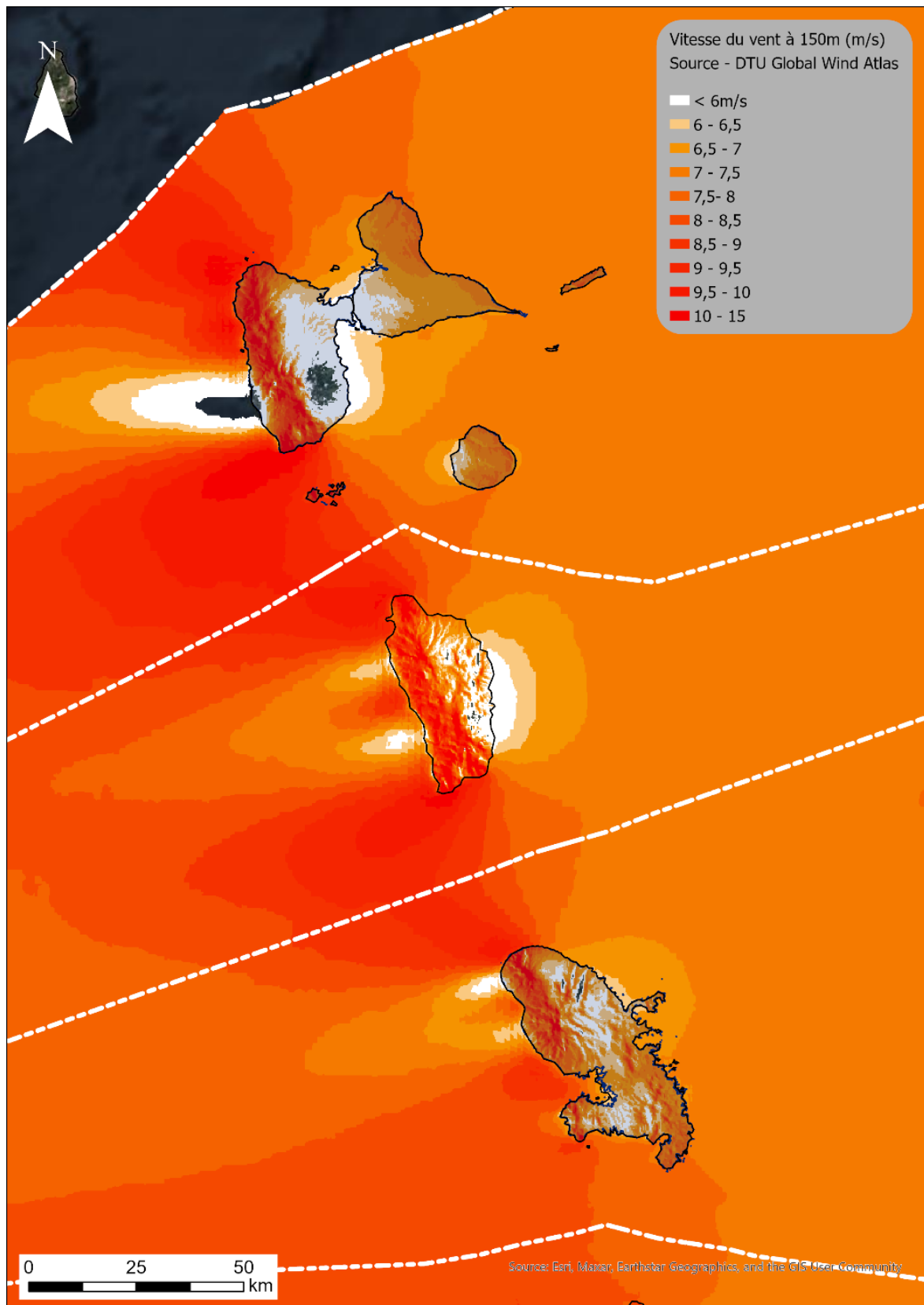


Figure 19 Vitesse moyenne du vent à 150 m d'altitude dans les Antilles (Source Global Wind Atlas)

La carte ci-dessous caractérise le gisement de vent à 150 m d'altitude selon quatre catégories :

- Faible en deçà de 6 m/s ;
- Assez favorable entre 6 et 7 m/s ;
- Favorable entre 7 et 8 m/s ;
- Très favorable au-delà de 8 m/s

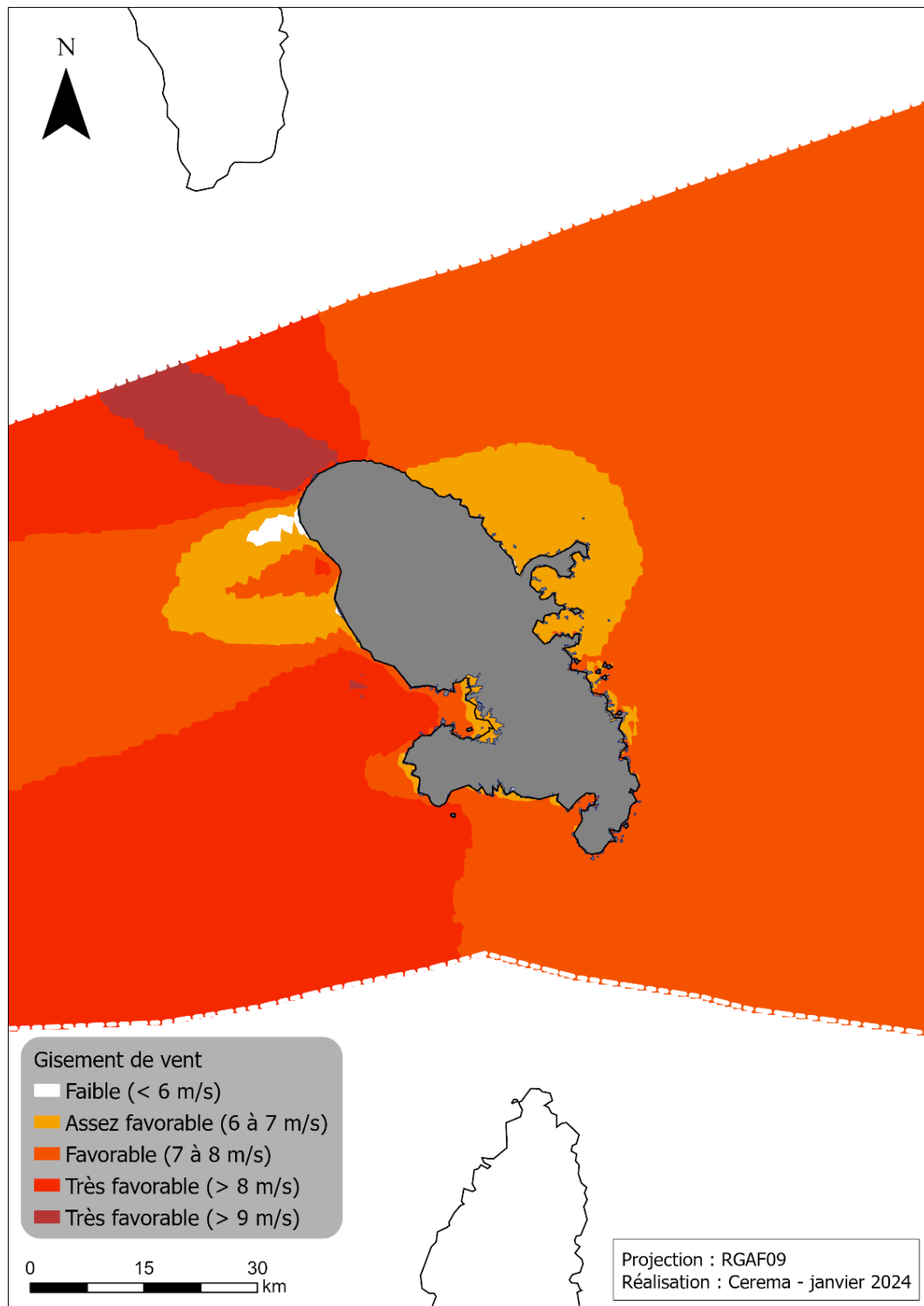


Figure 20 Caractérisation du gisement de vent à 150m d'altitude à la Martinique (Source Global Wind Atlas)

Le gisement de vent le plus intéressant se trouve à la pointe Nord-Ouest de l'île, avec une vitesse moyenne supérieure à 9 m/s, et au Sud-Ouest. Dans la partie Est, la vitesse moyenne est assez favorable (6 à 7 m/s) ou favorable (7 à 8 m/s).

2.1.2.2 Bathymétrie, pente et nature des sols

De manière très schématique, les îles des Caraïbes peuvent être décrites comme des volcans émergés plus ou moins recouverts de roches sédimentaires calcaires. La Martinique s'est formée grâce à l'apparition progressive d'îles les unes à côté des autres qui ont ensuite été reliées par des ponts volcaniques²⁷.

Cinq principaux ensembles morphologiques peuvent être distingués autour de la Martinique²⁸ :

1. **Nord-Est** : de la pointe de Macouba (Nord) à la Trinité (Nord-Est)

La large plate-forme est caractérisée par une pente côtière assez continue jusqu'à -60 mètres de profondeur, prolongée par une vaste zone centrale plane à légèrement déprimée autour de -70 m. Au Nord-Est de la Trinité, la plate-forme s'élargit considérablement jusqu'à atteindre 25 km de large.

Les sédiments volcaniques de la zone proviennent essentiellement de l'érosion de la montagne Pelée.

2. **Est à Sud-Est** : de la pointe de la Caravelle (Est) au Cap Ferré (Sud-Est)

La presqu'île de la Caravelle marque un changement dans la morphologie de la zone côtière avec la présence d'une double barrière récifale au Nord et à l'Est de la presqu'île. Vers le Sud-Est, seul le premier récif frangeant subsiste : il s'élargit notablement (jusqu'à 2 km) et est entrecoupé de nombreuses passes. Il s'interrompt au Sud-Est au large de Macabou où il est très proche du récif frangeant.

Les récifs-barrières fournissent des éléments biogènes grossiers lors de leur destruction par les houles de tempête. Dans la zone abritée, entre la côte et le récif-barrière, les sédiments carbonatés sont fins (argiles et silts) et les apports volcaniques sont faibles en raison d'un réseau hydrographique peu développé.

3. **Sud** : de l'Anse des Salines (Sud) au Rocher et à la pointe du Diamant (Sud-Ouest)

4. **Baie de Fort-de-France** : seule zone de petits fonds étendus sur la côte orientale.

5. **Ouest à Nord-Ouest**, de Schoelcher (Ouest) à Grand Rivière (Nord)

Sur la côte caraïbe au large des volcans les plus récents, les processus de transfert sédimentaire et d'érosion des pentes dominant largement. Outre l'important glissement récent associé à la Soufrière de La Dominique au Nord, des masses glissées très volumineuses sont aussi relevées au droit de la Montagne Pelée (Deplus et al., 2001).

²⁷ Document stratégique de bassin

²⁸ Guennoc P., Duclos P.A., Cartographie morpho-sédimentologique du domaine côtier de la Martinique, BRGM, janvier 2008

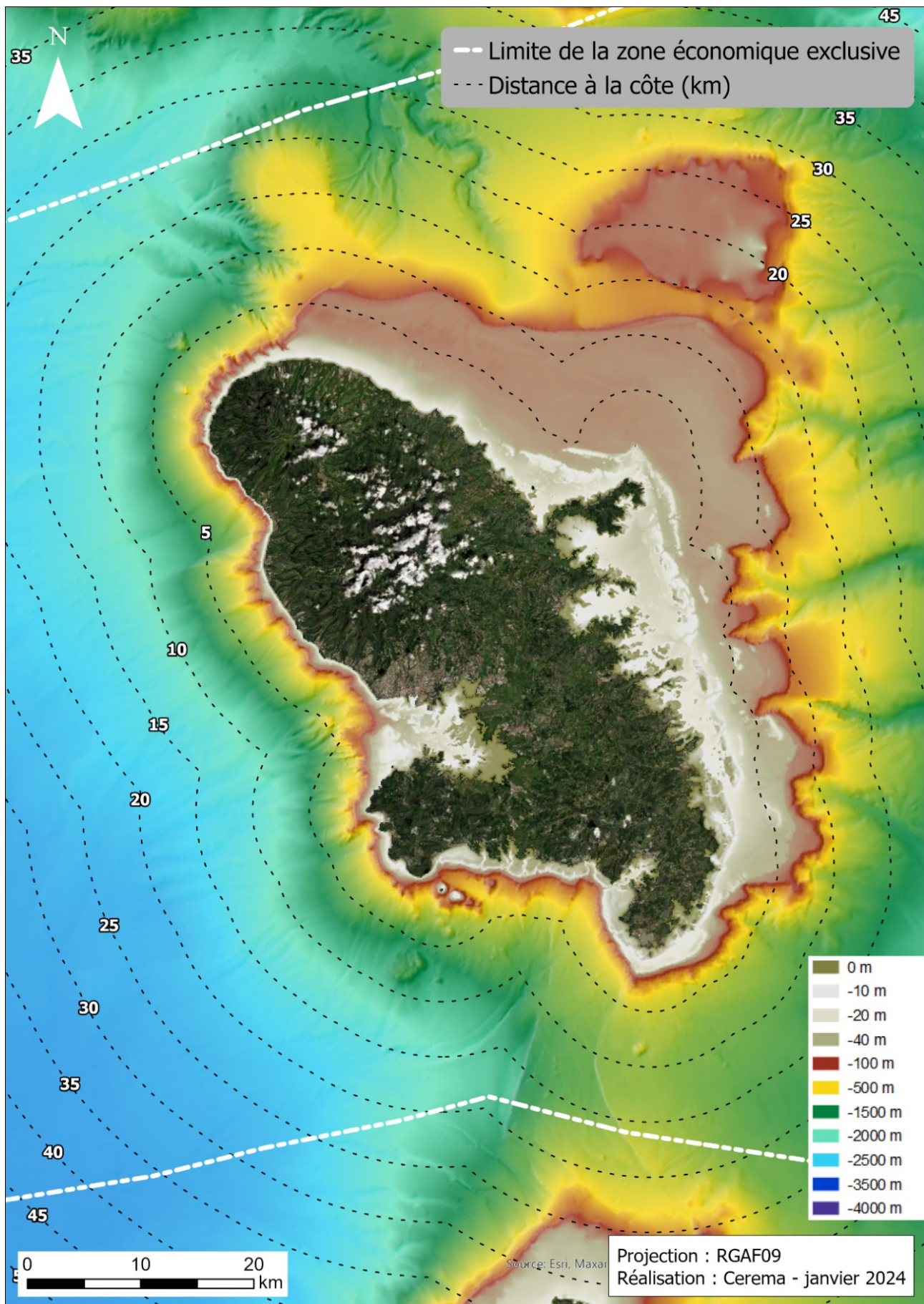


Figure 21 Carte de bathymétrie de la Martinique (source SHOM)



Figure 22 Toponymie des communes et principales zones côtières de l'île et localisation des principales structures morphologiques (Source : BRGM)

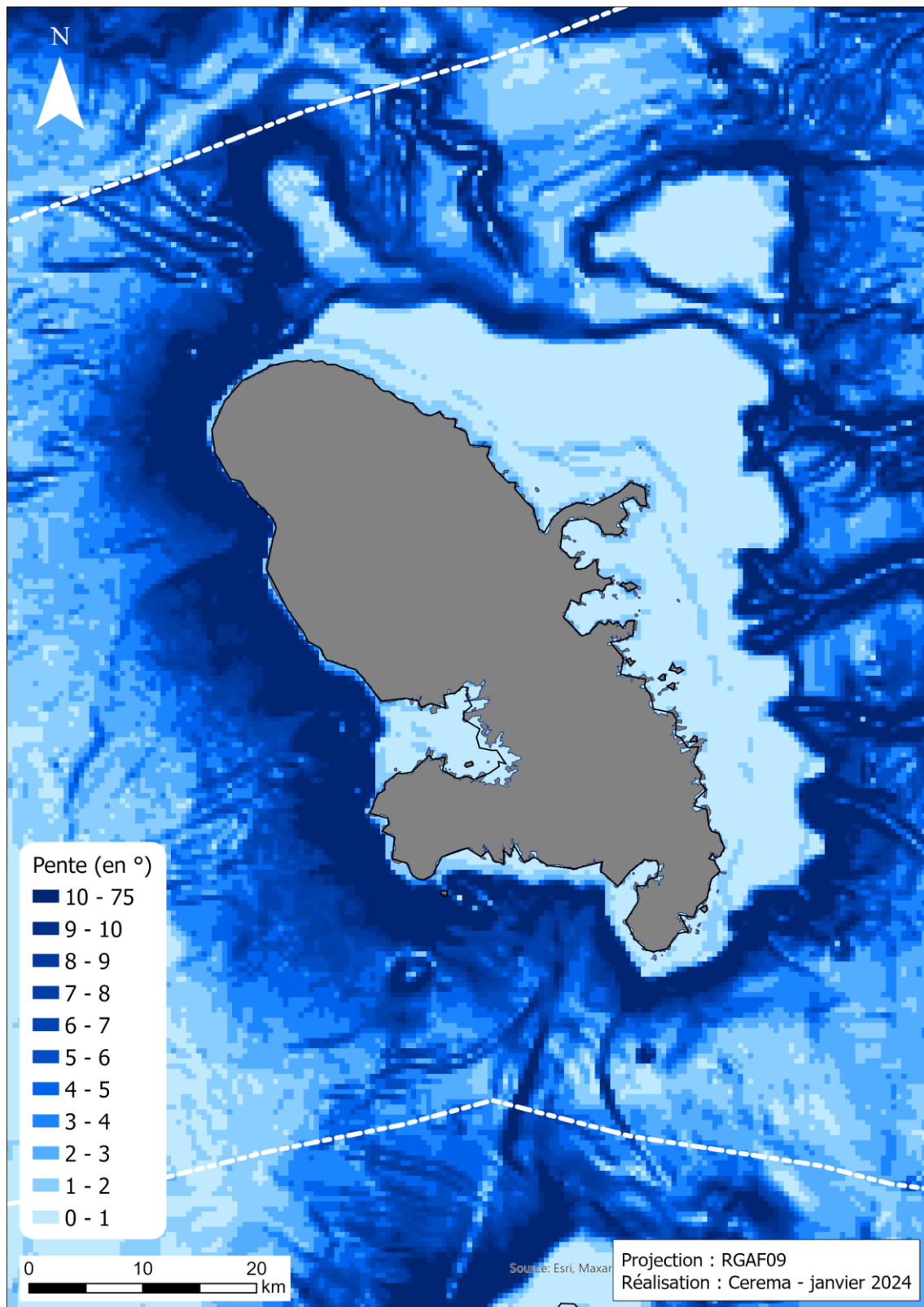


Figure 23 Pentas sous-marines (en °) autour de la Martinique (source SHOM - Homonim)

Au-delà du plateau continental, les fonds marins sont marqués par de fortes pentes supérieures à 10°. Ces zones sont donc considérées comme incompatibles avec l'ancrage d'éolienne. Il faut noter que la résolution de modèle fourni par le SHOM est de 100m, ce qui ne permet pas d'analyser en détail les ruptures de pentes.

En 2023, le Parc Naturel Marin de Martinique a réalisé une cartographie des habitats marins côtiers de la Martinique entre 0 et 40 mètres de profondeur²⁹.

Le substrat meuble y est largement dominant et représente 77% de la superficie totale avec une dominance du sable corallien (63% du substrat meuble) puis du substrat sablo-vaseux (généralement en fond de baie, 22%) et enfin du sable volcanique (12%). Le substrat dur ne représente que 23 % de la zone notamment liée à la présence de structure récifale (89% du substrat dur).

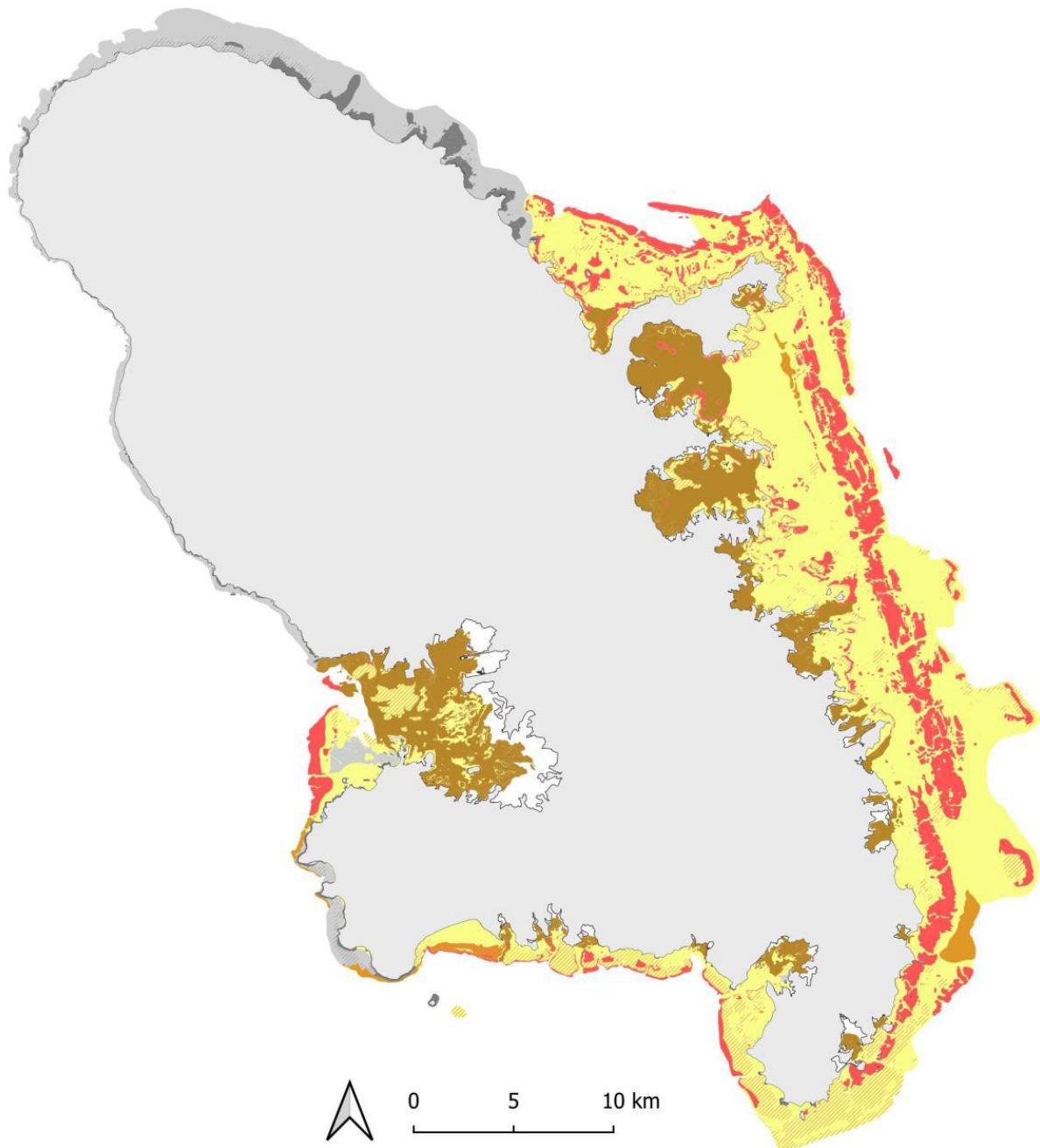
Substrat	Total général
Sable corallien	21884 (44%)
Sablo-vaseux	8426 (17%)
Dur corallien	7640 (15%)
Dur + sable corallien	4627 (9%)
Sable volcanique	4529 (9%)
Dur volcanique	1027 (2%)
Débris coralliens	590 (1%)
Dur + sable volcanique	526 (1%)
Sable et débris coralliens	348 (1%)
Dur + débris coralliens	169 (0%)
Métal	0 (0%)
Total général	49765 (100%)

Figure 24 Superficie de chacun type de substrat en ha (entre parenthèse part en % de chacune des classes) – (Source Parc Naturel Marin de Martinique)

La nature et les caractéristiques mécaniques des fonds marins sont deux paramètres pris en compte pour le choix des fondations et la méthode de dimensionnement des éoliennes en mer. Cependant, l'absence de connaissances relatives à la nature des sédiments de surface et à l'épaisseur des sédiments au-delà de 40m de profondeur ne permet pas de prendre en compte ces éléments géotechniques dans les analyses.

La nature des fonds a donc été exclue de l'analyse, et des campagnes de mesures géotechniques et géophysiques seront nécessaires pour disposer d'informations concrètes sur les zones de potentiel.

²⁹ Nicet J.B., Montgolfier B., Pinaut M., Safi M., Wickel J., « Carte des habitats marins côtiers (0-40m) de la Martinique. Etat de santé des habitats », Rapport MAREX/AQUASEARCH pour le compte du Parc Naturel Marin de Martinique (OFB), septembre 2023.



Substrat	
	Dur volcanique
	Dur + sable volcanique
	Sable volcanique
	Dur corallien
	Dur + débris coralliens
	Débris coralliens
	Dur + sable corallien
	Sable et débris coralliens
	Sable corallien
	Sablo-vaseux
	Métal

Figure 25 Carte du substrat de la zone côtière (0-40m) (Source Parc Naturel Marin de Martinique)

2.1.2.3 Raccordement électrique en mer

Dans une note de juillet 2023 intitulée « insertion des énergies marines renouvelables en Outre-mer », EDF SEI³⁰ apporte des éclairages spécifiques au sujet de l'insertion des EMR dans les différents systèmes électriques de zones non interconnectées (ZNI) dont fait partie la Martinique.

EDF SEI suggère les règles de sûreté suivantes pour assurer la stabilité du système :

- ▶ la limitation de la puissance maximale du plus gros groupe de production à 12 ou 15% de la puissance à la pointe du territoire ;
- ▶ les moyens de production « assuranciers » nécessaires pendant un événement climatique extrême qui imposerait la mise en sécurité d'un site de production EMR ;
- ▶ le doublement des liaisons de raccordement vers deux postes HTB différents, pour éviter la perte de production en cas de perte d'un des raccordements ;
- ▶ le développement massif de moyens de stockage (batteries, STEP) pour maîtriser la variabilité de la production électrique des EMR ;
- ▶ et la réalisation d'adaptations et de renforcements du réseau haute tension.

La note d'EDF SEI pose également deux limites techniques :

- ▶ limiter la distance de raccordement à 63 kV d'un site EMR de 50 MW à **60 km environ**.
- ▶ adapter le retour d'expérience en Europe continentale au contexte local, notamment en raison des « *fonds marins plus complexes en termes de pente, de profondeur, de nature du sol (canyons et zones volcaniques) et exposés à un risque sismique* ». Ainsi, « *les techniques d'ensouillage ou de protection mécaniques des câbles sous-marins seront plus difficiles à mettre en œuvre* ».

Il y a donc lieu de confirmer dans quelle mesure des moyens de production pourraient être raccordés au-delà du plateau continental.

Un exemple encourageant est le projet d'interconnexion avec la Dominique qui, bien qu'il ait été abandonné en 2013, prévoyait la production d'électricité géothermique de 130 MW à La Dominique pour approvisionner la Guadeloupe et la Martinique à hauteur de 50 MW chacune via un câble sous-marin.

Comme noté dans le rapport de l'ADEME de 2018, il était prévu un raccordement électrique sur le poste source Marigot au Nord-Est de la Martinique.

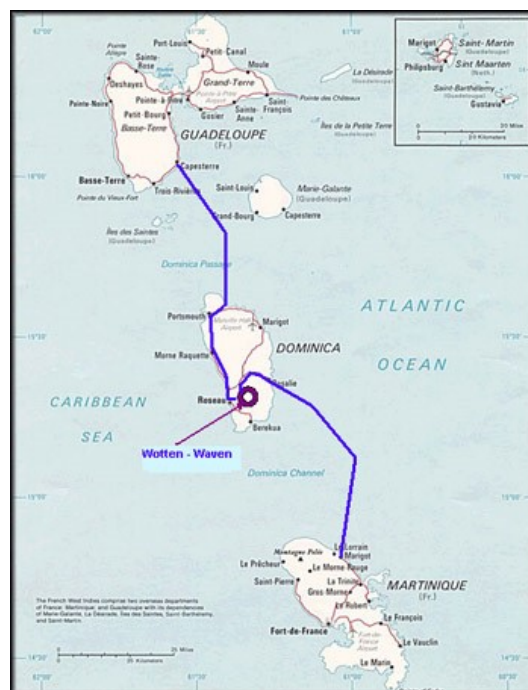


Figure 26 Projet abandonné d'interconnexion électrique Dominique-Antilles Françaises (Source : AFD)

³⁰ EDF Systèmes Energétiques Insulaire : gestionnaire du réseau électrique de différentes zones non interconnectées (ZNI) dont la Martinique

2.1.2.4 Potentiel éolien à moins de 100 m de profondeur

L'étude tient compte de la zone de chevauchement entre technologies posée et flottante située entre -40 et -70 m de profondeur. Ainsi la carte ci-dessous présente les zones de potentiel par technologie, avec une limite de bathymétrie de -100 m pour installer un poste électrique.

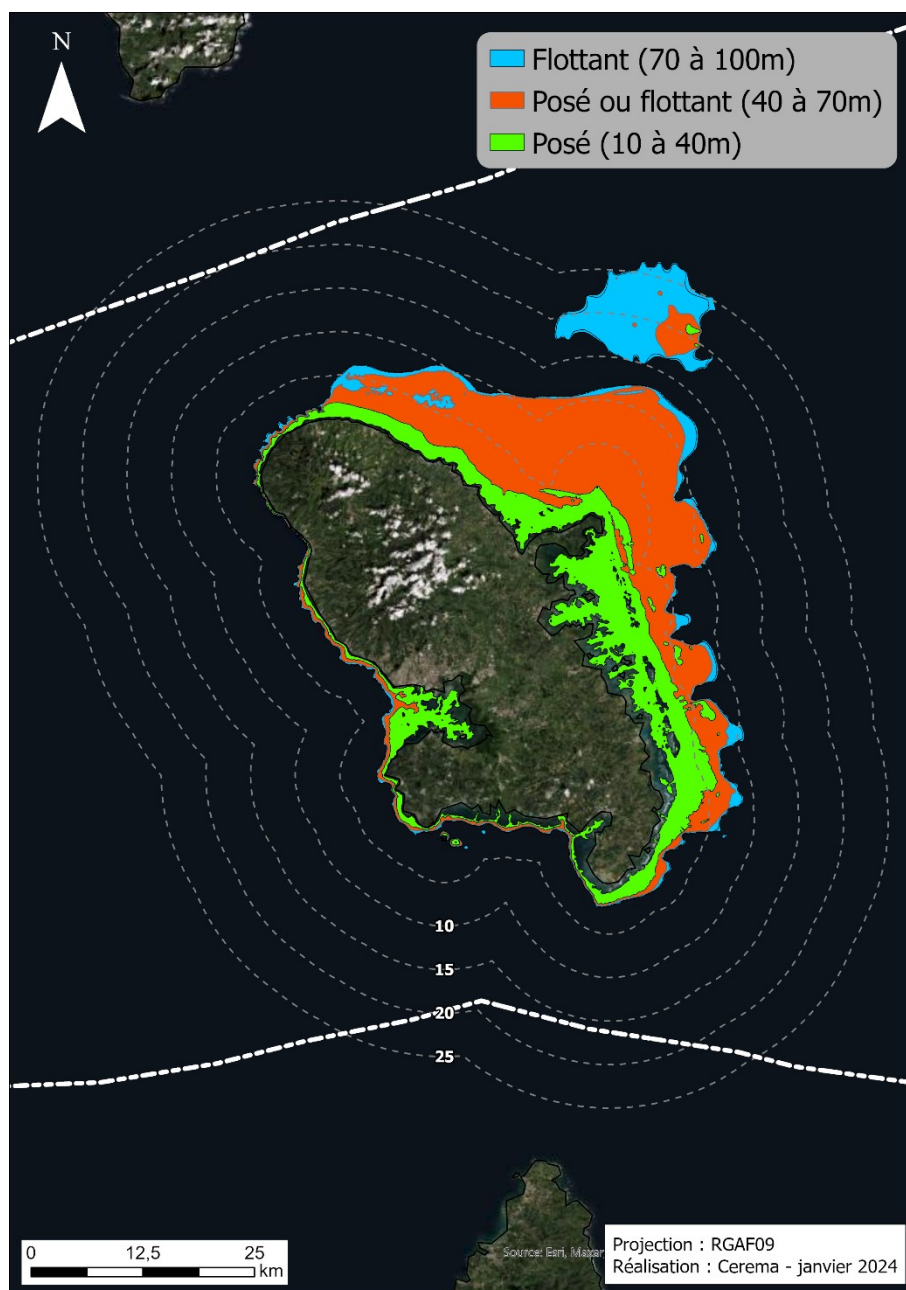


Figure 27 Potentiel technique de l'éolien posé et flottant pour une profondeur inférieure à 100m

Les zones de potentiel dont la profondeur est inférieure à 70 m sont concentrées dans une bande très proche de la côte Est, et quasi-intégralement à moins de 10 km du littoral.

A titre d'illustration, voici les distances à la côte des premiers projets français :

- Courseulles-sur mer : 10 km
- Dunkerque : 10 km
- Saint Nazaire : 12 km
- Fécamp : 12 km
- Dieppe-Le Tréport : 15.5 km
- Saint Brieuc : 16 km

Il n'existe toutefois pas de limite technique ou réglementaire imposant une distance minimale à la côte.

2.1.2.4.1 Eolien posé

Le potentiel technique de l'éolien posé jusqu'à 40 m est concentré dans une bande d'environ 300 km² très proche de la côte, à quelques kilomètres du littoral.

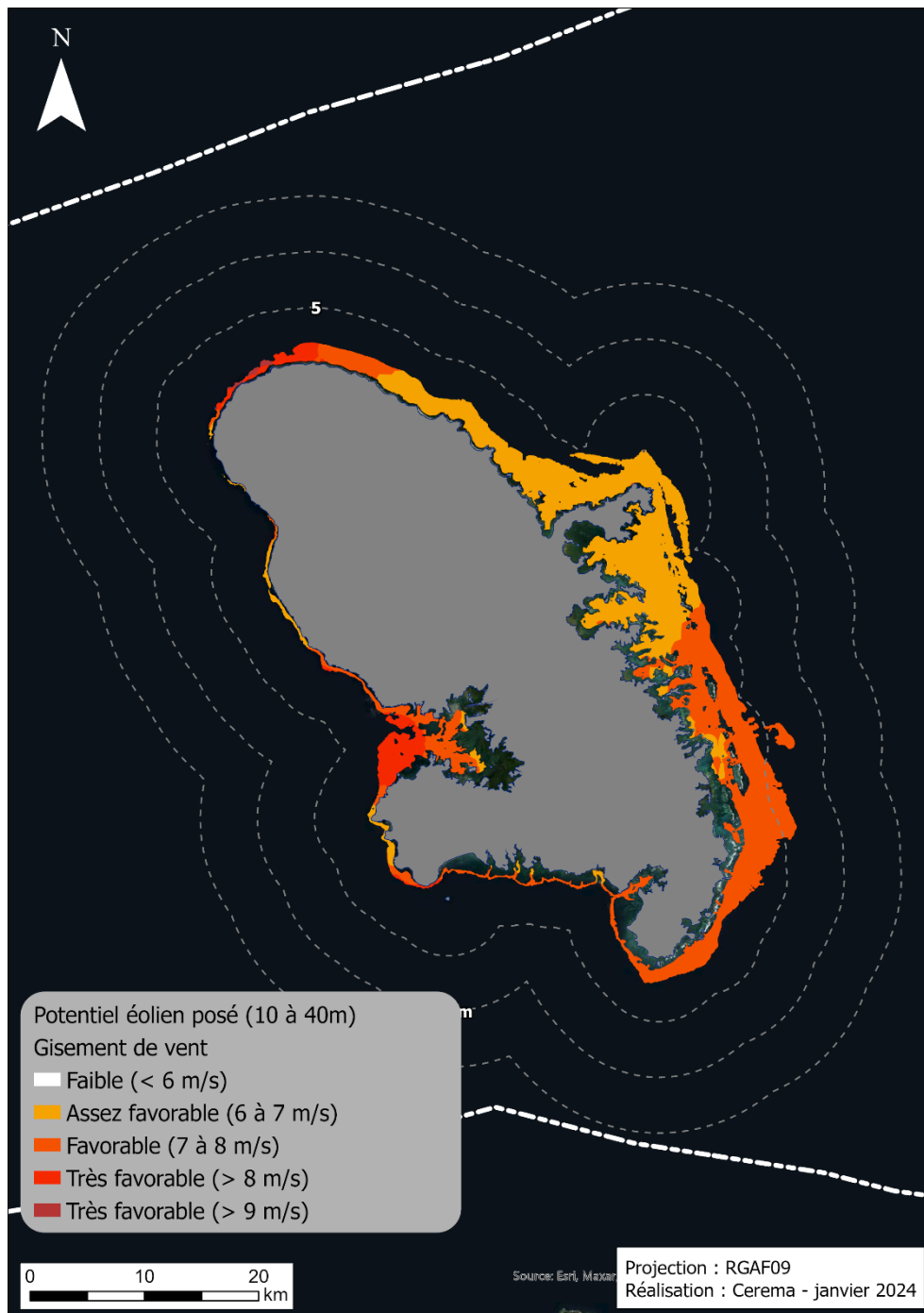


Figure 28 Potentiel technique de l'éolien posé et caractérisation du vent

Vitesse de vent	<6,5	<7	<7,5	<8	<8,5	<9	<9,5	<10	
Surface (km ²)	22	135	120	31	17	6	1	-	332 km ²

2.1.2.4.2 Éolien posé ou flottant

Le potentiel technique de l'éolien posé ou flottant (40 à 70 m) est concentré sur le plateau et un banc au Nord-Est de l'île pour une surface totale de 550 km². L'ensemble du potentiel est très proche de la côte, à moins de 16 km du littoral. Sur la côte Ouest jusqu'au Sud, une bande d'une largeur inférieure à 500 m se dessine et représente environ 22 km².

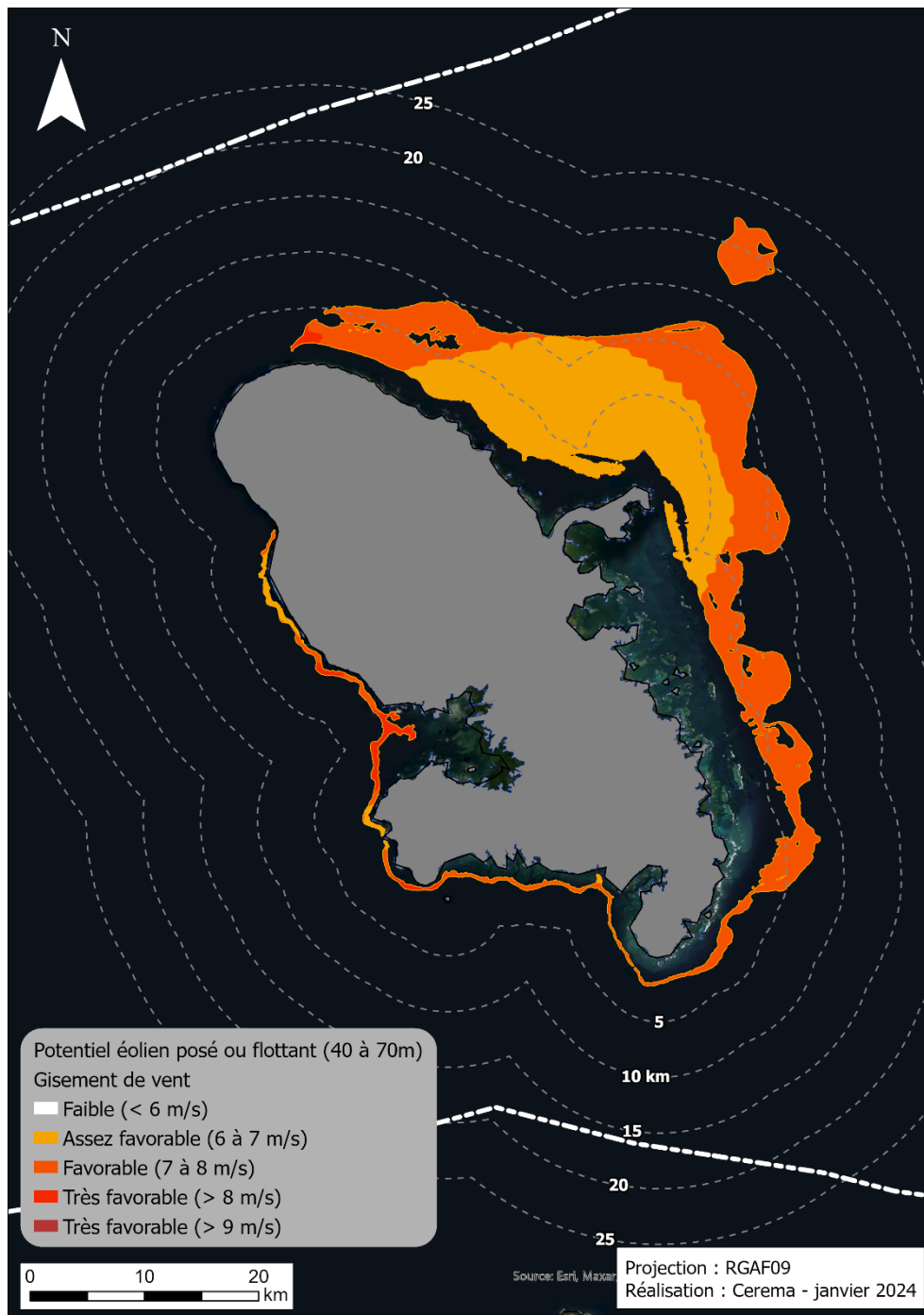


Figure 29 Potentiel technique de l'éolien posé ou flottant et caractérisation du vent

Vitesse de vent	<6,5	<7	<7,5	<8	<8,5	<9	<9,5	<10	
Surface (km ²)	2	250	265	21	8	2	-	-	548 km ²

2.1.2.4.3 Eolien flottant

Le potentiel technique de l'éolien flottant (70 à 100 m) est concentré sur une bande très étroite marquant le début du talus continental, et au Nord-Est sur un banc pour une surface d'environ 110 km². La réalité de ce potentiel suppose donc que la faisabilité du raccordement soit confirmée, ou qu'un autre vecteur d'énergie soit envisagé.

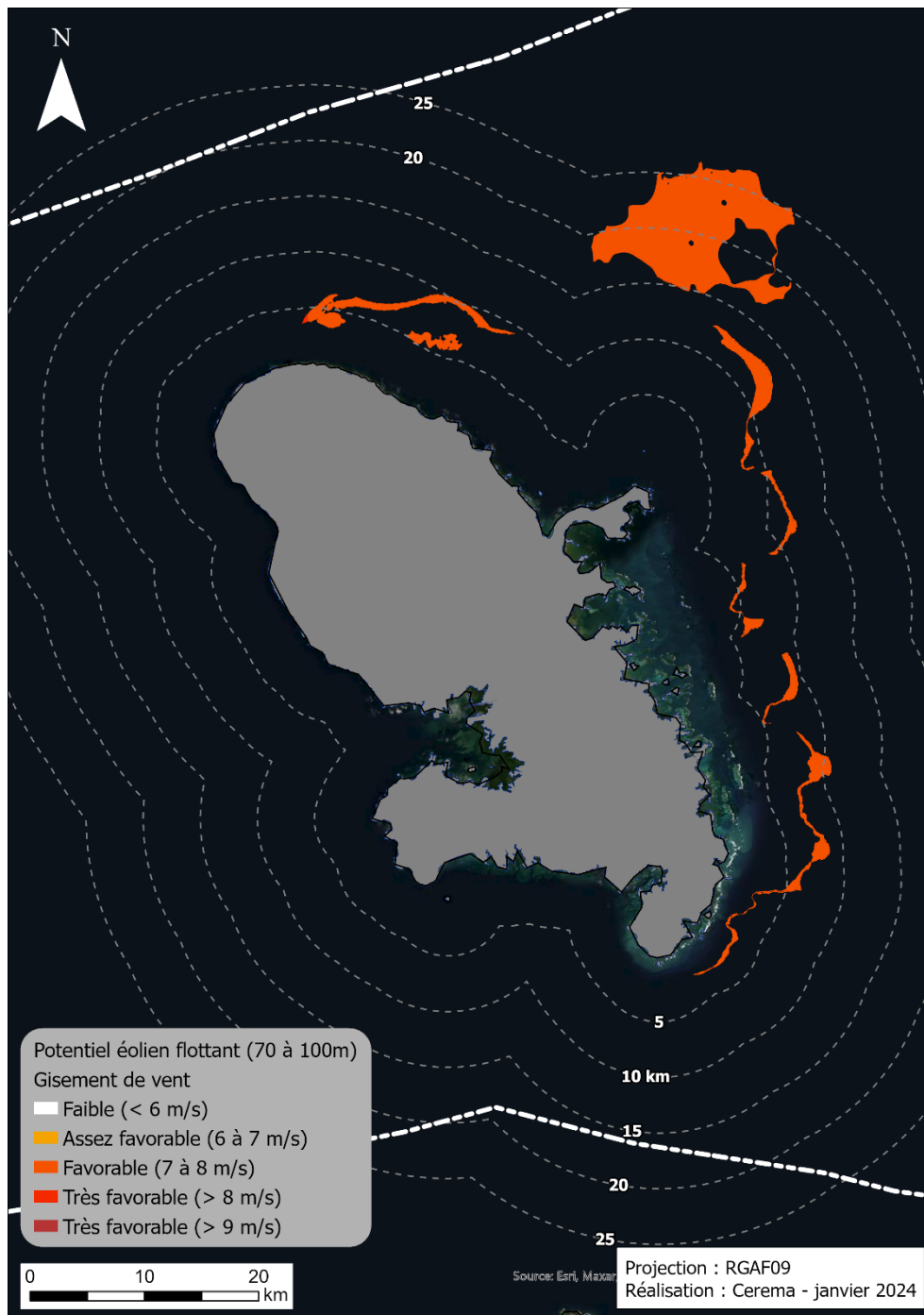


Figure 30 Potentiel technique de l'éolien flottant jusqu'à 100 m de profondeur et caractérisation du vent

Vitesse de vent	<6	<6,5	<7	<7,5	<8	<8,5	<9	<9,5	<10	
Surface (km ²)	-	-	-	157	8	0.2	-	-	-	165 km ²

2.1.2.5 Potentiel éolien flottant au-delà de 100 m de profondeur

Le potentiel technique de l'éolien flottant (100 à 1 000 m) est concentré sur la façade Est du Nord au Sud, sur une bande comprise entre 5 et 35 km du littoral, au-delà du plateau continental. La réalité de ce potentiel suppose donc que la faisabilité du raccordement soit confirmée, ou qu'un autre vecteur d'énergie soit envisagé.

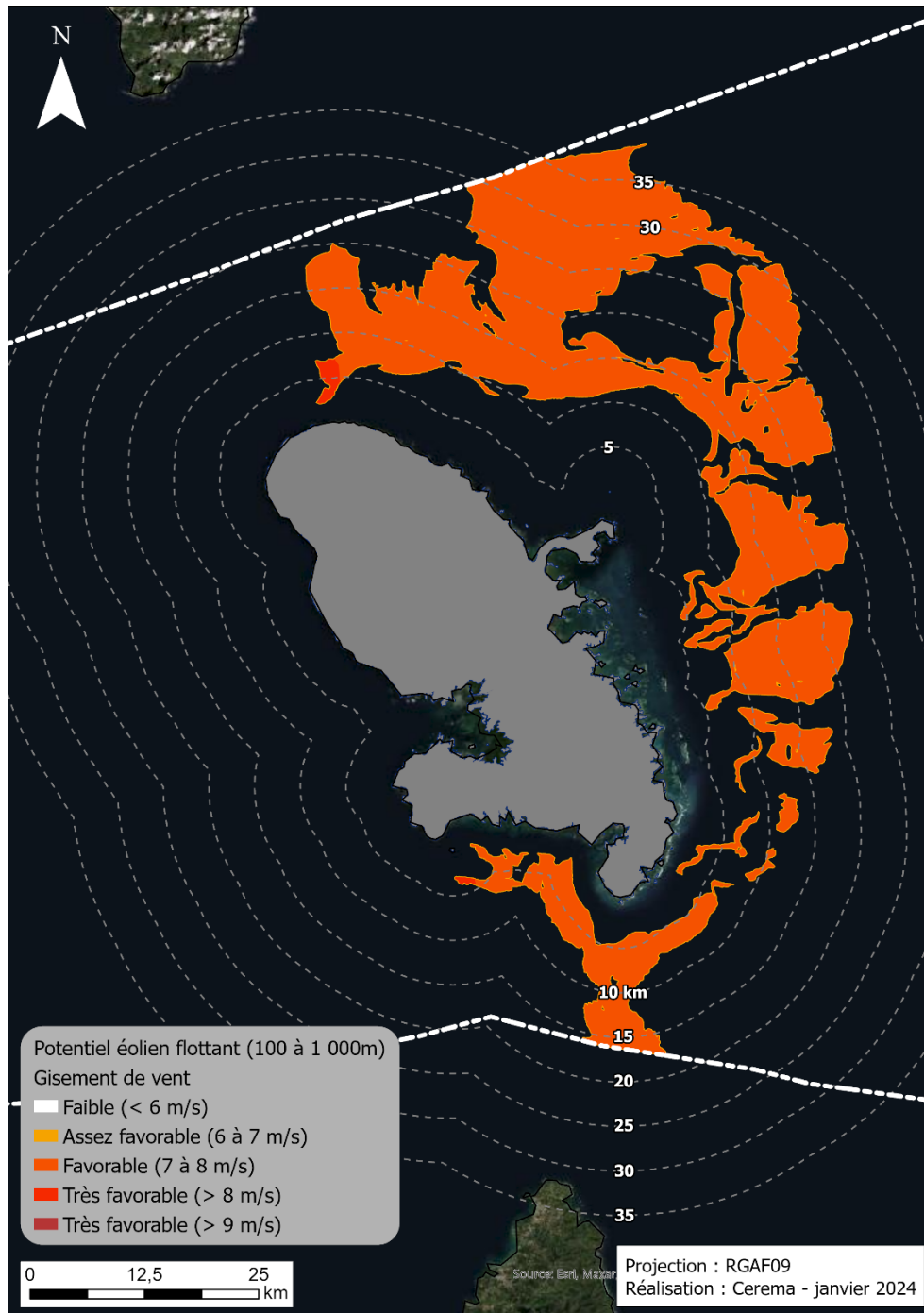


Figure 31 Potentiel technique de l'éolien flottant au-delà de 100 m de profondeur et caractérisation du vent

Vitesse de vent	<6	<6,5	<7	<7,5	<8	<8,5	<9	<9,5	<10	
Surface (km²)	-	-	-	1 060	242	9	0.5	-	-	1 311 km²

2.1.2.6 Densité énergétique

La densité énergétique, qui s'exprime en MW/km², permet de convertir les surfaces identifiées (km²) en potentiel de puissance électrique (W).

Si la puissance unitaire des éoliennes en mer est de plus en plus importante, elle implique cependant un diamètre de rotor plus grand et une augmentation proportionnelle de l'espacement des turbines en raison de l'effet de sillage qui réduit la vitesse du vent et augmente les turbulences à proximité des éoliennes voisines. L'espacement inter-éolien est variable, mais à titre d'illustration nous pouvons considérer qu'il représente une distance environ équivalente à 7 fois le diamètre du rotor de l'éolienne. Ainsi les évolutions technologiques liées à la puissance unitaire des turbines n'auront pas d'impact fort sur la densité.

Une étude de 2018 commandée par l'Agence fédérale maritime et hydrographique d'Allemagne³¹ analyse les hypothèses de densité (Capacity density assumptions) formulées dans des études de potentiel de l'éolien en mer et pour sa planification. Il en ressort que les hypothèses se situent entre 5 et 5,4 MW/km² en Europe pour de l'éolien posé.

Tableau 8 - Liste des études sur la densité énergétique analysées par le projet Baltic LINes - 2018

Etude	Année de l'étude	Région étudiée	Année cible	Espacement inter-éolien D = diamètre du rotor	Densité énergétique
BVG Associates et Geospatial Enterprises pour WindEurope ³²	2017	Europe	2030	9D x 6D	5,36 MW/km ²
Müller et al. - Ecofys 2017 ³³	2017	Europe	2045	n/a	5 MW/km ²
Danish Energy Agency ENS	2017	Danemark	2050	n/a	5,4 MW/km ²
U.S. Department of Energy – NREL 2016 ³⁴	2016	Etats-Unis	2016	7D x 7D	3 MW/km ²

Une étude néerlandaise³⁵ a calculé la densité optimale pour une zone de 360 km² et a conclu à une densité de 4,66 MW/km² pour une turbine de 10 MW, et de 5,06 MW/km² pour une turbine de 15 MW. Une étude danoise récente³⁶ a utilisé une densité de 4,55 MW/km² pour des turbines de 15 MW.

Dans une analyse de 2021³⁷ France Energie Eolienne et le Syndicat des énergies renouvelables utilisent une densité de 5 MW/km². Le programme WBG-ESMAP de la Banque mondiale utilise une densité de 3 MW/km² pour une vitesse de vent de 7 à 8 m/s, et une densité de 4 MW/km² pour une vitesse de vent supérieure à 8 m/s. Le ministère de l'énergie des Etats-Unis avait utilisé une densité de 5 MW/km² en 2010, puis l'a réévalué à 3 MW/km² en 2016.

Cette densité augmente au fur et à mesure de l'identification précise des zones. L'étude du projet Baltic LINes de 2018, qui a analysé 43 parcs éoliens en mer mis en service entre 1995 et 2019 dans cinq pays (Belgique, Pays-Bas, Danemark, Allemagne, Royaume-Uni), montre que la densité énergétique

³¹ Borrmann, R. ; Rehfeldt, K. ; Wallasch, A.K. ; Lüers, S. ; (Deutsche WindGuard GmbH pour Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) : « Capacity densities of European offshore wind farms », mai 2018 - dans le cadre du projet Baltic LINes financé par le programme européen Interreg VB Région de la mer Baltique

³² Hundleby, G. ; Freeman, K. (BVG Associates pour WindEurope) : « Unleashing Europe's offshore wind potential – A new resource assessment », juin 2017.

³³ Müller, M. ; Haesen, E. ; Ramaekers, L. ; Verkaik, N. (Ecofys pour TenneT et Energinet.dk) : « Translate COP21 – 2045 outlook and implication for offshore wind in the North Seas », juillet 2017.

³⁴ Musial, W. ; Heimiller, D. ; Breiter, P. ; Scott, G. ; Draxl, C. (National Renewable Energy Laboratory) : « Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States », septembre 2016.

³⁵ Bulder, B.H. ; Bot, E.T.G. ; Bedon, G. ; (Energieonderzoek Centrum Nederland pour TNO) : « Optimal wind farm power density analysis for future offshore wind farms », 2018

³⁶ COWI pour l'Agence danoise de l'énergie : « Finscreening af havarealer til etablering af nye havmølleparker med direkte forbindelse til land », mai 2020

³⁷ France Energie Eolienne et le Syndicat des énergies renouvelables : « Éolien en mer : 5 propositions pour atteindre 50 GW en 2050 », décembre 2021

réelle est proche de l'hypothèse avec une valeur moyenne de 6 MW/km² en mer du Nord et de 5,5 MW/km² pour la mer Baltique.

Cependant, cette moyenne ne doit pas masquer la grande diversité des valeurs, comprises entre 3,1 MW/km² (DanTysk, Danemark) et 18,7 MW/km² (Nordergünde, Allemagne).

A titre d'illustration, la densité du projet Centre-Manche 1 de 1 GW sera d'environ 5,5 MW/km². Le parc éolien en mer de Saint-Nazaire, premier parc commercial français à entrer en exploitation (2022), a une densité énergétique d'environ 6 MW/km². Lors d'échanges avec le Cerema, France Energie Eolienne (devenu France renouvelables) a considéré que la densité maximale sur les zones d'emprise finale des parcs doit être de 8 MW/km².

On peut aussi noter que la ferme pilote flottante « Provence Grand Large » présente une densité très élevée de 30,8 MW/km² (24 MW dans 0,78km²). Elle s'explique par la disposition des 3 turbines en 1 seule rangée et par la technologie d'ancrage par lignes tendues (TLP) qui limite fortement l'emprise de chaque flotteur. Les deux autres fermes pilotes en Méditerranée ont une densité de 4,9 et 3,7 MW/km². Le parc de 6 éoliennes flottantes de Kincardine en Ecosse présente une densité d'environ 2 MW/km².

Ainsi, une densité de 5 MW/km² a été retenue pour cette étude à large échelle.

2.1.3 Synthèse du potentiel technique de l'éolien en mer

Tableau 9 Synthèse du potentiel technique estimé de l'éolien en mer à la Martinique par technologie

	Technologie	Bathymétrie	Vent	Surface de potentiel (km ²)	Puissance (MW) (Densité 5 MW/km ²)	
1	Eolien posé	- 10 m - 40 m	Assez favorable	157 km ²	785 MW	1,66 GW
			Favorable	151 km ²	755 MW	
			Très favorable	24 km ²	120 MW	
2	Eolien posé ou flottant	- 40 m - 70 m	Assez favorable	252 km ²	1 260 MW	2,74 GW
			Favorable	286 km ²	1 430 MW	
			Très favorable	10 km ²	50 MW	
3	Eolien flottant jusqu'à 100 m	- 70 m - 100 m	Assez favorable	-	-	0,825 GW
			Favorable	165 km ²	825 MW	
			Très favorable	-	-	
4	Eolien flottant au-delà de 100 m	- 100 m - 1 000 m	Assez favorable	-	-	6,55 GW
			Favorable	1 301 km ²	6 505 MW	
			Très favorable	9 km ²	45 MW	

Tableau 10 Synthèse du potentiel technique estimé de l'éolien en mer à la Martinique en fonction du vent

Vitesse moyenne du vent	Surface de potentiel (km ²)	Puissance (MW) (Densité 5 MW/km ²)
Assez favorable (6 à 7 m/s)	409 km ²	2 GW
Favorable (7 à 8 m/s)	1 903 km ²	9,6 GW
Très favorable (> 8 m/s)	43 km ²	0,2 GW
		11,8 GW

2.1.4 Distance minimale à la côte

Comme indiqué ci-avant, il n'existe pas de limite technique ou réglementaire imposant une distance minimale à la côte. Dans le contexte de la Martinique, ce paramètre aura cependant un impact très significatif sur le potentiel technique.

A titre informatif, voici le potentiel identifié en fonction d'une éventuelle distance minimale à la côte.

2.1.4.1 Distance minimale de 5 km à la côte

Avec une distance minimale à la côte de 5 km, la zone de potentiel technique de l'éolien posé n'est plus que de 11 km² environ sur les 332 km² identifiés, soit une réduction de 97%. Pour la zone commune « posé ou flottant », la surface est réduite à 326 km² (1,6 GW), soit une réduction de 41%.

L'impact sur le potentiel de l'éolien flottant est très limité à cette distance, avec une réduction de 4% seulement.

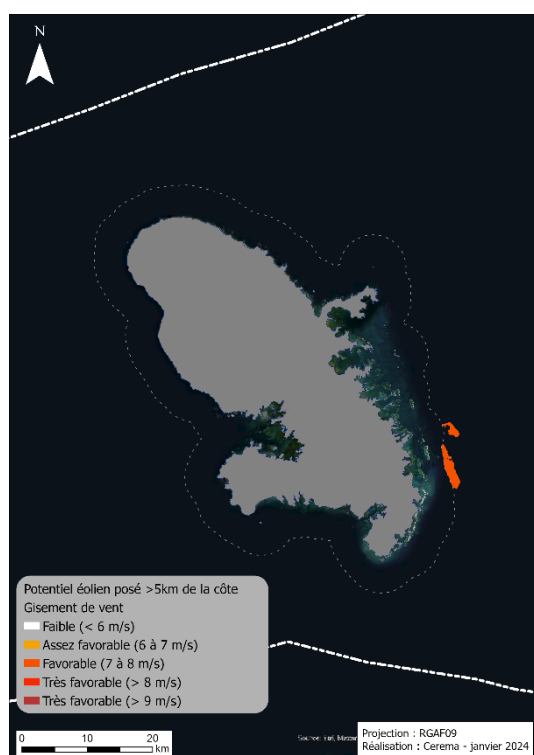


Figure 32 Potentiel technique de l'éolien posé situé à plus de 5 km de la côte

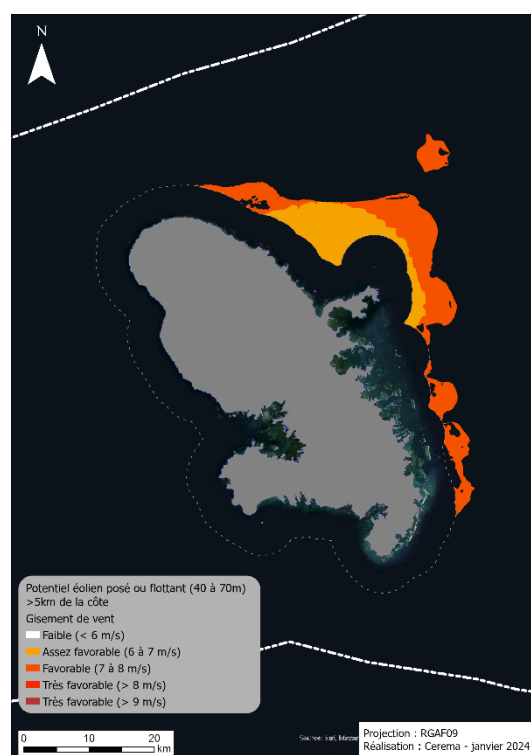


Figure 33 Potentiel technique de l'éolien posé ou flottant situé à plus de 5 km de la côte

2.1.4.2 Distance minimale de 10 km à la côte

A une distance minimale à la côte de 10 km, il n'y a plus de potentiel pour de l'éolien posé à une profondeur inférieure à 40 m. Pour la zone commune « posé ou flottant », la surface est réduite à 57 km², soit une réduction de 90%.

La zone de potentiel technique de l'éolien flottant se situe intégralement au-delà du plateau continental, sur une surface de 1 114 km² (5,6 GW), soit une réduction d'environ 25% par rapport à l'absence de limite de distance.

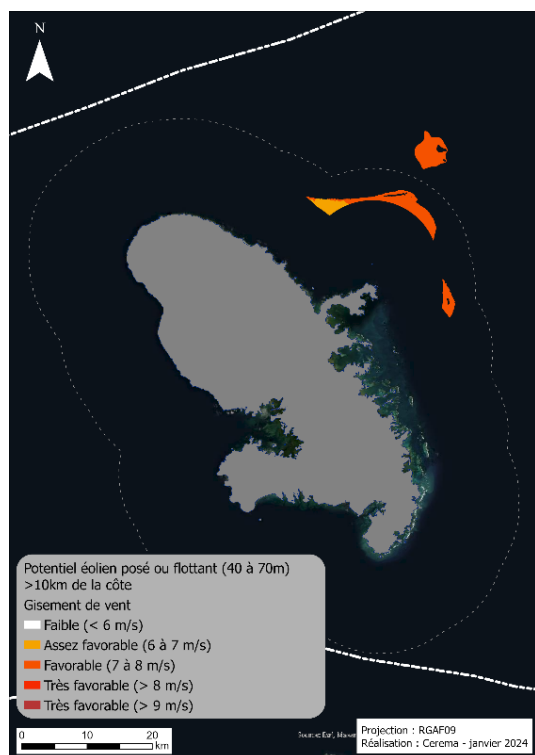


Figure 34 Potentiel technique de l'éolien posé ou flottant (40 à 70 m) situé à plus de 10 km de la côte

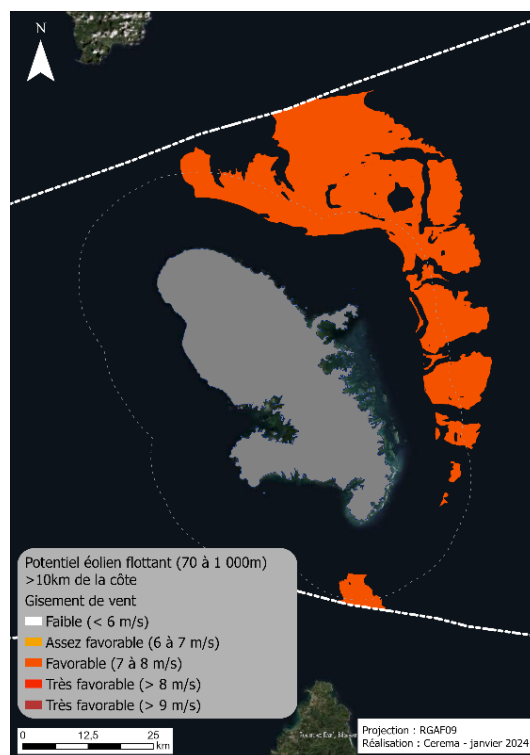


Figure 35 Potentiel technique de l'éolien flottant (70 à 1 000m) situé à plus de 10 km de la côte

2.1.4.3 Distance minimale de 15 km à la côte

A une distance minimale à la côte de 15 km, la zone de potentiel technique de l'éolien flottant se situe intégralement au-delà du plateau continental, sur une surface de 914 km² (4,6 GW), soit une réduction d'environ 40% par rapport à l'absence de limite de distance.

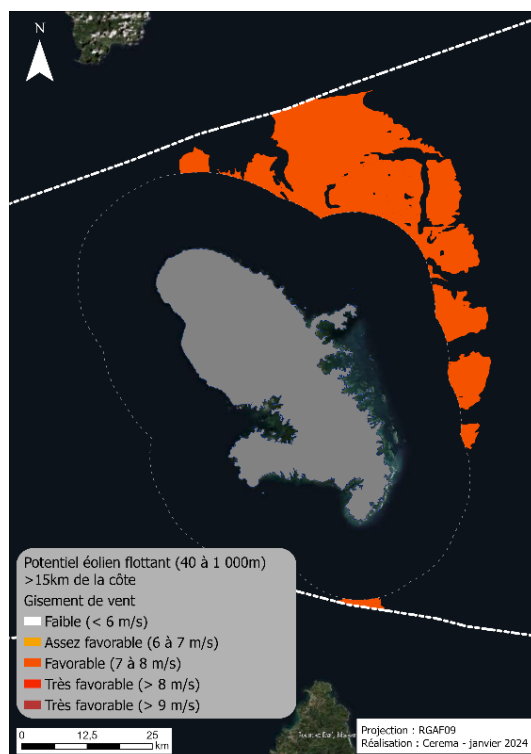


Figure 36 Potentiel technique de l'éolien flottant (40 à 1 000m) situé à plus de 15 km de la côte

2.2 Potentiel hydrolien

2.2.1 Paramètres d'évaluation

La **vitesse du courant** constitue une donnée quantitative qui va conditionner la puissance fournie par une hydrolienne : $P = \frac{1}{2} \rho \times C_p \times S \times V^3$ où :

- ρ = masse volumique de l'eau, soit 1 025 kg/m³, variable dans de faibles proportions selon la salinité, les éléments en suspension dans l'eau... ;
- C_p = coefficient de puissance hydrodynamique, limité à 59 % par la loi de Betz et qui désigne le rendement maximal d'une turbine donnée ;
- S = surface balayée par rotor ($S = \pi \times \text{Diamètre}^2/4$) en m² ;
- V = vitesse du courant (m/s).

Pour une machine donnée, immergée sur une zone précise, seule la vitesse du courant varie de manière significative et agit sur la puissance délivrée selon le cube de sa valeur. Aussi dès que la vitesse augmente, la puissance augmente très fortement, d'où l'importance capitale de ce paramètre.

En 2013, le Cerema a produit une analyse pour la définition du potentiel hydrolien en France métropolitaine et la planification des zones propices au développement de fermes de démonstration pré-commerciale. Le Syndicat des Énergies Renouvelables (SER) avait alors été sollicité pour définir les critères technico-économiques. Ces critères concernent la bathymétrie, la vitesse de courant, la surface des sites et les limites de la zone d'étude.

Tableau 11 Critères technico-économiques pour l'installation d'hydroliennes fournis par le Syndicat des Énergies Renouvelables au Cerema en 2011

Critères	Favorable	Assez favorable	Défavorable
Vitesse mini par coeff 95 à la surface	> 2,5 m/s	> 1.5 m/s	< 1,5 m/s
Vitesse maxi par coeff 95 à la surface	<= 4,5 m/s	< 2.5 m/s	
Profondeur mini	> 30 m		< 25 m
Pente sol	< 10°	25 m < H < 30 m	
Superficie du site	> 1 km ²		

Le NREL retient un minimum de 0,5 kW/m équivalent à environ 1 m/s, et une cible à 2 kW/m, équivalent à environ 1,6 m/s³⁸,

2.2.2 Application à la zone d'étude

Dans le cadre du projet Carib-Coast³⁹, le BRGM, l'Ifremer et Actimar ont réalisé une simulation de la circulation régionale et de la qualité de l'eau autour des îles de la Martinique et de la Guadeloupe. Le rapport⁴⁰ précise que :

- **les courants de marée sont très faibles**, de l'ordre de 0,1 m/s en moyenne avec des maxima dépassant légèrement 0,3 m/s localement.
- **les courants en surface ont des vitesses moyennes entre 0,5 et 0,6 m/s** en général. Côté Atlantique, le courant de surface est orienté principalement du Sud vers le Nord. Il se divise au

³⁸ Kilcher, L.; Thresher, R.; Tinnensand, H ; « Marine Hydrokinetic Energy Site Identification and Ranking Methodology Part II: Tidal Energy ». NREL/TP-5000-66079. National Renewable Energy Laboratory (NREL), octobre 2016

³⁹ <https://www.carib-coast.com/>

⁴⁰ https://www.carib-coast.com/wp-content/uploads/2022/10/Actimar-RED1693-Tache3-RapportFinal_v1.1.pdf

Sud de l'île, où une branche orientée vers le Nord-Ouest atteint des vitesses comparables à celles de la branche principale. Au Nord de l'île le courant est très faible, l'intrusion d'eau Atlantique vers la mer des Caraïbes se fait plus au large de l'île, plus proche des côtes de la Dominique.

- le courant en profondeur est relativement semblable au courant de surface, avec une atténuation régulière de la vitesse. Le courant Sud-Nord côté Atlantique s'atténue autour de 100 m de fond, avant de réapparaître avec des vitesses relativement élevées autour de 400 à 500 m de fond.

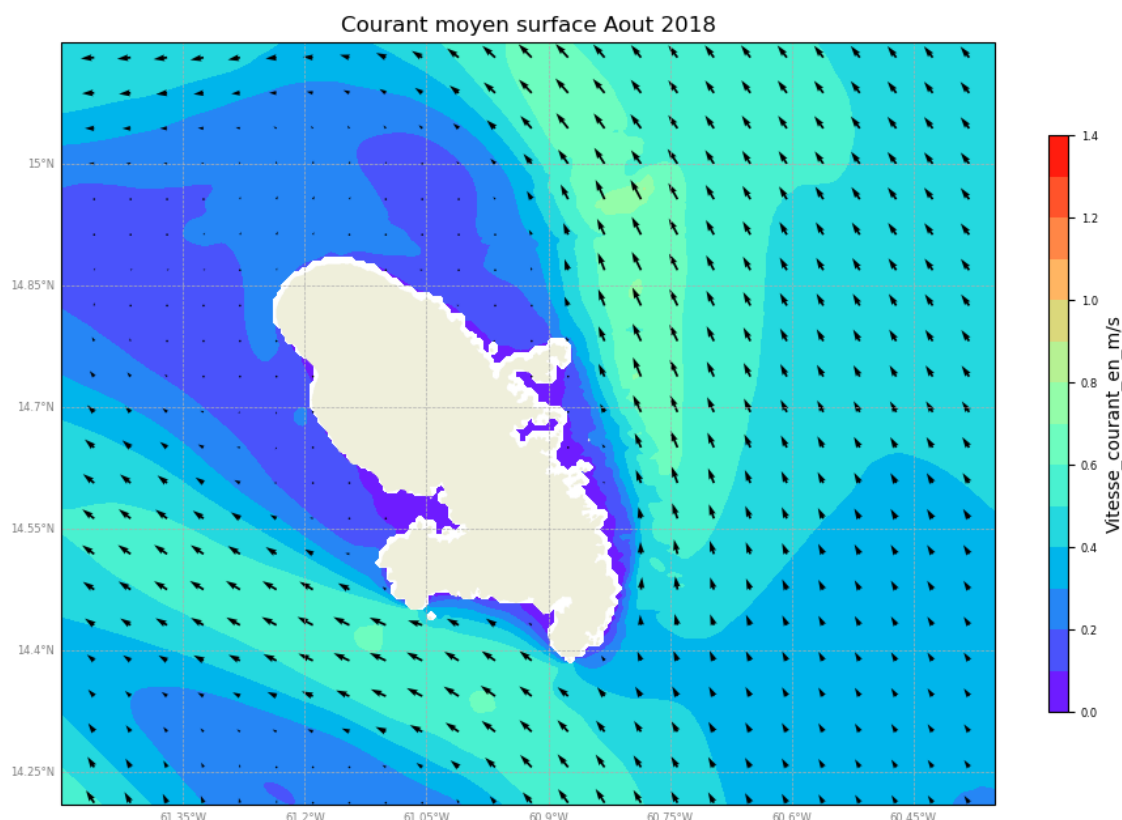


Figure 37 Moyenne du courant de surface à la Martinique sur la période du 1er au 31 Août 2018 – Carib-Coast

Le BRGM a également commandé une campagne de mesures des courants marins sur six sites à la Martinique, qui s'est déroulée entre août et décembre 2020.



Figure 38 : Emplacement des points de mesure des courants marins à la Martinique – Etude Carib-Coast

Une comparaison des données de courant observées sur chacun des 6 sites de mesure est faite dans le tableau présenté ci-après.

Tableau 12 : Martinique – Comparaison vitesse/direction sur 3 couches représentatives de la colonne d'eau sur les 6 sites de mesure (Source : Carib-Coast)

Sites	Courant en proche surface		Courant centre colonne d'eau		Courant près du fond	
	Vitesse moyenne	Direction principale	Vitesse moyenne	Direction principale	Vitesse moyenne	Direction principale
Pariadis	0,23 m/s	N-NNE	0,19 m/s	N-NNE	0,15 m/s	NNE
Caravelle	0,28 m/s	NNW-N	0,23 m/s	NNW-N	0,19 m/s	NW
Basse-Pointe	0,16 m/s	WNW-NW	0,14 m/s	ESE-SE	0,12 m/s	ESE-SE
Céron	0,26 m/s	NNE-NE	0,21 m/s	NNE-NE	0,10 m/s	SW
Fort De France	0,09 m/s	SSE	0,12 m/s	SE	0,28 m/s	WNW
Enfer	0,23 m/s	WSW-W	0,19 m/s	WSW-W	0,14 m/s	WSW-W

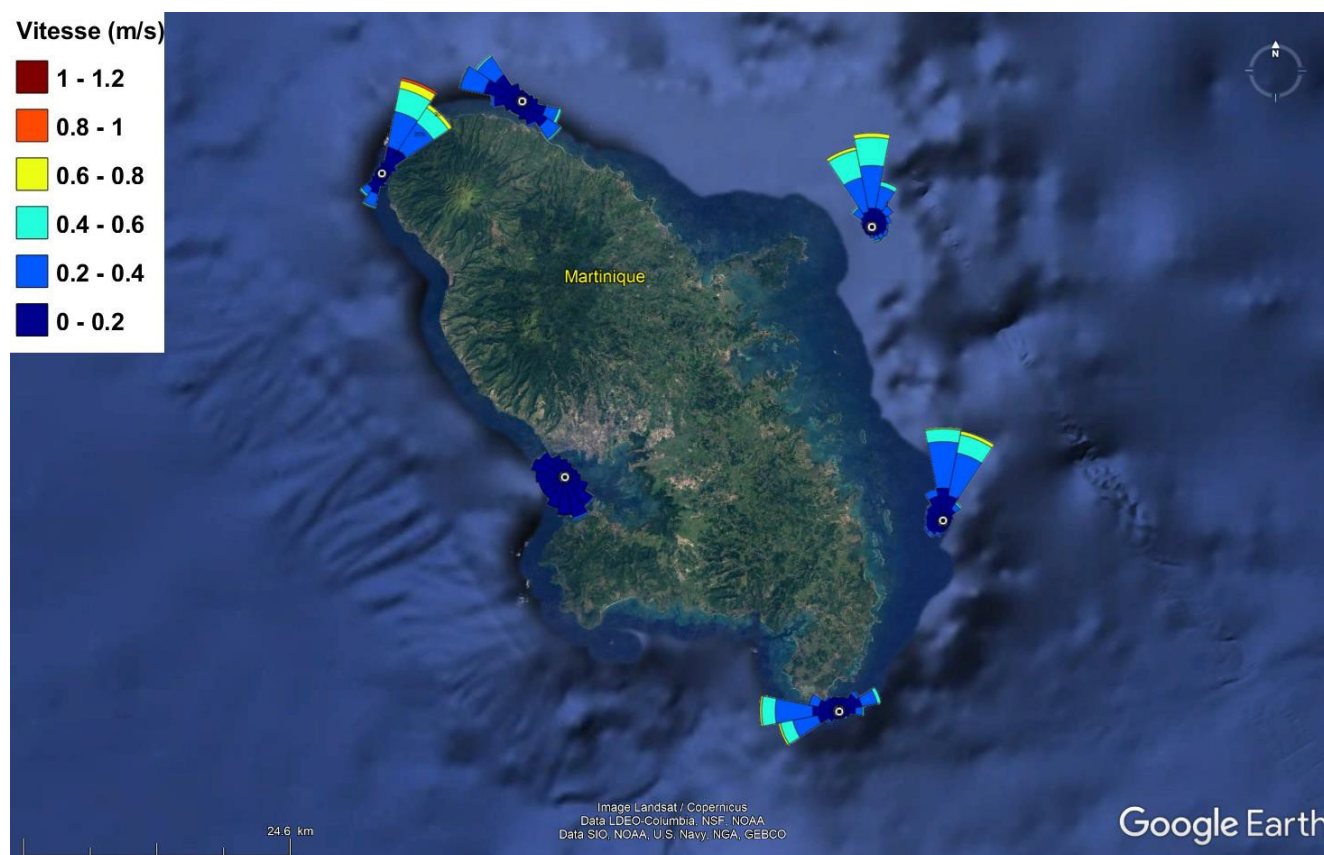


Figure 39 : Martinique – Roses directionnelles du courant en proche surface – Carib-Coast

En conclusion, puisque la vitesse moyenne du courant autour de la Martinique reste bien en deçà du seuil inférieur de 1,5 m/s, il convient de considérer qu'il n'existe pas de potentiel pour la filière hydrolienne.

2.3 Potentiel houlomoteur

2.3.1 Paramètres d'évaluation

2.3.1.1 Puissance de houle

Le potentiel houlomoteur d'un site est caractérisé par la puissance maximale théorique qui peut être récupérée sur le site en fonction des systèmes houlomoteurs retenus et de leurs caractéristiques⁴¹. Il est quantifié à l'aide du flux linéique ou **niveau de puissance de houle** (i.e. niveau de puissance par unité de largeur de crête de vague). Il s'exprime en kiloWatt par mètre linéaire (kW/ml).

L'évaluation du potentiel des sites repose sur des formules simplifiées, telle que la suivante, sous l'hypothèse de grande profondeur d'eau au large (i.e. profondeur supposée infinie) :

$$P_{w1} = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} H_{m0}^2 \cdot T_e$$

Où

- ρ = masse volumique de l'eau
- g = gravité
- H_{m0} = hauteur significative spectrale de l'état de mer (m)
- T_e = période moyenne énergétique (s)

La puissance moyenne des vagues est donc **proportionnelle au carré de la hauteur** de la vague et à la période des vagues (durée qui sépare l'arrivée de deux crêtes de vagues successives). Les variations de la direction de la houle peuvent être négligées pour certains systèmes mais ce paramètre est utile si la réponse du système houlomoteur dépend de la direction des vagues.

La puissance moyenne annuelle récupérable sur une infrastructure (kW) est le produit de la longueur équipée par la puissance transportée par les vagues (kW/ml). Pour obtenir la puissance produite, il faut encore multiplier par le rendement du dispositif : coefficient de conversion et facteur de charge.

Dans une analyse couvrant la France métropolitaine en 2012, le Cerema avait ciblé, en concertation avec les parties prenantes, une puissance linéaire moyenne annuelle de la houle supérieure à 20 kW/ml. En 2007, l'étude sur les Régions Ultra Périphériques considérait déjà qu'un fort potentiel devait dépasser 20 kW/ml.

Comme le rappelle le SREMER de La Réunion, il n'existe pas vraiment de valeurs seuils « figées dans le marbre » pour l'exploitation de l'énergie de la houle. Trois gammes sont actuellement communément admises par la communauté scientifique⁴² :

- **Limite basse : > 5 kW/ml** – zones qui pourraient devenir viables à long terme
- **Cible : 10-15 kW/ml** – valeur minimale acceptable pour les prochaines décennies
- **Idéal : 20-30 kW/ml** – permet d'implanter un prototype à échelle réelle

A titre de comparaison, l'Irena souligne que les zones les plus favorables dans le monde atteignent des niveaux de puissance entre 40 et 70 kW/m⁴³. Le programme de collaboration technologique Ocean Energy Systems (OES)⁴⁴, collaboration intergouvernementale liée à l'Agence Internationale de

⁴¹ « Systèmes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet » Cerema, 2020. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-427-2

⁴² Kilcher, L.; Thresher, R.; 2016. Marine Hydrokinetic Energy Site Identification and Ranking Methodology Part I: Wave Energy. NREL/TP-5000-66038. National Renewable Energy Laboratory (NREL)
<http://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66038.pdf>

⁴³ R. Kempener (IRENA), F. Neumann (IMIEU), Wave Energy, Technology Brief, IRENA, juin 2014

⁴⁴ Le programme de collaboration technologique OES est une collaboration intergouvernementale initiée en 2001 qui opère dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)

l'Energie, ciblait en 2017 les zones entre 15 et 75 kW/m⁴⁵. La même année, le GIEC⁴⁶ s'était basé sur une limite basse de 30 kW/ml (Sims, et al., 2007) puis en 2012 sur une limite basse de 5 kW/ml (Lewis, et al., 2011)⁴⁷.

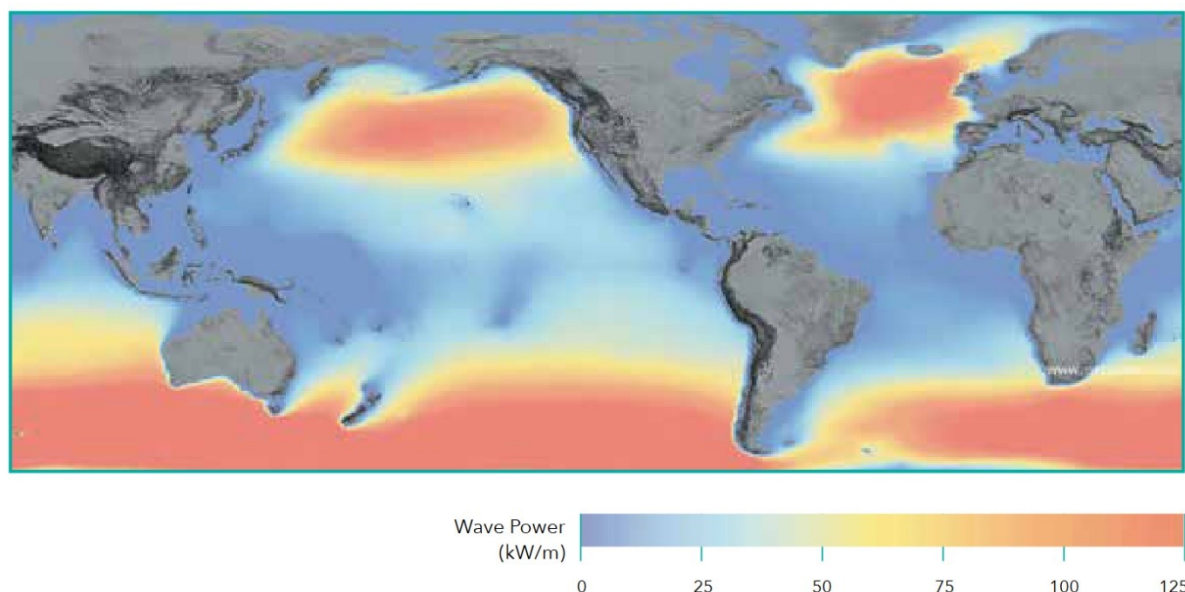


Figure 40 : Puissance moyenne annuelle de la houle dans le monde (Source IRENA)

Le long des côtes Ouest Européennes, les puissances moyennes atteignent facilement 50 kW/ml au large. Elles sont estimées entre 5 et 20 kW/ml au pied des ouvrages dans les zones propices aux systèmes bord à quai, car la houle est dissipée par déferlement bathymétrique ou bien est masquée par la présence de caps, pointes, îles ou récifs⁴⁸.

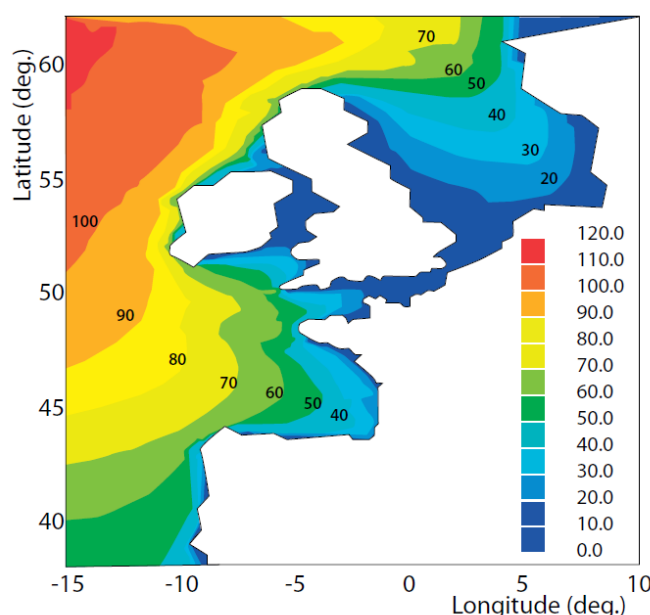


Figure 41 : Puissance moyenne annuelle de la houle le long des côtes Ouest Européennes en kW/m (Source Cerema)

⁴⁵ Huckerby, J., Jeffrey, H., de Andres, A. and Finlay, L., « An International Vision for Ocean Energy », Ocean Energy Systems, 2017

⁴⁶ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

⁴⁷ R. Kempener (IRENA), F. Neumann (IMIEU), Wave Energy, Technology Brief, IRENA, juin 2014

⁴⁸ Cerema, Systèmes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet, 2019
 Collection : Connaissances ISBN : 978-2-37180-427-2

2.3.1.2 Bathymétrie

Concernant la bathymétrie, le SREMER de La Réunion a retenu une profondeur entre 20 m et 120 m avec un seuil optimal de 50 m. L'étude martiniquaise de 2007 est basée sur une profondeur entre 10 et 150 m avec un seuil optimal à 60 m. Dans son étude de 2012, le Cerema avait ciblé une bathymétrie comprise entre 50 m et 130 m.

2.3.2 Application à la zone d'étude

La zone d'étude est ici définie par une bathymétrie comprise entre -20 et -130 m, avec une zone optimale entre -40 et -60 m.

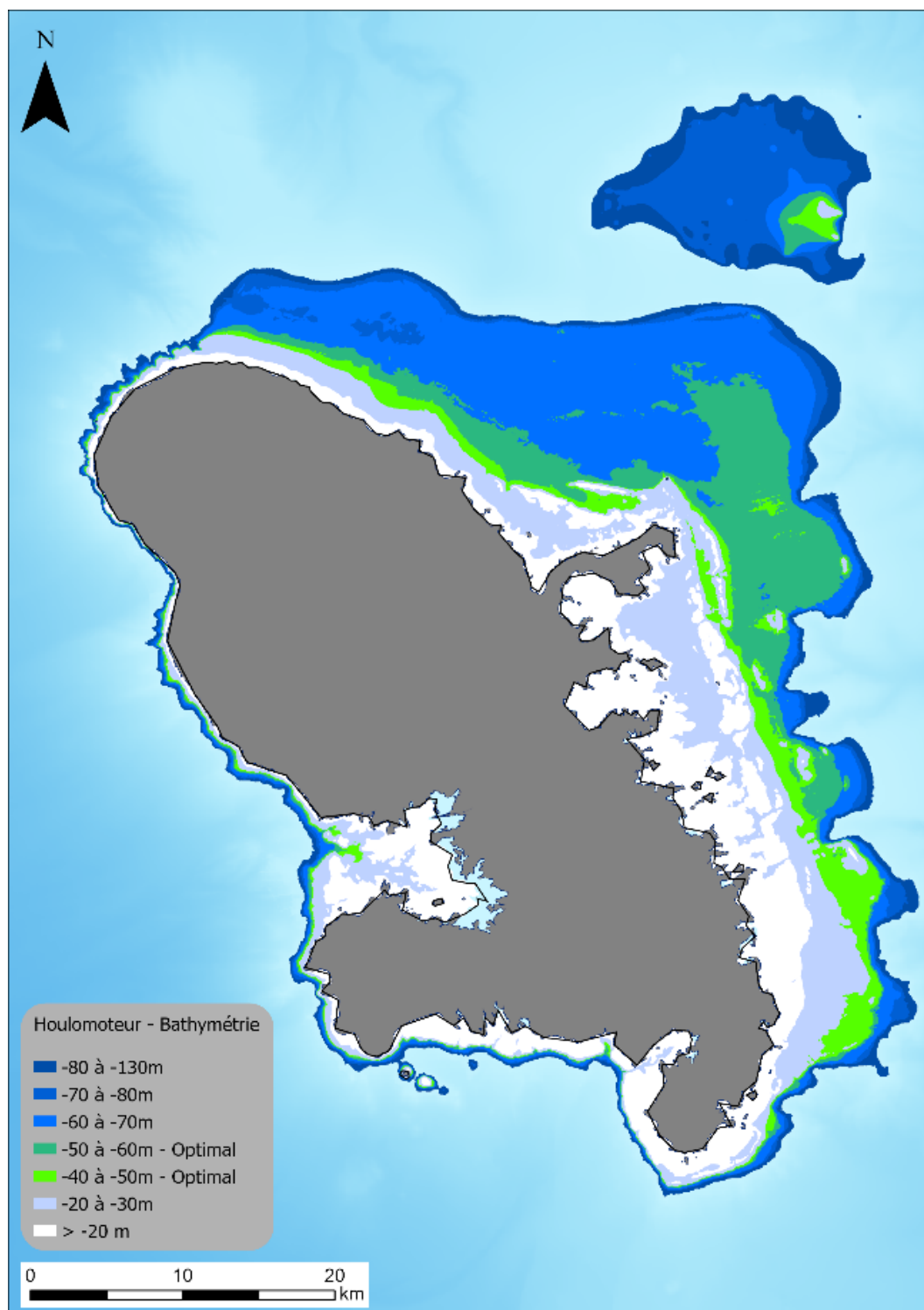


Figure 42 Zone d'étude – Bathymétrie comprise entre -20 et -130 m, avec une zone optimale entre -40 et -60 m.

2.3.2.1 Houlographes Candhis

Le Cerema est le gestionnaire de l'observatoire côtier national de mesure des états de mer, l'observatoire Candhis, qui regroupe une vingtaine de partenaires et comprend un réseau d'une quarantaine de bouées de mesure et un système d'information. Candhis dispose de 4 houlographes à la Martinique :

N° de campagne	Nom	Site	Profondeur	Distance à la côte	Partenariat	Capteur	Période de campagne
97201	Grand' Rivière	Nord	65m	1,5 Nq	Cerema Météo France Collectivité territoriale de Martinique	Directionnel Datawell DWR	04/1995 à 03/1997
97202	Basse Pointe	Nord	51m	1,2 Nq		Directionnel Houlographe Axys TriAxys	Depuis 12/1998 En cours
97204	Fort de France	Ouest	55m	1 Nq			Depuis 11/2001 En cours
97205	Sainte Lucie	Sud	86m	4 Nq			Depuis 06/2007 En cours

L'analyse des campagnes de mesures est diffusée sous forme de fiches synthétiques⁴⁹.

- H_{m0} estimation de la hauteur significative des vagues à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale.
- T_p période correspondant au maximum de la densité spectrale

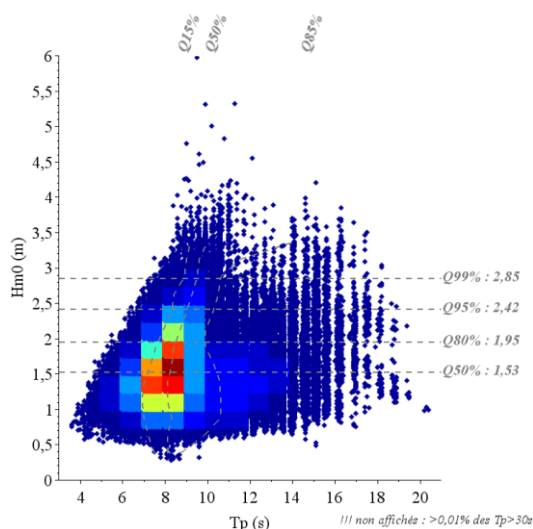


Figure 43 Houlographe de Basse pointe : climatologie moyenne annuelle (Source Candhis)

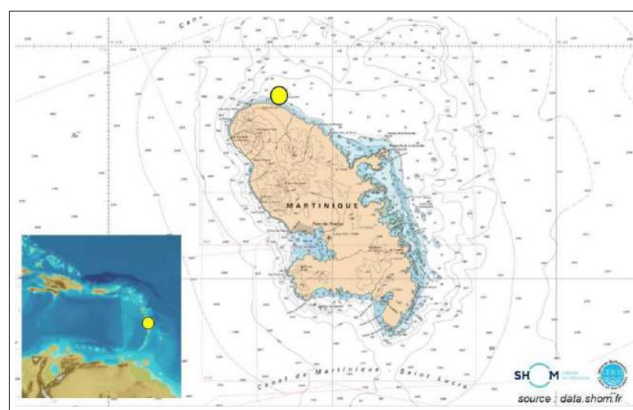
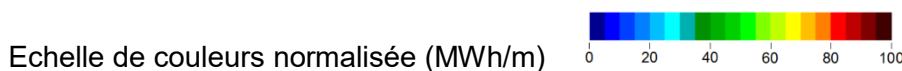


Figure 44 Houlographe de Basse pointe : localisation



⁴⁹ Kergadallan X., « Candhis : analyses 2023 des états de mer : Tome 3 - Outre-mer », Cerema, mai 2023
<https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/595396/candhis-analyses-2023-des-etats-de-mer-tome-3-outre-mer>

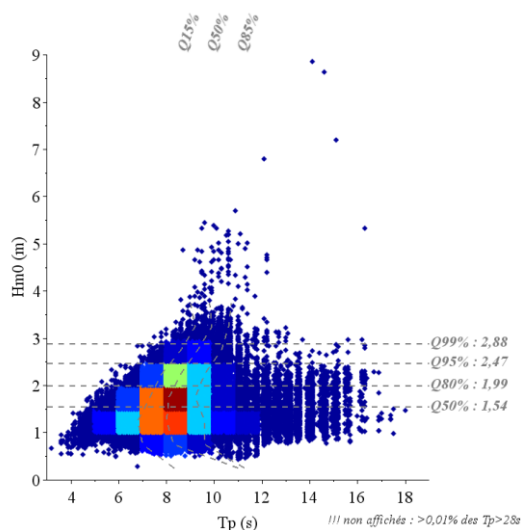


Figure 45 Houlographe de Sainte Lucie : climatologie moyenne annuelle (Source Candhis)

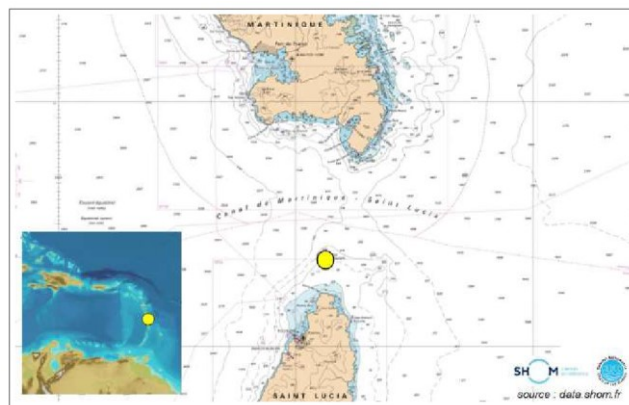


Figure 46 Houlographe de Sainte Lucie : localisation

2.3.2.2 Base de données ANEMOC

Les données de puissance de houle sont extraites de la base de données ANEMOC - « Atlas Numérique d'États de Mer Océaniques et Côtiers ». Le modèle ANEMOC Antilles est une base de données continue d'états de mer réalisée en 2015 par simulations rétrospectives. Elle couvre la période 1979 à 2010. Cette base est le fruit d'une collaboration entre le Cerema et EDF R&D-LNHE.⁵⁰

De manière générale on considère que l'erreur sur les données issues de la modélisation est de l'ordre de +/- 15%. Le calage de modèle étant effectué sur les événements courants, l'erreur peut être plus importante sur les extrêmes⁵¹.

Les données ponctuelles de la base ANEMOC ne couvrent pas toute la surface de la zone d'étude. Il est donc nécessaire de procéder à l'interpolation des valeurs pour passer une donnée dite « continue ». L'interpolation modélise les valeurs des cellules dans une image à partir d'un nombre limité de points d'échantillonnage. La méthode retenue est l'interpolation basée sur l'inverse de la distance. Elle évalue les valeurs des cellules en calculant la moyenne des valeurs des points d'échantillonnage dans le voisinage de chaque cellule de traitement. Plus un point est proche du centre de la cellule en cours d'analyse, plus il a d'influence (ou poids) sur la procédure de calcul de la moyenne. Cette méthode est adaptée lorsque les données en entrée sont hétérogènes (avec un pas différent) et le territoire à étudier vaste. Le modèle considère les 12 points voisins les plus proches de chaque pixel et affecte une valeur.

⁵⁰ <https://catalogue.cdata.cerema.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search;#/metadata/6ff7b5dd-7849-4423-a910-bb502679571b>

⁵¹ https://catalogue.cdata.cerema.fr/geonetwork/srv/api/records/6ff7b5dd-7849-4423-a910-bb502679571b/attachments/Info_Fourniture_ANEMOC2_Antilles.pdf

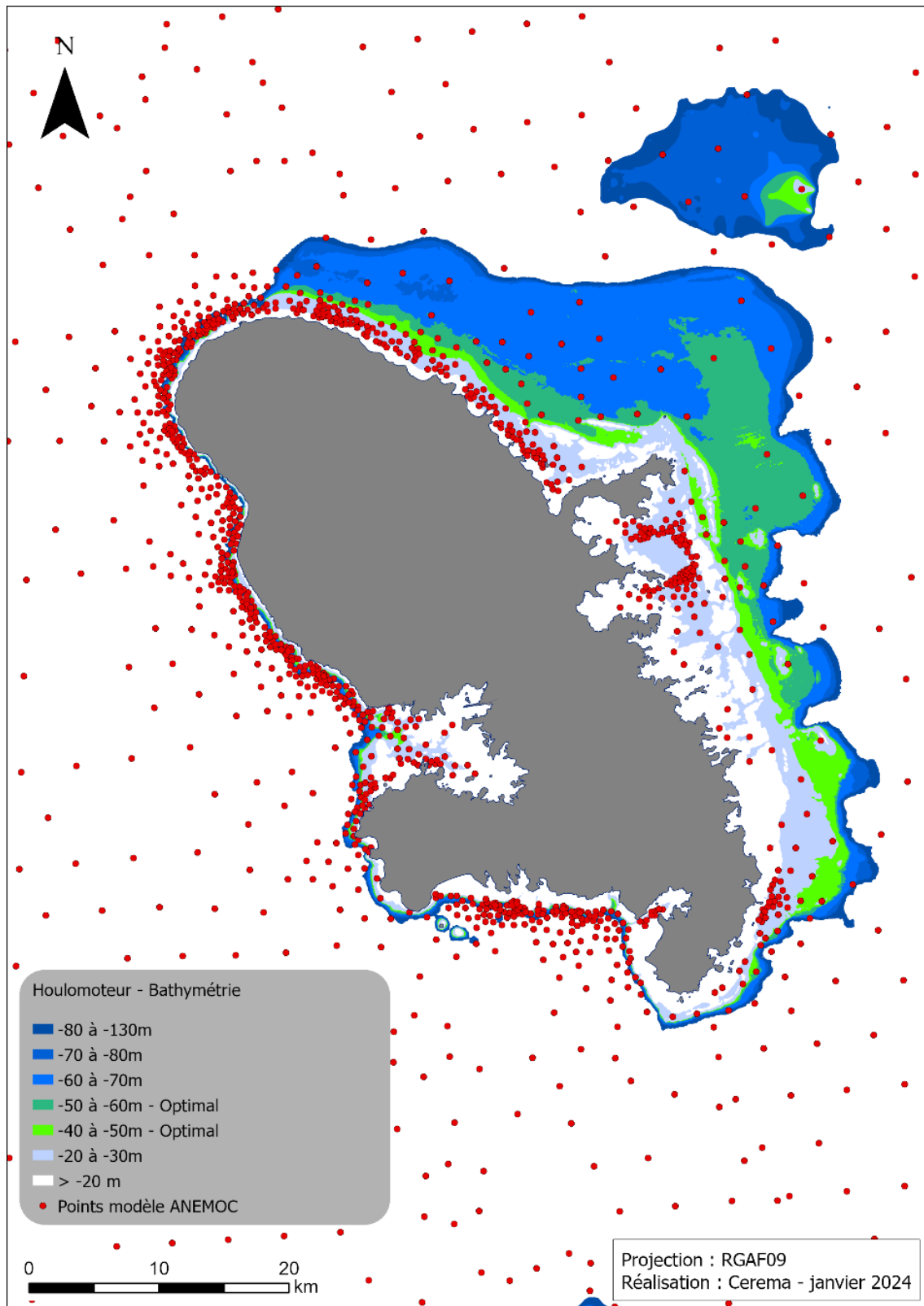


Figure 47 Points extraits de la base de données ANEMOC 2 Antilles (Source : Cerema)

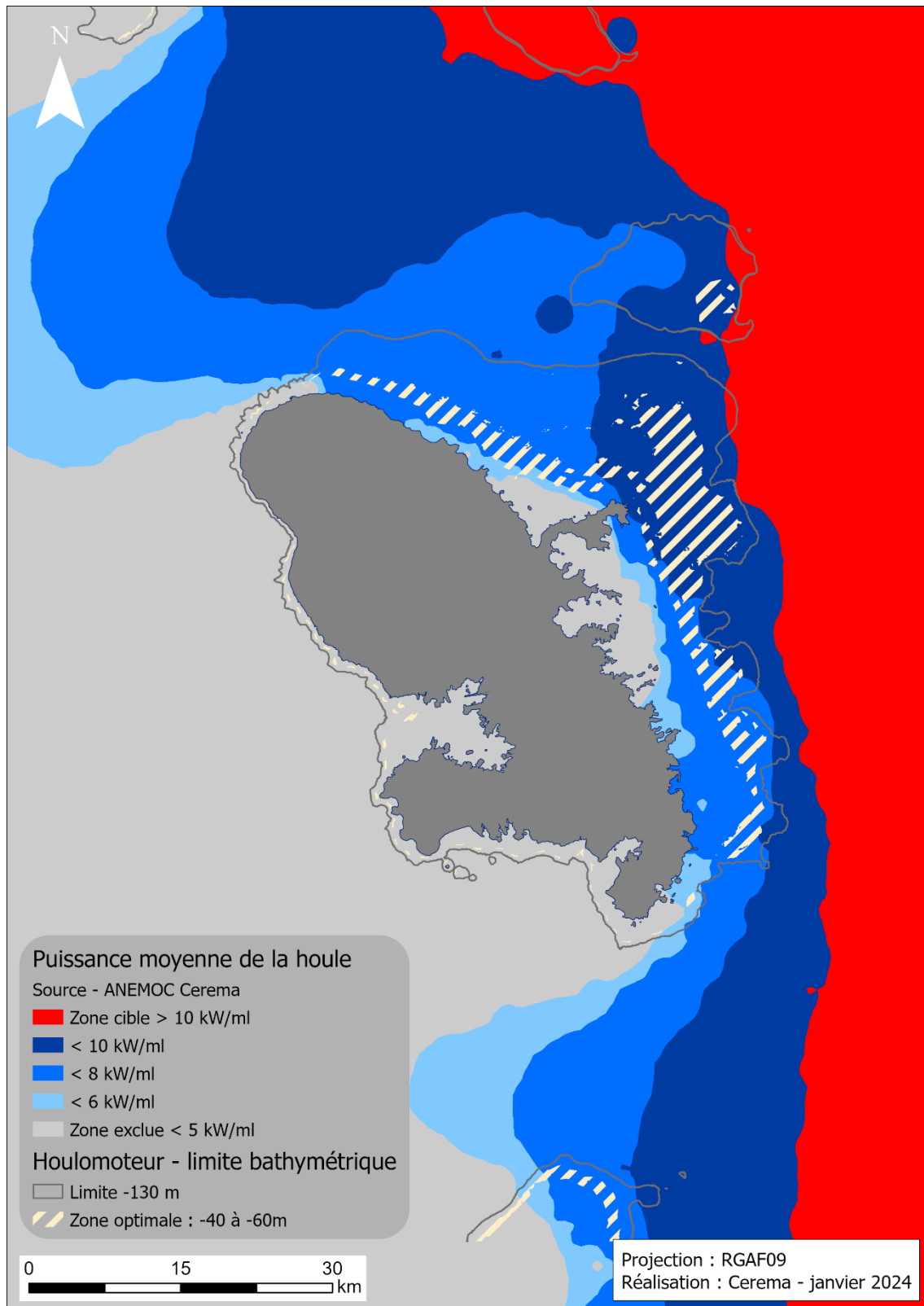


Figure 48 Puissance moyenne de la houle sur la zone d'étude (Source Cerema)

L'ensemble de la zone présente une puissance moyenne de houle inférieure à 10 kW/ml. Une large partie de la zone d'étude (bathymétrie entre -40 et -60 m), située au Nord-Est, présente une puissance comprise entre 8 et 10 kW/ml sur environ 110 km².

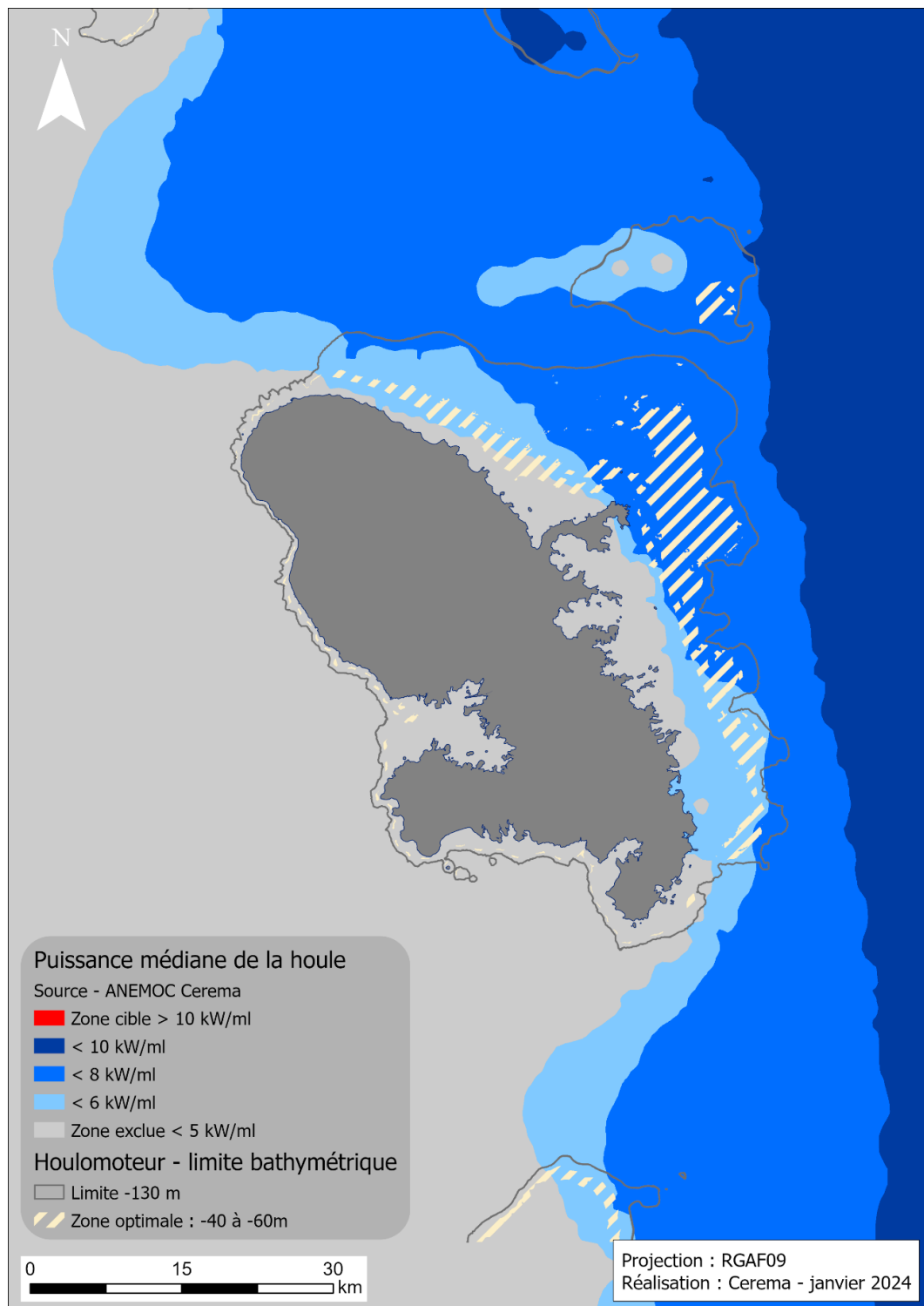


Figure 49 Puissance médiane de la houle sur la zone d'étude (Source Cerema)

L'ensemble de la zone présente une puissance médiane (50% du temps) de houle inférieure à 8 kW/ml.

En conclusion, puisque la puissance moyenne de houle autour de la Martinique reste en deçà du seuil inférieur de 10 kW/ml, il convient de considérer qu'en l'état actuel des technologies, le potentiel est faible pour la filière houlomotrice.

De plus, le déploiement d'un houlographe sur la côte Est de l'île permettrait de fiabiliser les données issues de différents modèles de houle.

2.4 Potentiel Énergie Thermique des Mers (ETM)

2.4.1 Paramètres d'évaluation

L'énergie thermique des mers valorise le gradient de température vertical des océans, c'est-à-dire la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes.

Ses applications sont nombreuses et variées, et la ressource est pratiquement « infinie » à l'échelle des projets envisagés. Elle est exploitée en Asie et à Hawaï, en Inde pour la désalinisation, ainsi qu'en Europe et dans les pays tempérés pour les réseaux de refroidissement ou de chauffage urbain : c'est par exemple le cas du SWAC (Sea Water Air Conditioning). La technologie ETM (*OTEC en anglais*) est considérée comme viable dans la ZEE de 98 pays et territoires dans le monde⁵².

En ce qui concerne la production d'électricité, la différence de température nécessaire est d'environ 20°C ou plus. Il est donc nécessaire d'aller chercher l'eau à une profondeur d'environ 1 000 m, là où la température est relativement constante à 4°C. Le système est donc stable pour une température de surface moyenne de 25°C⁵³.

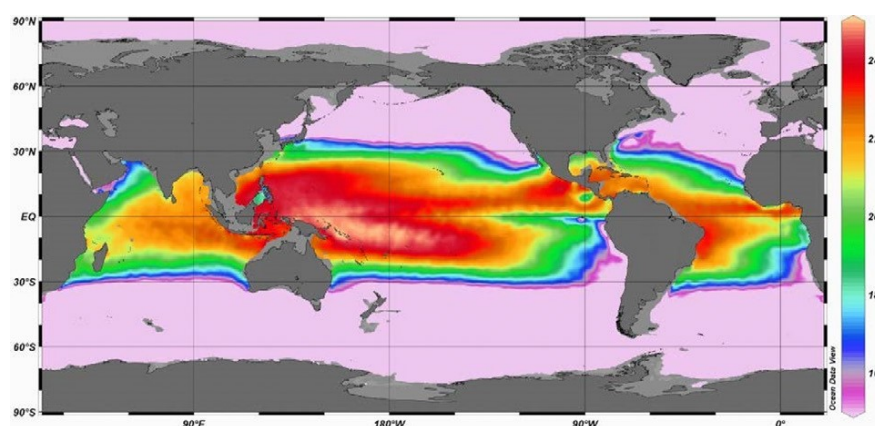


Figure 50 Différence de température moyenne annuelle entre les profondeurs 20 et 1000 m (Nihous, G.C. 2010)

Les limites d'ordre technico-économiques sont toutefois très fortes. C'est pourquoi, bien que le principe soit connu depuis 100 ans et étudié depuis près de 50 ans, très peu d'installations existent aujourd'hui et elles restent limitées à des prototypes de R&D de petite puissance⁵⁴.

Les limites techniques concernent essentiellement la taille des conduites d'eau qui doivent être installées pour un système ETM de grande capacité. Ainsi une unité de 100 MW nécessite une conduite d'eau froide de 10 m de diamètre ou plus, et d'une longueur de 1 000 m, qui doit être correctement connectée à la plateforme ETM. Le coût d'investissement très important et le manque de démonstrateurs à plus grande échelle sont des freins pour le déploiement de cette technologie.

2.4.2 Application à la zone d'étude

A la Martinique, les études antérieures ont confirmé que les conditions requises pour les technologies d'Énergie Thermique des Mers étaient favorables. La température de surface moyenne en 2017 sur la zone Martinique était d'environ 28°C sur l'ensemble de la zone.

L'inventaire des données réalisé par le projet Carib-Coast⁵⁵ indique que des mesures de température et de salinité ont été réalisées ponctuellement dans le cadre du projet NEMO à proximité de Bellefontaine (Martinique) en 2013 et 2014. Mais les données ne sont pas accessibles librement.

⁵² R. Kempener (IRENA), F. Neumann (IMIEU), Ocean Thermal Energy Conversion, Technology Brief, IRENA, juin 2014

⁵³ Ibid

⁵⁴ SREMER 2018 La Réunion

⁵⁵ https://www.carib-coast.com/wp-content/uploads/2022/10/Actimar-RED-1693-Rapport-Taches1-2_V1.0.pdf

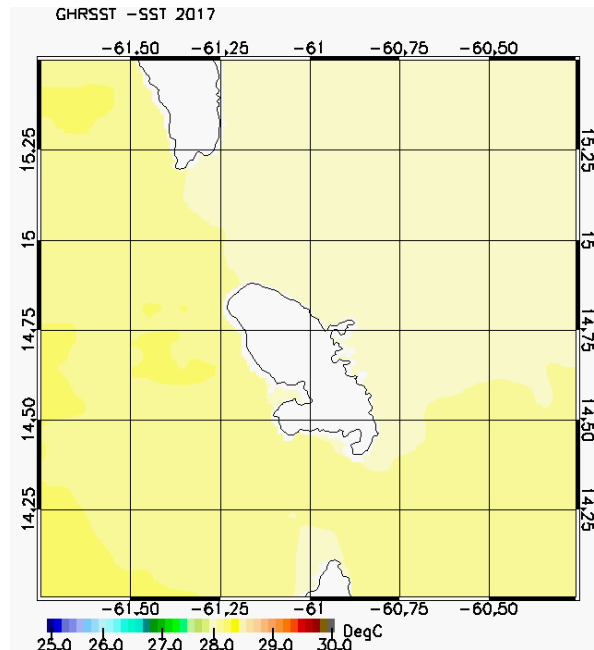


Figure 51 Température de surface moyenne annuelle sur la zone Martinique en 2017 (Source Ifremer)

Étant donnée l'homogénéité de la température de surface à cette échelle, les limites de la zone de potentiel pour la production d'électricité repose sur une bathymétrie comprise entre 1 000 m et 1 500 m de profondeur.

Pour une utilisation liée à la climatisation (SWAC), une limite de distance s'impose avec le point de consommation, fixé à 12 km par la SREMER de La Réunion, en raison du coût des canalisations mais aussi parce que la puissance du système diminue avec la distance.

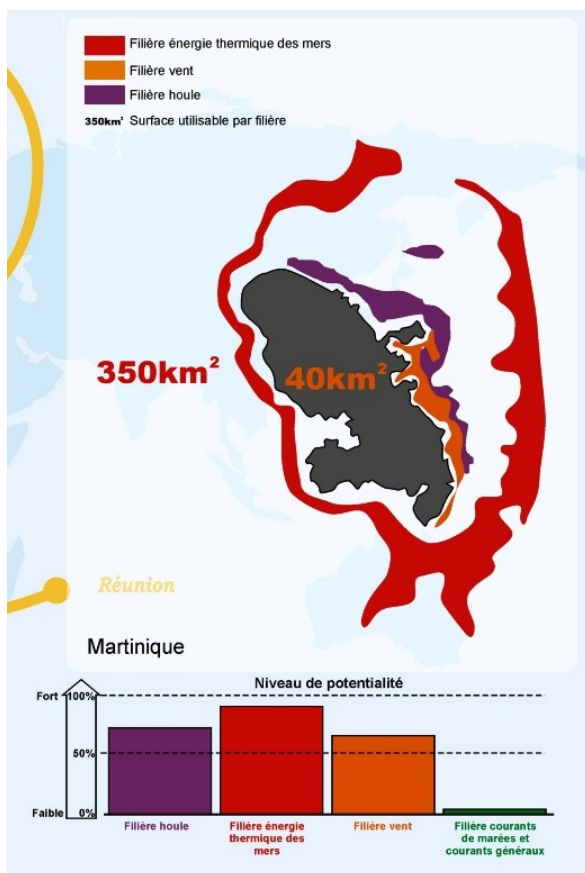


Figure 52 Synthèse du potentiel des EMR en Martinique – Etude 2007

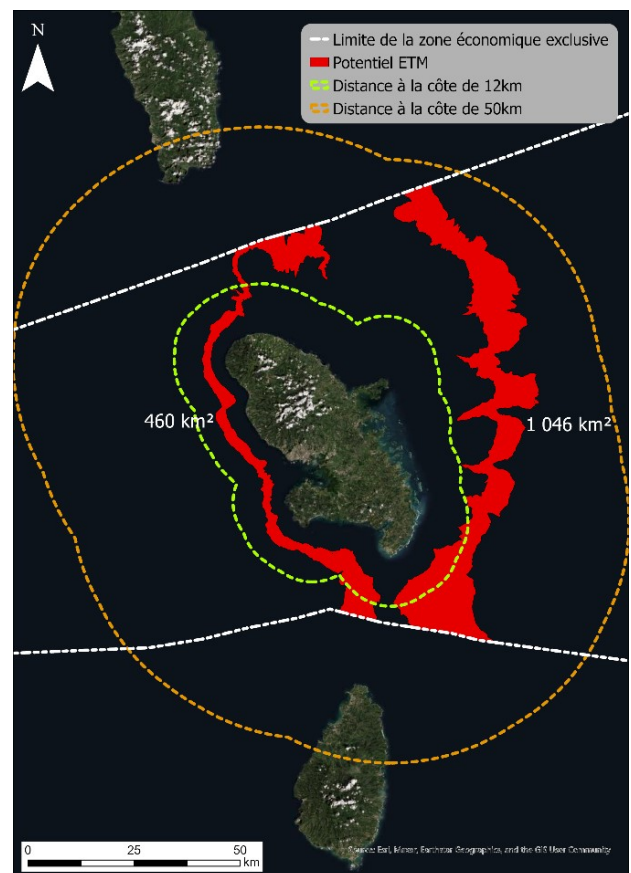


Figure 53 Zone de potentiel ETM en Martinique - estimation Cerema

Cependant, l'abandon du projet NEMO (New Energy for Martinique and Overseas) en 2018 rend la maturité commerciale de cette technologie très peu probable à horizon 2030 pour la production d'électricité. Ce démonstrateur flottant, prévu à 7 km au large de Bellefontaine et d'une puissance de 16 MW, devait d'ailleurs bénéficier d'un tarif d'achat élevé de 450 €/MWh. Par comparaison, le coût de production moyen de l'électricité en 2022 à la Martinique était de 323 €/MWh⁵⁶.

Ainsi, aucun potentiel ETM n'a été estimé à ce stade.

Pour la SWAC, il conviendrait dans un premier temps d'identifier les consommateurs potentiels sur le linéaire de la côte Caraïbe. Le Cerema mène depuis 2023 le projet "EnRezo"⁵⁷, avec le soutien de l'ADEME et de la DGEC, qui consiste à cartographier au niveau national les potentiels de développement des réseaux de chaleur et de froid.

Depuis avril 2024, un module "EnRezo DROM" est venu enrichir le projet, avec une méthodologie adaptée aux territoires d'Outre-Mer pour l'estimation des besoins en froid.



Figure 54 Besoins en froid à la Martinique, zoom sur Fort-de-France – Projet EnRezo - Cerema

Sur la base des besoins et de la proximité des bâtiments, des zones d'opportunité ont été créées :

- Zone à potentiel fort = besoin mini 300 MWh/an
- Zone à potentiel = besoin mini 100 MWh

⁵⁶ <https://www.cre.fr/Transition-energetique-et-innovation-technologique/soutien-a-la-production/transition-energetique-dans-les-zni>

⁵⁷ <https://reseaux-chaleur.cerema.fr/espace-documentaire/enrezo>

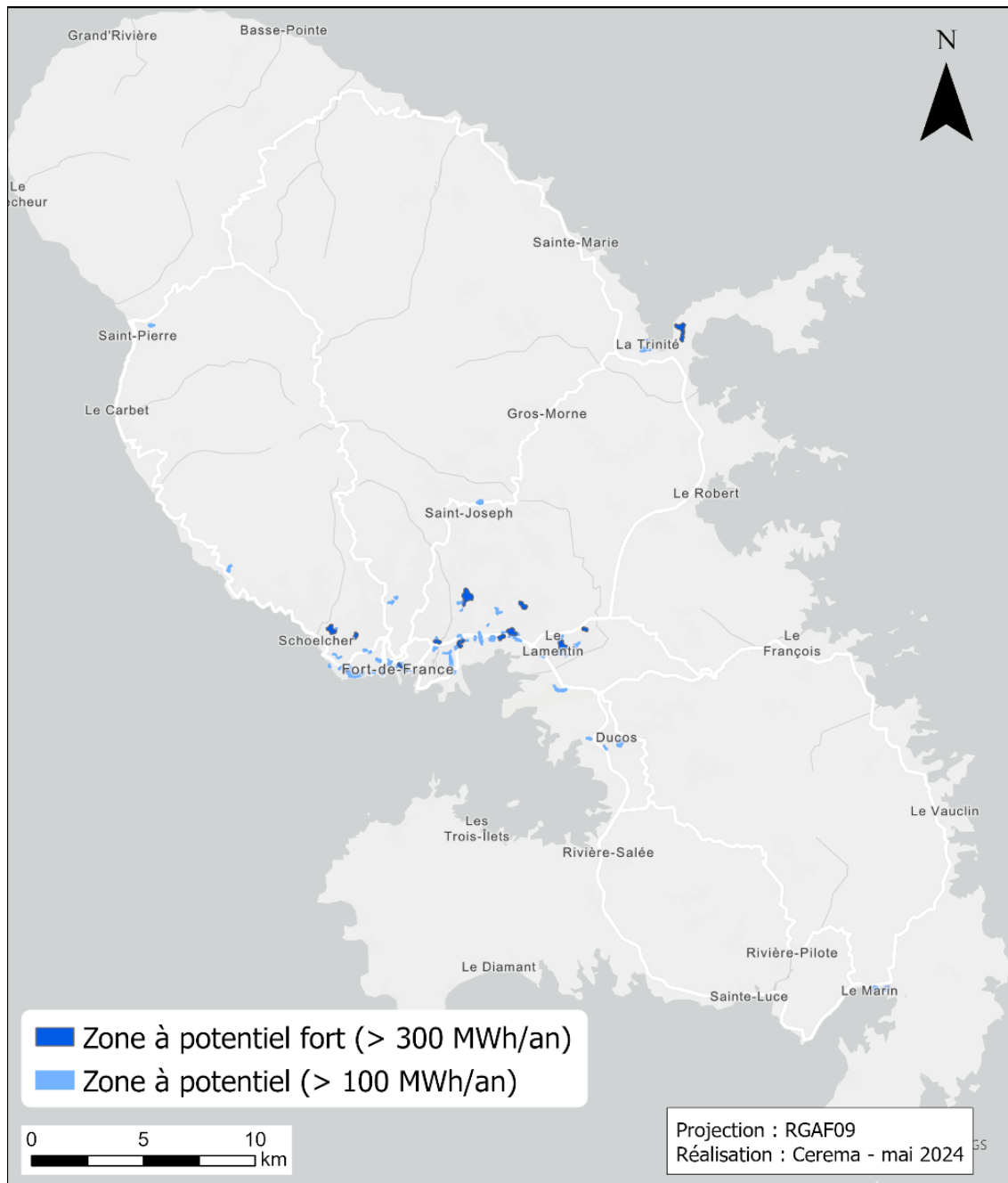


Figure 55 Zones d'opportunité pour le développement d'un réseau de froid à la Martinique –
Projet EnRezo - Cerema

2.5 Potentiel énergie osmotique

L'exploitation de l'énergie osmotique utilise la différence de salinité entre l'eau douce et l'eau salée, en ciblant les embouchures des fleuves et des rivières, mais aussi les sites industriels, comme les usines de désalinisation qui produisent des saumures. La quantité d'énergie disponible est fonction de la différence de concentration des deux solutions et de la qualité de la membrane utilisée pour cette technologie à l'interface entre les deux solutions.

Il existe deux méthodes :

- l'électrodialyse inverse (RED - Reverse ElectroDialysis) : les membranes échangeuses d'ions (sodium positifs Na^+ et chlorure négatifs Cl^-) permettent de générer un courant électrique ;
- l'osmose à pression retardée (PRO - Pressure Retarded Osmose) : les membranes semi-perméables permettent aux molécules d'eau de passer de la cuve d'eau douce à la cuve d'eau salée, augmentant ainsi la pression qui permet d'actionner une turbine et de générer de l'électricité.

Le SREMER de la Réunion concluait en 2018 que l'osmose est « une technologie encore trop peu mature pour envisager son exploitation pour la production électrique. Elle met en œuvre des matériaux d'une technicité élevée dont les coûts sont encore trop élevés ». D'après l'IRENA⁵⁸, le coût de la membrane représente 50 à 80% des coûts d'investissement, et leur prix actuel de 10 à 30 €/m² devra chuter à 2 à 5 €/m² pour être compétitif.

La performance s'exprime en « densité énergétique nette », qui est déterminée par le potentiel de la membrane, sa résistance et l'énergie nécessaire pour pomper l'eau. Le SREMER de la Réunion souligne que les membranes actuelles nécessaires au procédé « ont une efficacité de 1 W/m² en conditions réelles, 3 W/m² en laboratoire, et il est estimé qu'il faudrait atteindre les 5 W/m² pour être compétitif (source : Statkraft 2010) ». En 2014, l'IRENA⁵⁹ indiquait que des laboratoires avaient atteint 14.4 W/m² sur la technologie PRO.

Depuis 2020, l'ADEME accompagne le projet Sarbacanne⁶⁰ de la société française Sweetch Energy qui vise à produire de l'énergie par gradient de salinité avec un facteur d'efficacité supérieur de deux ordres de grandeur par rapport aux technologies existantes. Cette technologie, baptisée Inod (Ionic Nano Osmotic Diffusion), sera déployée en 2024 sur l'écluse de Barcarin à Port-Saint-Louis-du-Rhône, avec l'installation du démonstrateur « OsmoRhône 1 ».

Dans ce contexte, aucun potentiel d'énergie osmotique n'a été estimé à ce stade.

⁵⁸ R. Kempener (IRENA), F. Neumann (IMIEU), Salinity Gradient Energy, Technology Brief, IRENA, juin 2014

⁵⁹ Ibid

⁶⁰ <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/400/sarbacanne-ademe-ci.pdf>

2.6 Conclusion

Tableau 13 Conclusions de l'étude sur le gisement techniquement exploitable par source d'énergie

Eolien	Le potentiel technique est de 11,8 GW dont 63% a minima de flottant, essentiellement au Nord-Est. La distance minimale à la côte peut réduire très fortement le potentiel : > 10 km = plus de potentiel en éolien posé pour une profondeur < 40 m. > 15 km = 4,6 GW en flottant uniquement
Hydrolien	Les courants en surface ont des vitesses moyennes entre 0,5 et 0,6 m/s. Le seuil minimal est de 1,5 m/s. Il n'y a donc pas de potentiel.
Houlomoteur	L'ensemble de la zone présente une puissance moyenne de houle inférieure à 10 kW/ml. En l'état actuel des technologies, le potentiel est donc faible.
Énergie thermique des mers (ETM) dont SWAC	Le gisement est abondant, mais la maturité technologique est incertaine pour la production d'électricité. Le potentiel SWAC est à explorer sur la côte Caraïbe en identifiant les points de consommation et les besoins en puissance. Le projet EnRezo fournit des éléments pour identifier les zones à potentiel de développement de réseaux de froid.
Énergie osmotique	La technologie fonctionne mais les membranes restent chères et pas assez performantes. Un démonstrateur français est prévu en 2024. Aucun potentiel n'a été défini. Cette technologie cible plutôt les estuaires.

3 INTEGRATION DES ENJEUX

Afin d'identifier les zones les plus favorables, le gisement techniquement exploitable est mis en perspective avec une synthèse des enjeux environnementaux ainsi qu'avec d'autres activités et usages de la mer, regroupés selon des thématiques spécifiques.

3.1 Environnement

Les pressions exercées par les éoliennes en mer sur la biodiversité marine sont de natures diverses. Ces pressions sont par exemple provoquées par les mouvements des pales des éoliennes, les bruits en phase de travaux, ou encore la remise en suspension des fonds marins. Plusieurs types d'habitats et d'espèces sensibles peuvent être sévèrement impactés par l'implantation d'un projet éolien en mer. Certains de ces habitats et espèces sont protégés ce qui exclut tout projet éolien en mer.

Un grand nombre de données, en particulier concernant les espaces protégés et autres zones réglementées, a été collecté dans le cadre de cette étude. Elles sont toutes disponibles dans le visualiseur de données associé. Cependant un grand nombre de zones sont totalement terrestres. Aussi ce rapport se concentre sur les zones ayant une partie marine.

3.1.1 Sanctuaire Agoa et Parc marin

Le Sanctuaire Agoa est une aire marine protégée, officiellement reconnue depuis 2012 au titre de la convention de Carthagène, et dédiée à la protection des mammifères marins des Antilles françaises. Le Sanctuaire couvre toutes les eaux des Antilles françaises (143 256 km²) : Martinique, Guadeloupe, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Il est géré par l'Office français de la biodiversité (OFB).

Depuis 2017, la Martinique est dotée d'un Parc naturel marin également géré par l'OFB et qui couvre l'ensemble de ses eaux 47 000 km².

Il y a donc une superposition du Sanctuaire Agoa et du Parc naturel marin dans les eaux de la Martinique.

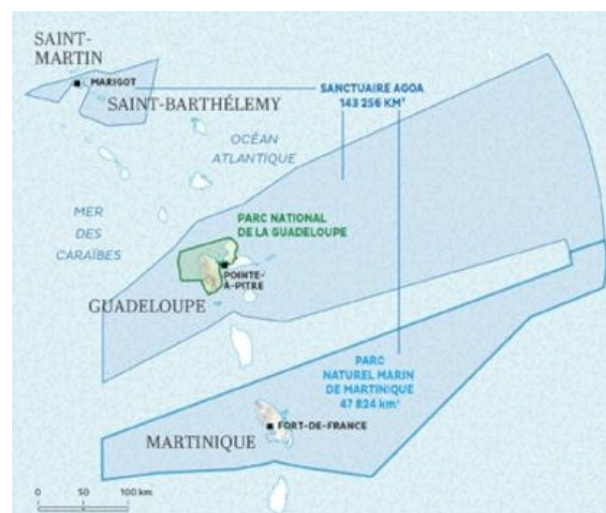


Figure 56 Carte des espaces naturels protégés dans les Antilles françaises (Source : OFB)

3.1.2 Contrat de la Grande Baie

Le Contrat de la Grande Baie est un dispositif contractuel d'une durée de 5 ans (2021-2026) issu d'une démarche volontaire et partenariale.

Il compte 42 membres et permet aux différents acteurs d'une baie et de son bassin versant (élus, administrations, usagers, organismes socio-professionnels et institutions) de définir et de mettre en œuvre de manière globale et concertée, un programme d'actions visant à améliorer la qualité des eaux et des écosystèmes du territoire concerné.



Figure 57 Aire du contrat de la Grande Baie

3.1.3 Réserve de biosphère

Le titre de Réserve de Biosphère est attribué par le programme Homme et Biosphère (MAB – Man and Biosphere) de l'UNESCO. Il a été donné au territoire de la Martinique en 2021.

Ce titre émane d'une volonté locale mais n'impose aucune réglementation et ne s'appuie sur aucun pouvoir réglementaire. Un comité de gestion met en œuvre le plan de gestion de la réserve. Parmi 5 axes de travail, le plan contient un objectif de développement des énergies renouvelables.

La réserve est constituée de trois zones :

- **Aires centrales** : zone strictement protégée qui contribue à la conservation des paysages, des écosystèmes, des espèces et de la variation génétique.
- **Zone tampon** : zone entourant les aires centrales, utilisée pour des activités compatibles avec des pratiques écologiquement viables susceptibles de renforcer la recherche, le suivi, la formation et l'éducation scientifiques.
- **Aire de transition** : zone où les communautés encouragent des activités économiques et humaines durables des points de vue socioculturel et écologique.

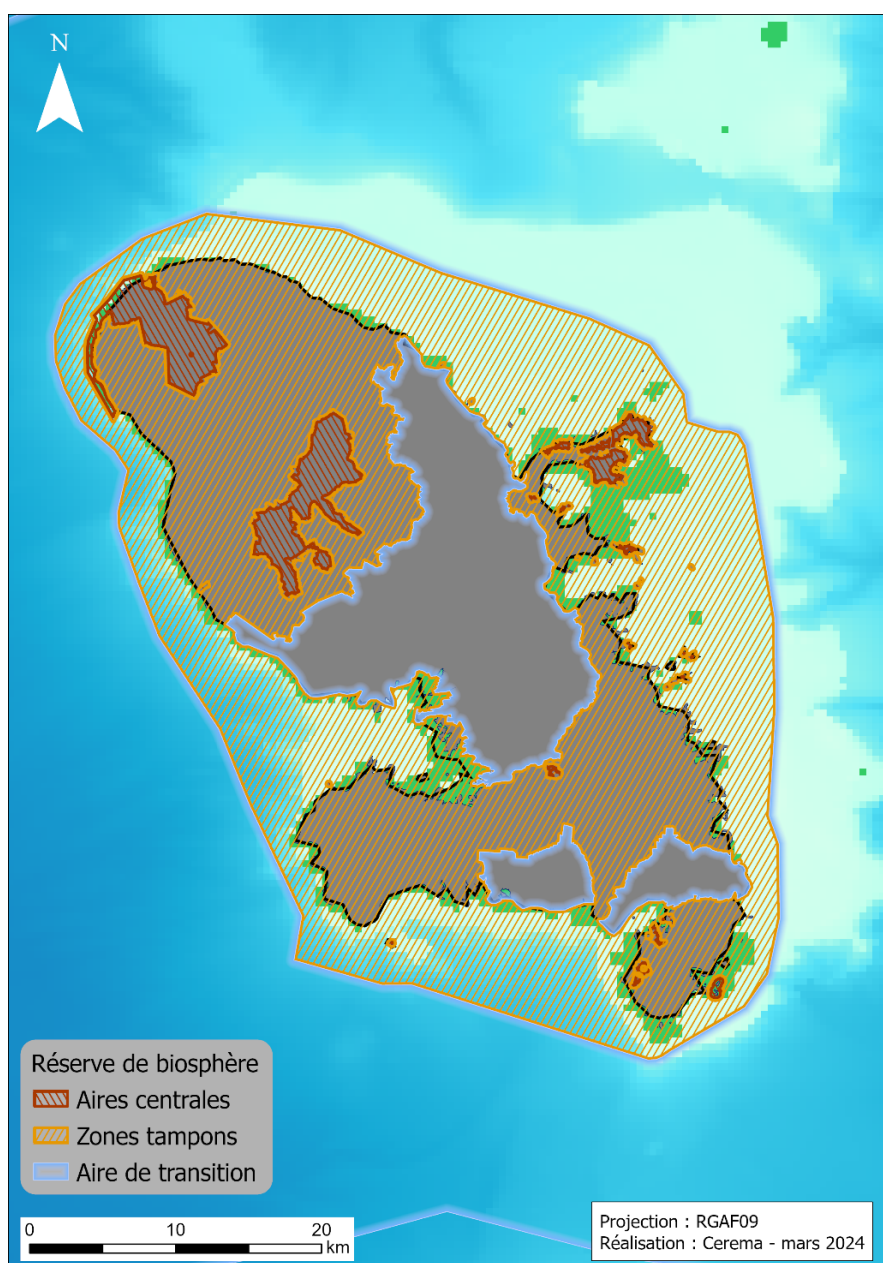


Figure 58 Réserve de Biosphère de la Martinique

3.1.4 Zone ZICO - Birdlife

Les Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) sont des sites importants pour certaines espèces d'oiseaux (pour leur aires de reproduction, d'hivernage ou pour les zones de relais de migration), identifiés lors du programme d'inventaires scientifiques lancé par l'ONG Birdlife International.

Les ZICO n'ont pas de statut juridique particulier, mais ont contribué à la définition des sites Natura 2000. Ce sont de vieux zonages puisque leur périmètre n'a pas évolué depuis 1994.

Cependant, puisque le dispositif Natura 2000 ne s'applique pas à l'Outre-mer, ces zones peuvent servir de base. **Aussi, nous avons ici choisi de les traiter comme des zones excluant l'éolien en mer.**

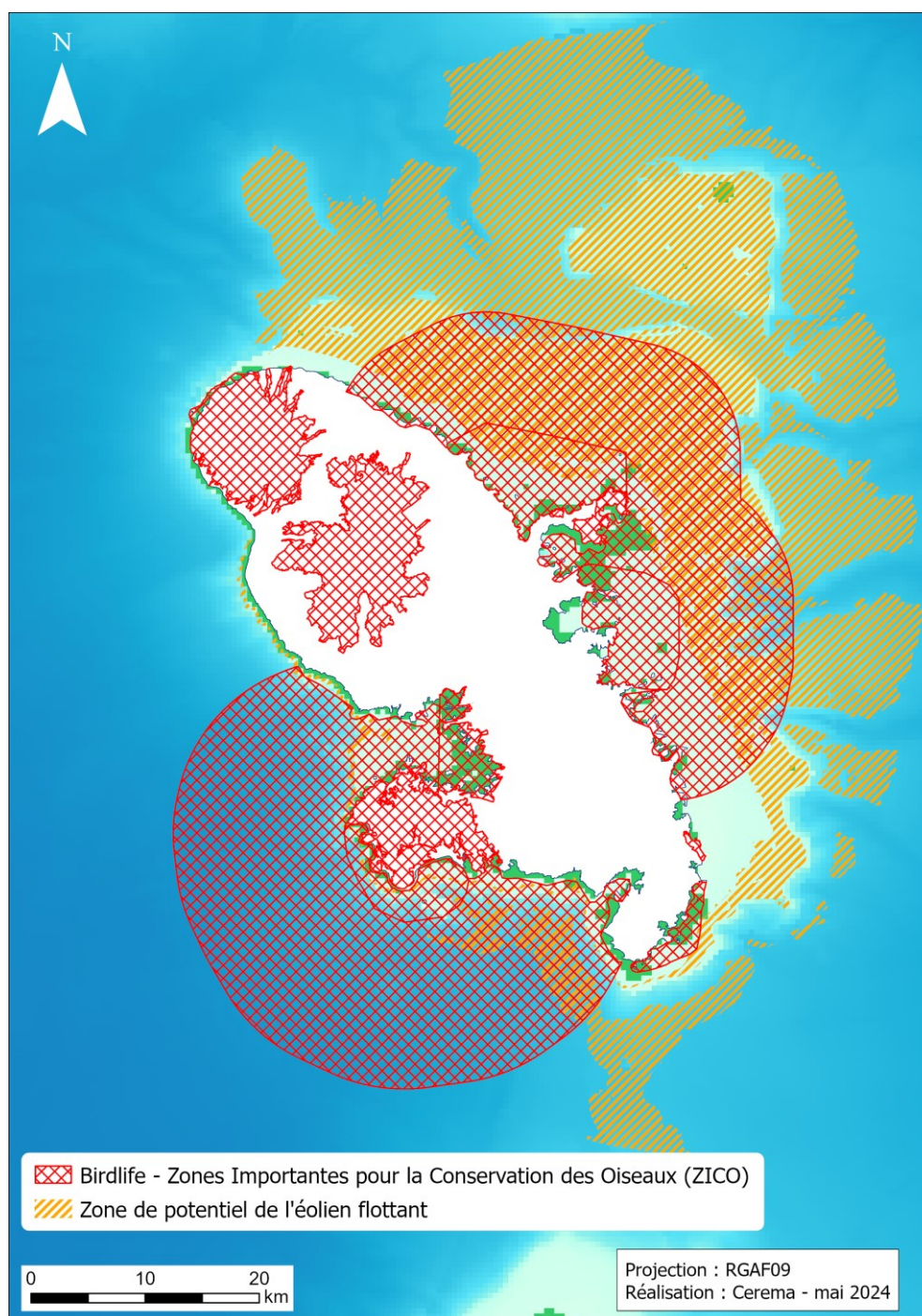


Figure 59 Zones Importantes pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) à la Martinique (Source : Birdlife)

3.1.5 Fonds marins côtiers et Biocénoses marines

L'OFB fournit des données sur la nature des fonds marins et les biocénoses marines, mais ces données sont limitées à la bande côtière et jusqu'à une profondeur de 53 mètres.

Ces connaissances ne sont pas suffisamment précises pour conclure quant à la faisabilité d'implantation et donc pour être prises en compte dans l'analyse.

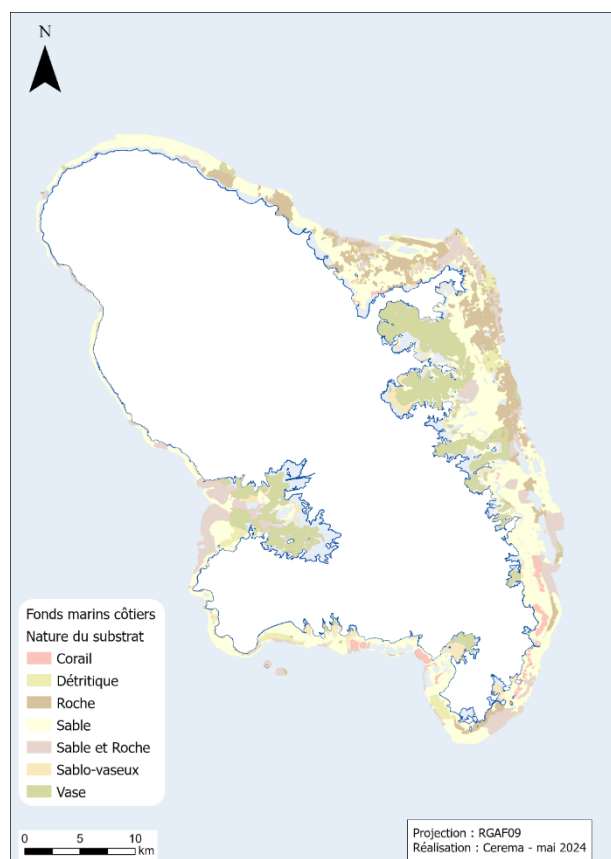


Figure 60 Nature des fonds marins côtiers de la Martinique
(Source : OFB)

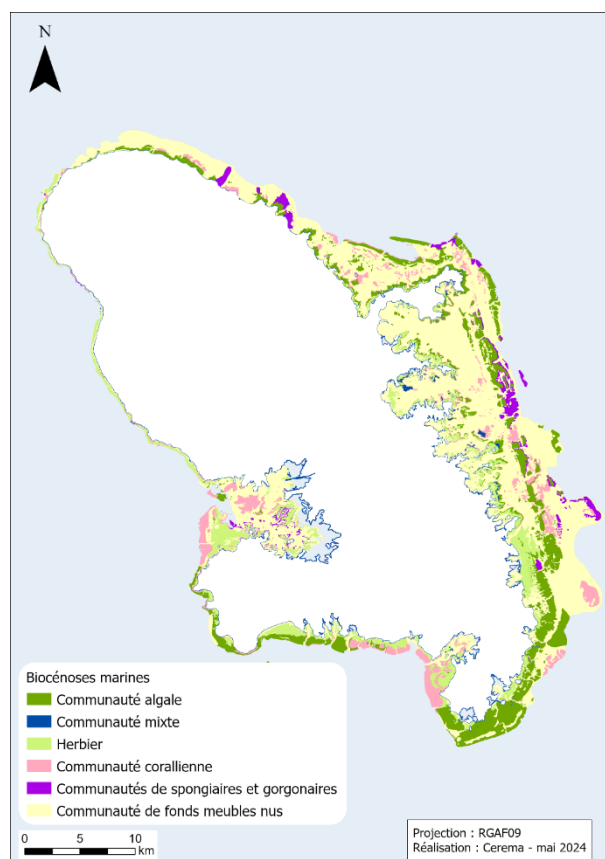


Figure 61 Biocénoses marines de la Martinique (Source : OFB)

3.1.6 Espaces Naturels

La carte ci-dessous présente les espaces naturels de Martinique. Bien que certaines zones couvrent des espaces marins, elles sont toutes concentrées sur le littoral.

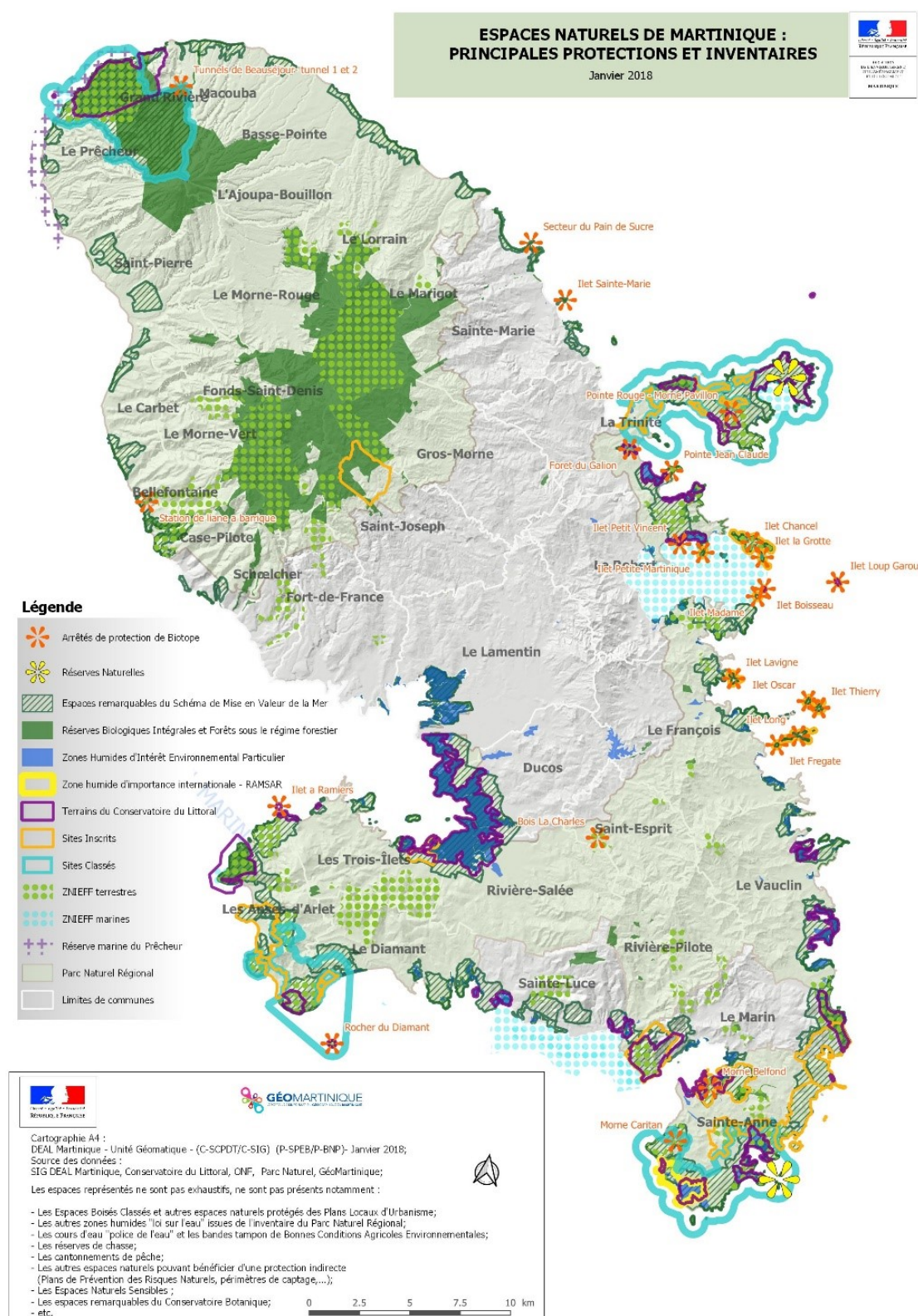


Figure 62 Espaces naturels de Martinique : principales protections et inventaires
(Source DEAL)

3.2 Défense nationale

Il existe une zone de tir, d'un rayon de 12 Nq, située dans la zone économique exclusive à l'Ouest de la Martinique (14° 35' N - 61° 47,36' O). Cette zone n'est donc pas une contrainte pour les zones de potentiel éolien en mer.

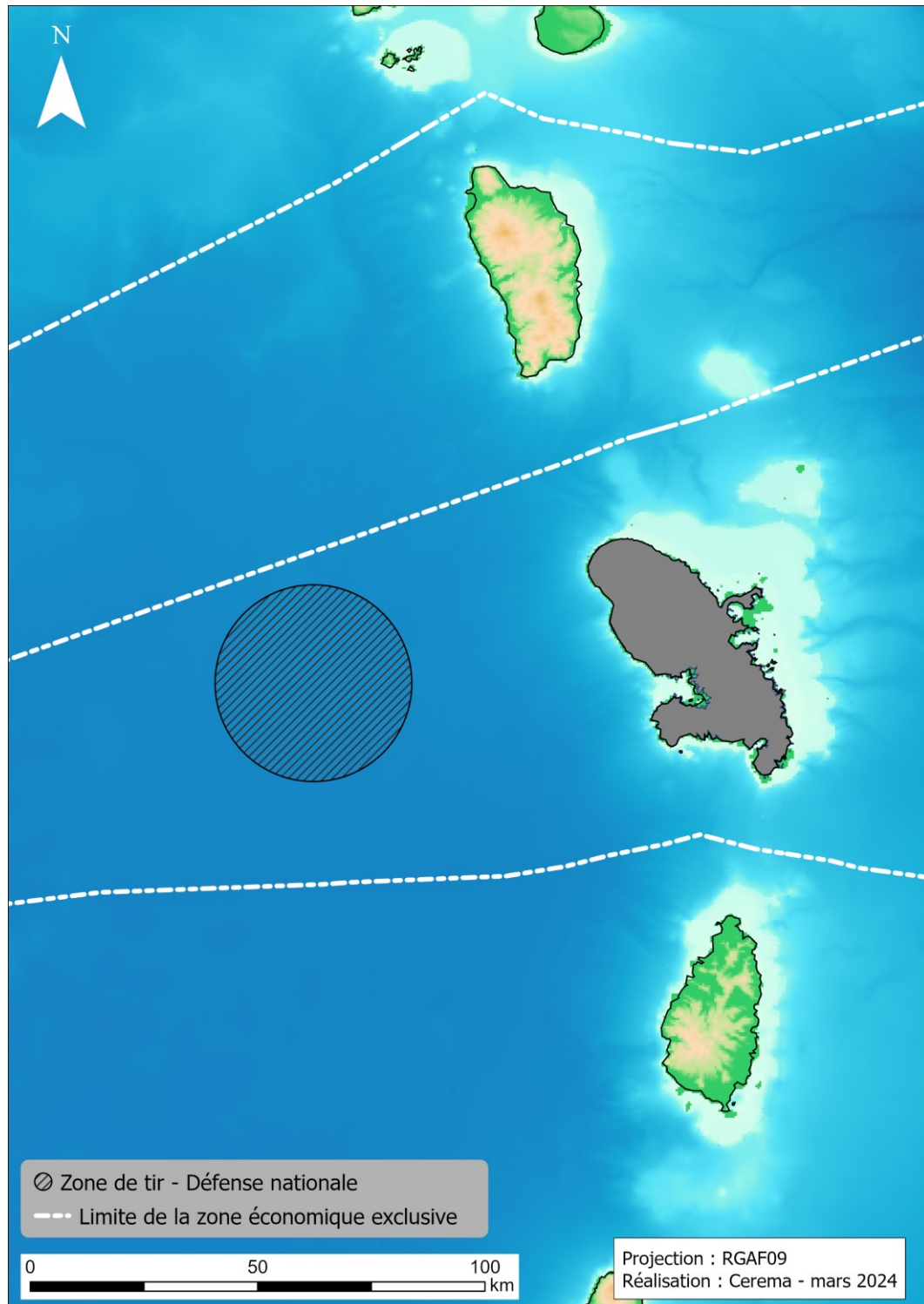


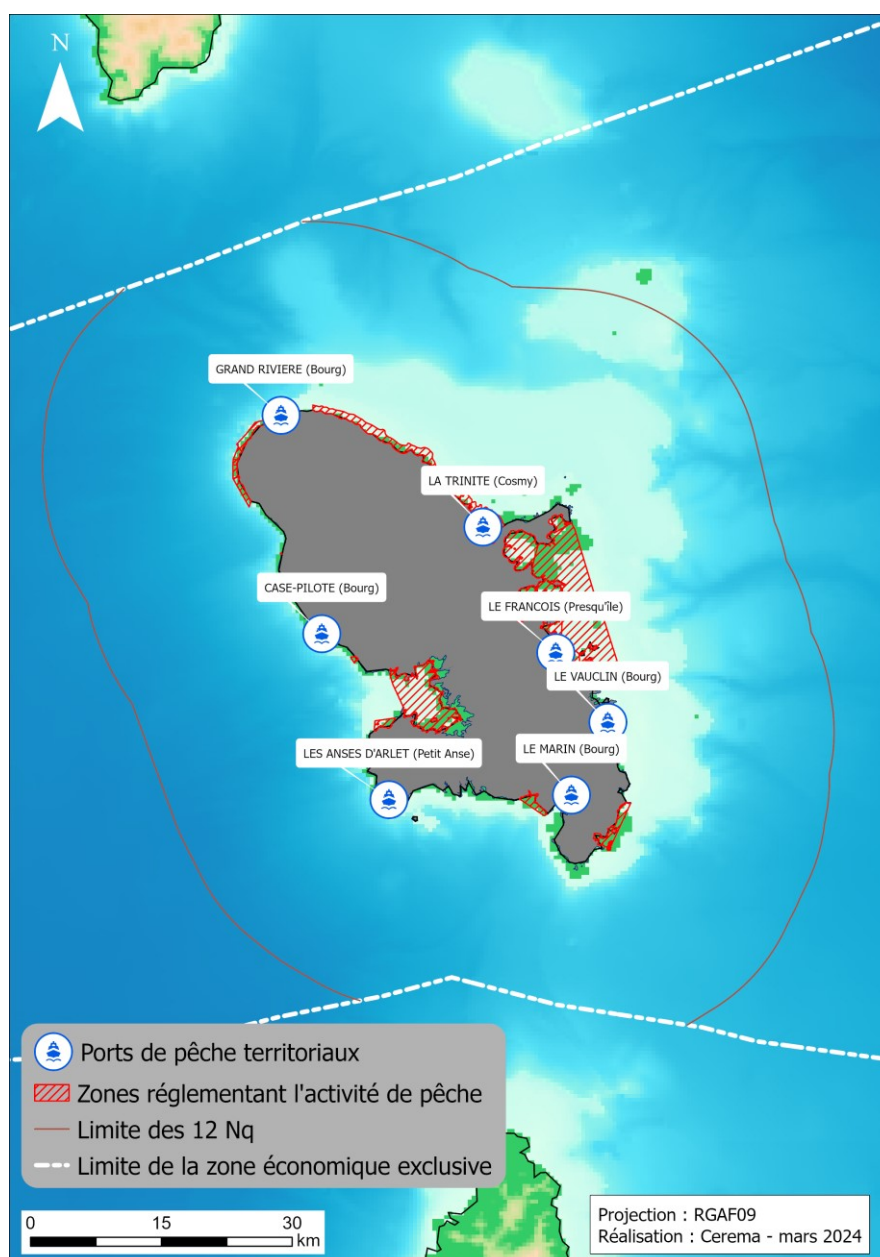
Figure 63 Zone de tir en mer à la Martinique - Défense nationale

3.3 Pêche professionnelle

D'après la synthèse 2021 de l'Ifremer⁶¹ sur les activités des navires de pêche du quartier maritime de Fort-de-France, 801 navires étaient inscrits au fichier national de la flotte de pêche communautaire (FPC), dont 571 navires actifs à la pêche, et 95% font moins de 10 m.

Parmi ces navires actifs, 57% exercent majoritairement leur activité à moins de 12 milles nautiques des côtes. Les ports de pêche les plus importants sont, par ordre décroissant de nombre de navires, le Vauclin, Case Pilote, Anses d'Arlets, et le François.

Un navire peut utiliser plusieurs engins de pêche au cours d'une même année. En 2021, 59% des navires ont utilisé des casiers et 36% des palangres. **Ces deux techniques de pêches sont des arts dormants, a priori compatibles avec les énergies renouvelables en mer.** 33% des navires ont utilisé des lignes de traine et 24% des filets maillants. Ces deux techniques de pêches sont des arts trainants, dont la compatibilité avec les énergies renouvelables en mer nécessite généralement des aménagements particuliers.



⁶¹ Activité des navires de pêche 2021 - Quartier maritime - Fort-de-France, Ifremer, 2022

A la Martinique, la collecte des données est réalisée à l'échelle des secteurs statistiques⁶². Il n'est donc pas possible de présenter des résultats par maille 3'x3' comme dans les études antérieures du Cerema portant sur les eaux métropolitaines. La spatialisation de l'effort, des captures et valeurs utilise la source « SACROIS-OBSDEB ». La source OBSDEB⁶³ est majoritaire pour la Martinique. Le protocole d'observation et la méthode d'estimation décrits dans un rapport⁶⁴.

Ainsi la carte ci-dessous présente les données pour l'année 2022, limitée à la ZEE, ce qui représente 99% de l'effort pour 96% des captures estimées des navires martiniquais. Afin de respecter la règle d'anonymisation des navires, des secteurs ont été retirés pour certains trimestres lorsque le nombre de navires est inférieur à 5 dans le secteur. Toutefois, 99.6% de l'effort pour 99.5% des captures sont préservés malgré l'application de cette contrainte.

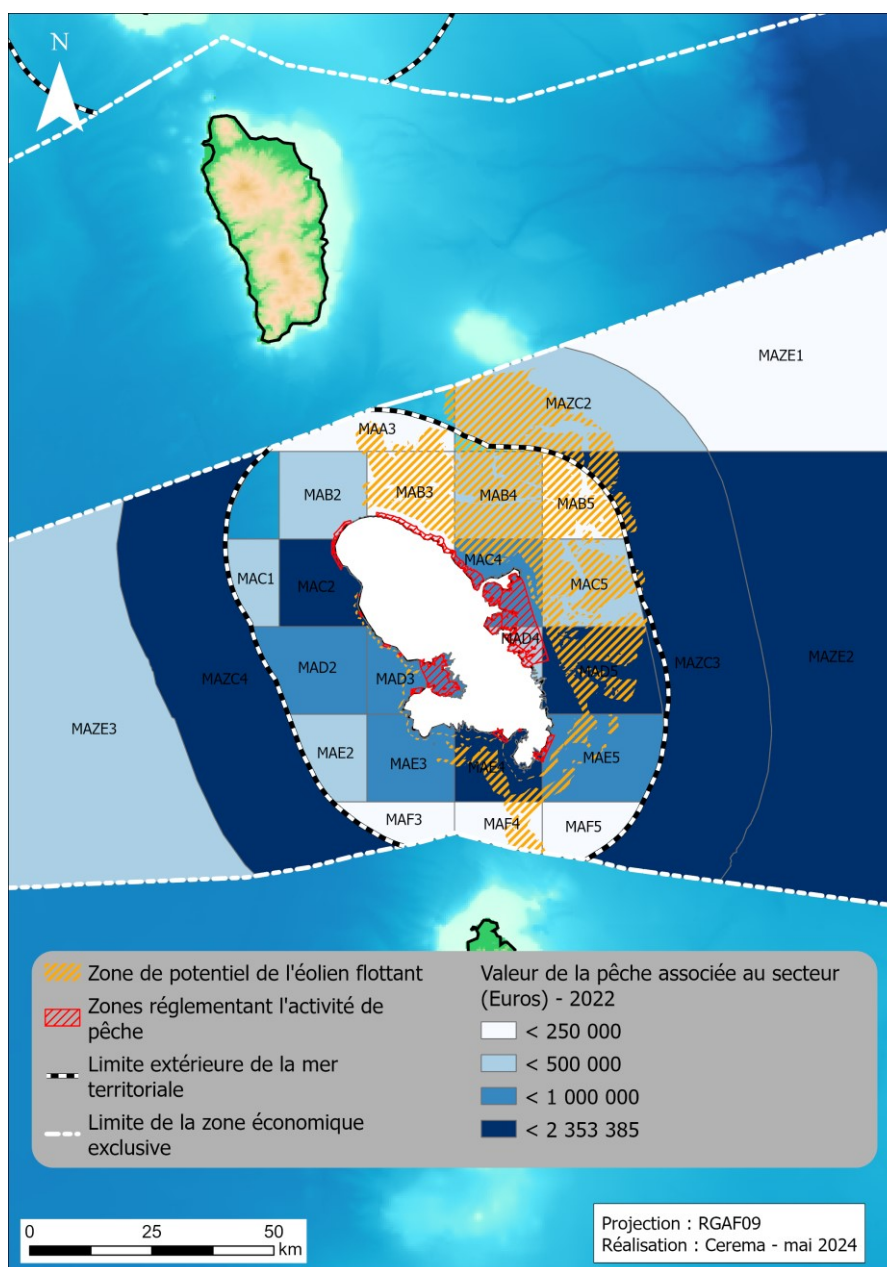


Figure 65 Valeur de la pêche professionnelle à la Martinique par secteur statistique en 2022, en Euros (Source : Ifremer)

⁶² Secteurs statistiques et bathymétrie de Martinique, Ifremer, 2023 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00821/93253>

⁶³ <https://sih.ifremer.fr/Debarquements-effort-de-peche/Obsdeb>

⁶⁴ Méthodologie de collecte de données et d'estimation des efforts et débarquements des pêcheries côtières, Ifremer, 2019 <https://archimer.ifremer.fr/doc/00471/58281/73227.pdf>

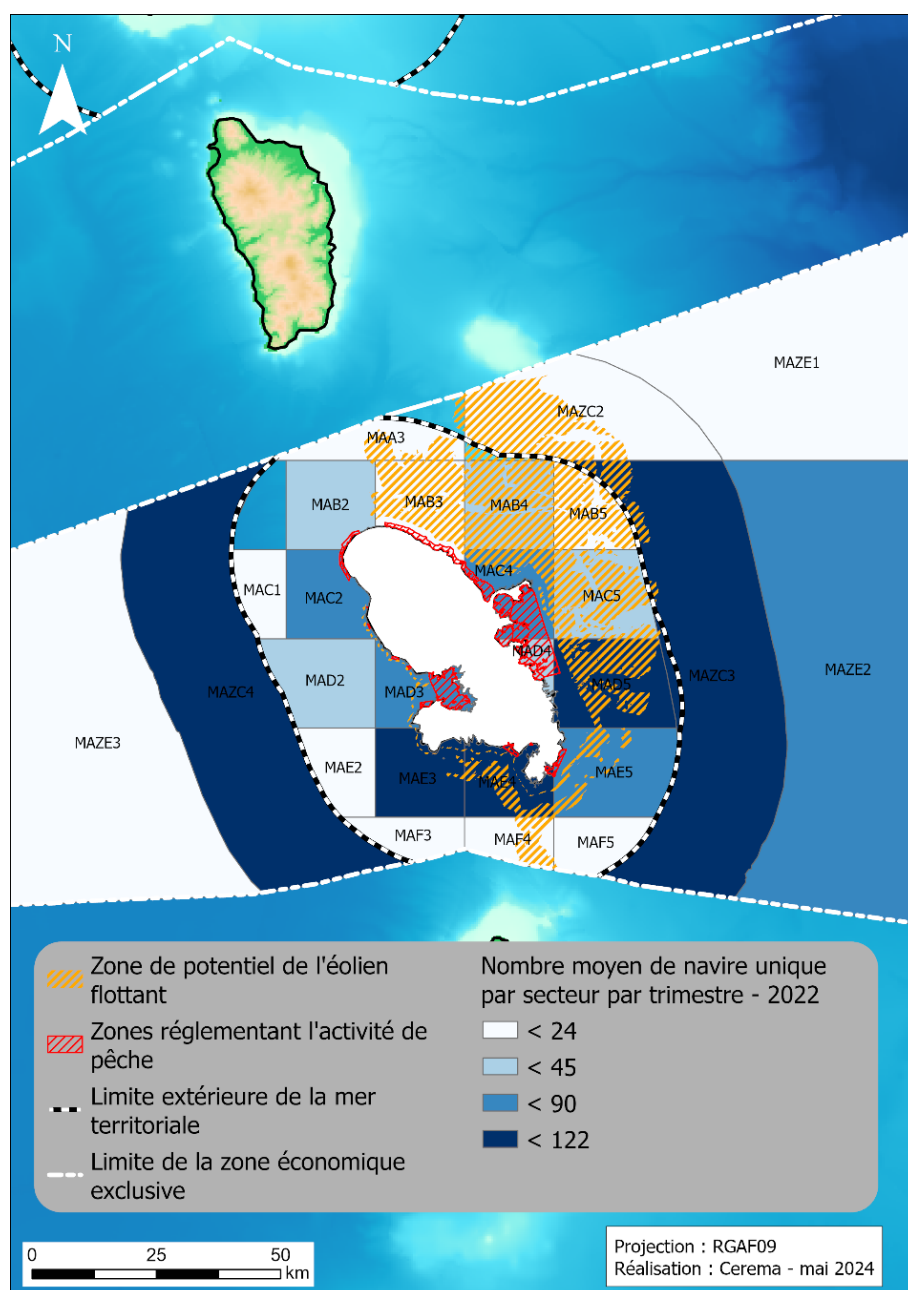


Figure 66 Nombre moyen par trimestre de navire unique de pêche professionnelle par secteur statistique à la Martinique en 2022 (Source : Ifremer)

Après analyse de la valeur des captures estimées et du nombre moyen de navire par secteur, il est proposé de donner priorité à la pêche professionnelle dans les 10 secteurs principaux : C2, C4, D3, D5, E3, E4, E5, ZC3, ZC4 et ZE2. Ces 10 secteurs sur 26 (en rouge dans le tableau ci-après) représentent 75% de la valeur totale des captures en 2022 (17.48 millions d'euros).

Aussi, nous avons choisi de traiter ces secteurs majeurs comme des zones excluant l'éolien en mer et les énergies marines. Une analyse plus fine par technique de pêche serait toutefois nécessaire, les arts dormants étant a priori compatibles avec les énergies renouvelables en mer.

Cette analyse sera particulièrement importante pour identifier les sites propices aux systèmes houlomoteurs, car leur contrainte bathymétrique ne leur permet pas de s'éloigner autant de la côte que l'éolien en mer flottant.

Tableau 14 Valeur de la pêche professionnelle à la Martinique par secteur statistique en 2022, en Euros (Source : Ifremer)

Secteur statistique	Valeur associée (€)	Nbre moyen de navire unique /trimestre	Secteur statistique	Valeur associée (€)	Nbre moyen de navire unique /trimestre
A3	143 585	9.25	E2	260 540	16.75
B2	313 689	26.25	E3	951 065	97.75
B3	205 014	16.25	E4	1 086 808	98.25
B4	402 992	38.25	E5	774 125	59.25
B5	99 774	15	F3	230 441	12.75
C1	356 344	20.75	F4	202 544	14
C2	1 394 257	62.5	F5	161 089	11.25
C4	752 282	83	ZC2	362 910	21.5
C5	296 882	30	ZC3	2 170 878	122
D2	572 559	37.25	ZC4	2 353 385	92.25
D3	736 921	72.25	ZE1	29 590	5
D4	401 057	41.75	ZE2	1 333 600	62.75
D5	1 538 833	102.75	ZE3	349 844	17.25
			Total 2022	17 481 008	

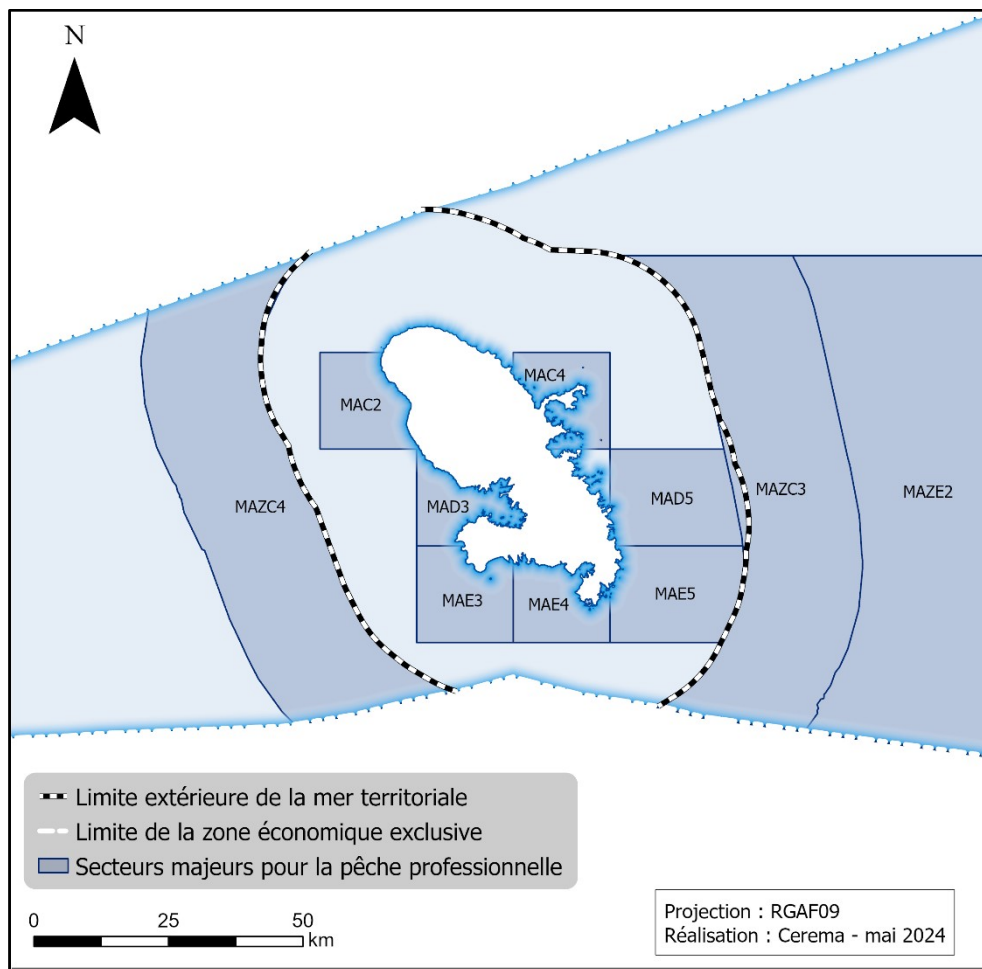


Figure 67 Secteurs statistiques majeurs représentant 75% de la valeur totale des captures en 2022 de la pêche professionnelle à la Martinique

3.4 Trafic maritime et action de l'État en mer

L'intégration de nouvelles infrastructures en mer doit prendre en compte le trafic maritime existant. Les données AIS (Automatic Identification System) permettent de représenter la densité du trafic maritime. Des distances minimales de sécurité entre les routes de navigation et les projets doivent être prévues et faire l'objet d'études approfondies.

La carte ci-dessous présente l'intensité du trafic, c'est-à-dire le nombre de navires moyen par maille par tranche de 24h. C'est sur la côte Caraïbes que se dessine une voie de navigation reliant la Guadeloupe à la Martinique et se prolongeant jusqu'à Sainte Lucie.

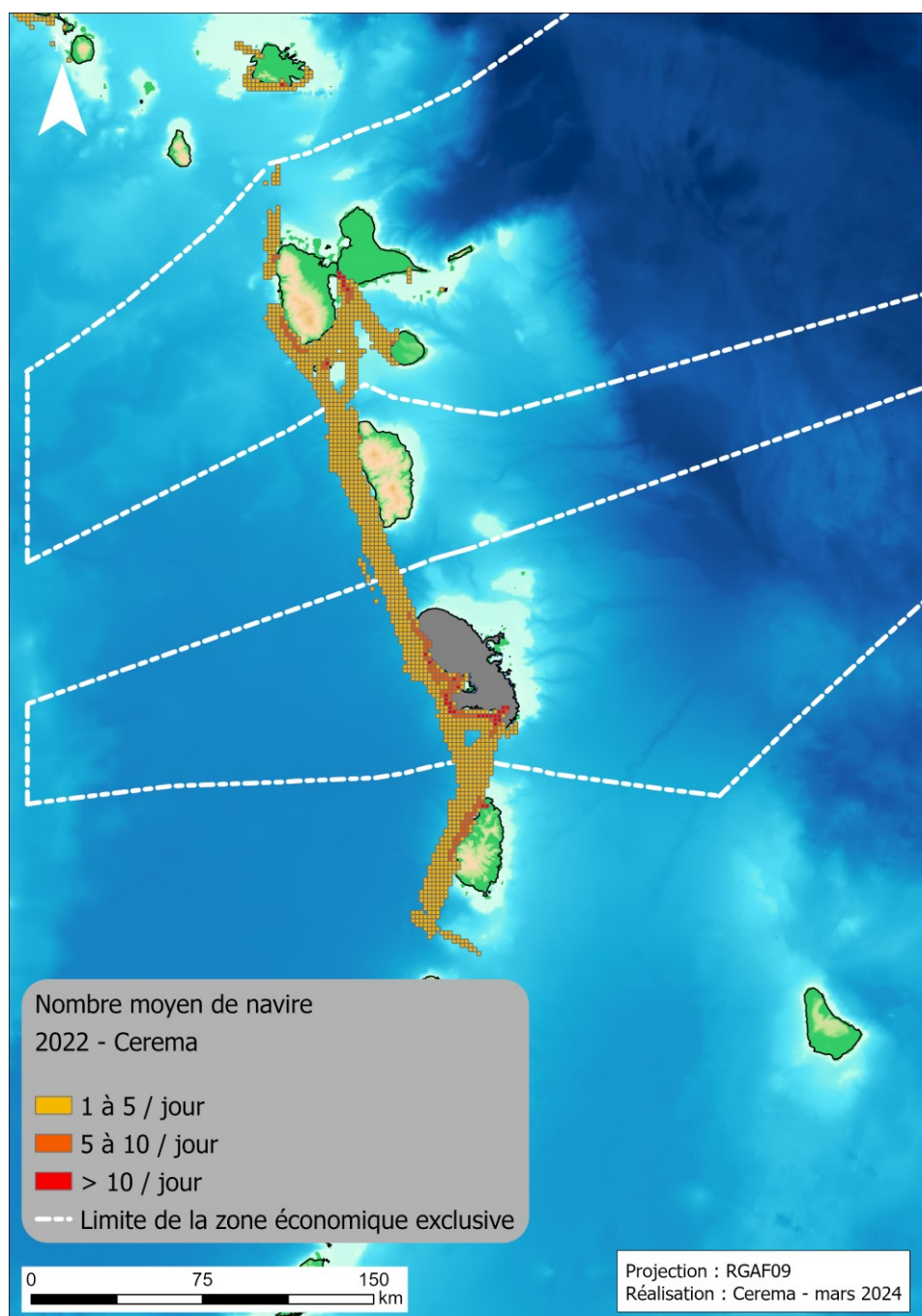


Figure 68 Intensité du trafic maritime en 2022 dans les Antilles françaises (Source Cerema)

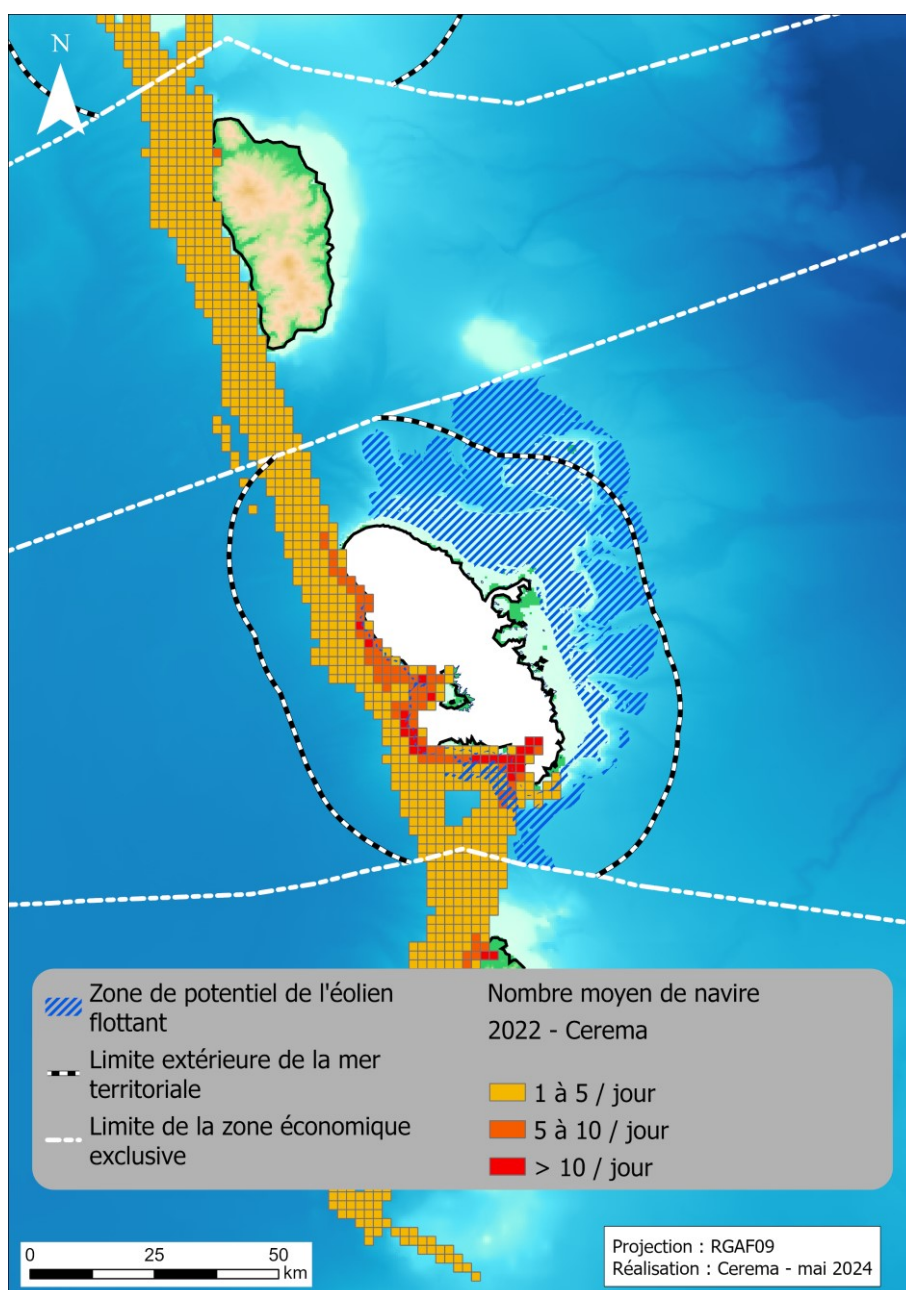


Figure 69 Intensité du trafic maritime en 2022 et zones de potentiel éolien en mer à la Martinique (Source Cerema)

Le préfet de la Martinique, en tant que délégué du Gouvernement pour l'action de l'Etat en mer aux Antilles, a également communiqué au Cerema **trois zones à forts enjeux** de sécurité et de sûreté maritimes dans lesquelles l'installation de dispositifs de production d'EMR est susceptible d'avoir des impacts forts sur la capacité des services de l'Etat à surveiller les espaces maritimes, à porter secours et assistance aux personnes et aux navires et à lutter contre les activités et trafics illicites en mer.

Les **approches maritimes du port de Fort-de-France** et les eaux sous souveraineté française des **canaux de Sainte-Lucie et de la Dominique**, compte tenu de leur très forte fréquentation par les navires, et de la surveillance des trafics illicites inter-îles.

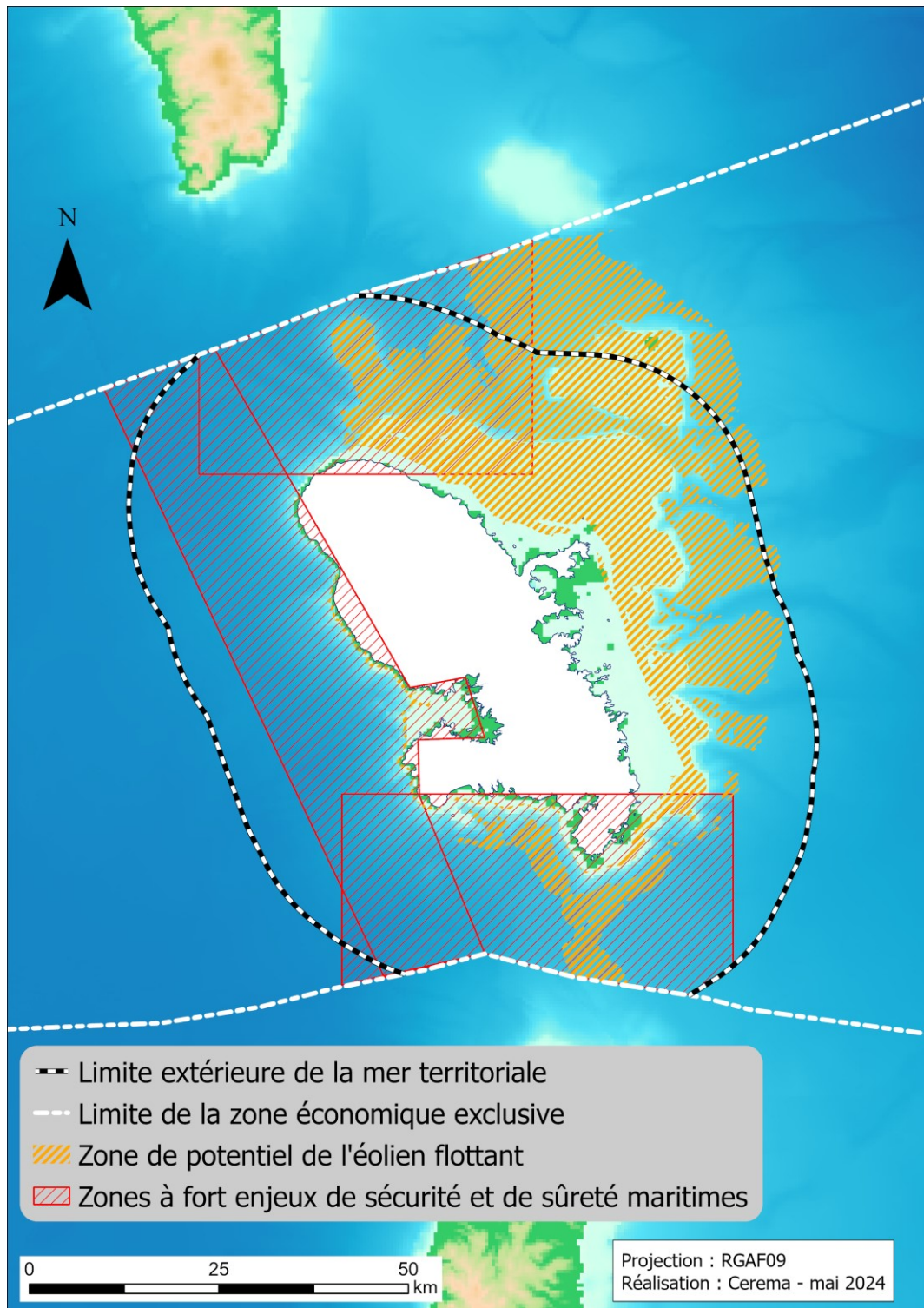


Figure 70 Zones à forts enjeux de sécurité et de sûreté maritimes à la Martinique
(Source : Préfet de la Martinique)

3.5 Trafic aérien

En raison de leur tirant d'air important, avec une hauteur en bout de pale proche de 300m, il est nécessaire de tenir compte des servitudes aéronautiques pour déterminer les zones potentielles. La Martinique dispose d'un aéroport International « Martinique Aimé Césaire » dont le plan de servitudes est présenté sur la carte ci-dessous.

Cette zone située à l'Ouest n'est pas une contrainte pour les zones de potentiel éolien en mer situées à l'Est de l'île.

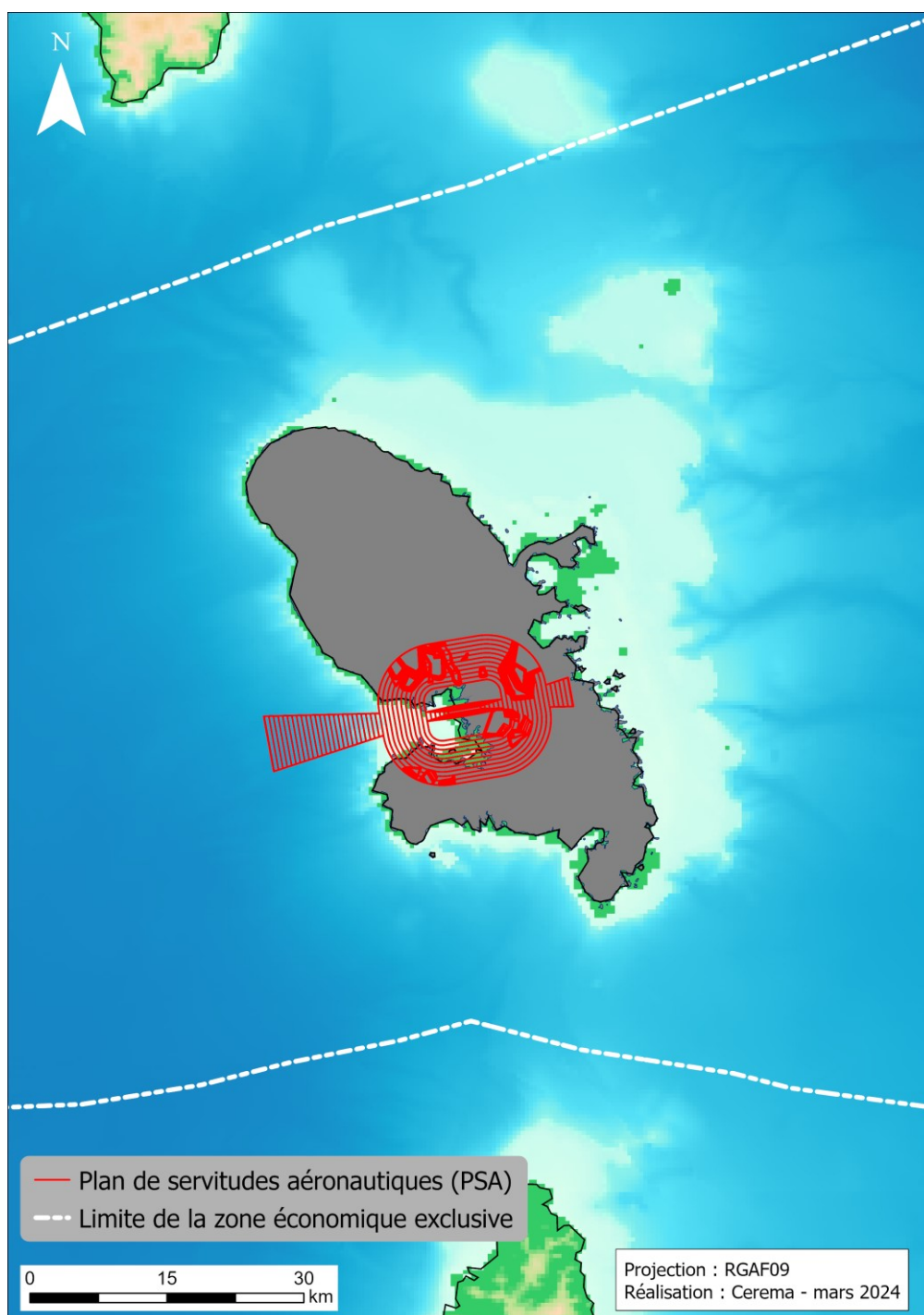


Figure 71 Plan de servitudes aéronautiques (PSA) Aéroport International Martinique Aimé Césaire

3.6 Radars

Le site internet Radeol.fr met à disposition une information générale sur le réseau radar de Météo-France, et la réglementation applicable en matière de cohabitation entre radars météorologiques et parcs éoliens.

Les éoliennes sont des objets de grandes dimensions qui peuvent significativement occulter une partie du faisceau radar conduisant à des sous-estimations ou des surestimations importantes de la détection et des mesures faites par ces radars. Les distances d'éloignement et de protection des radars météorologiques dépendent de la bande de fréquence d'émission du radar.

Il existe également des servitudes de protection des centres de réception radioélectriques contre les perturbations électrométriques : servitude PT1 et PT2.

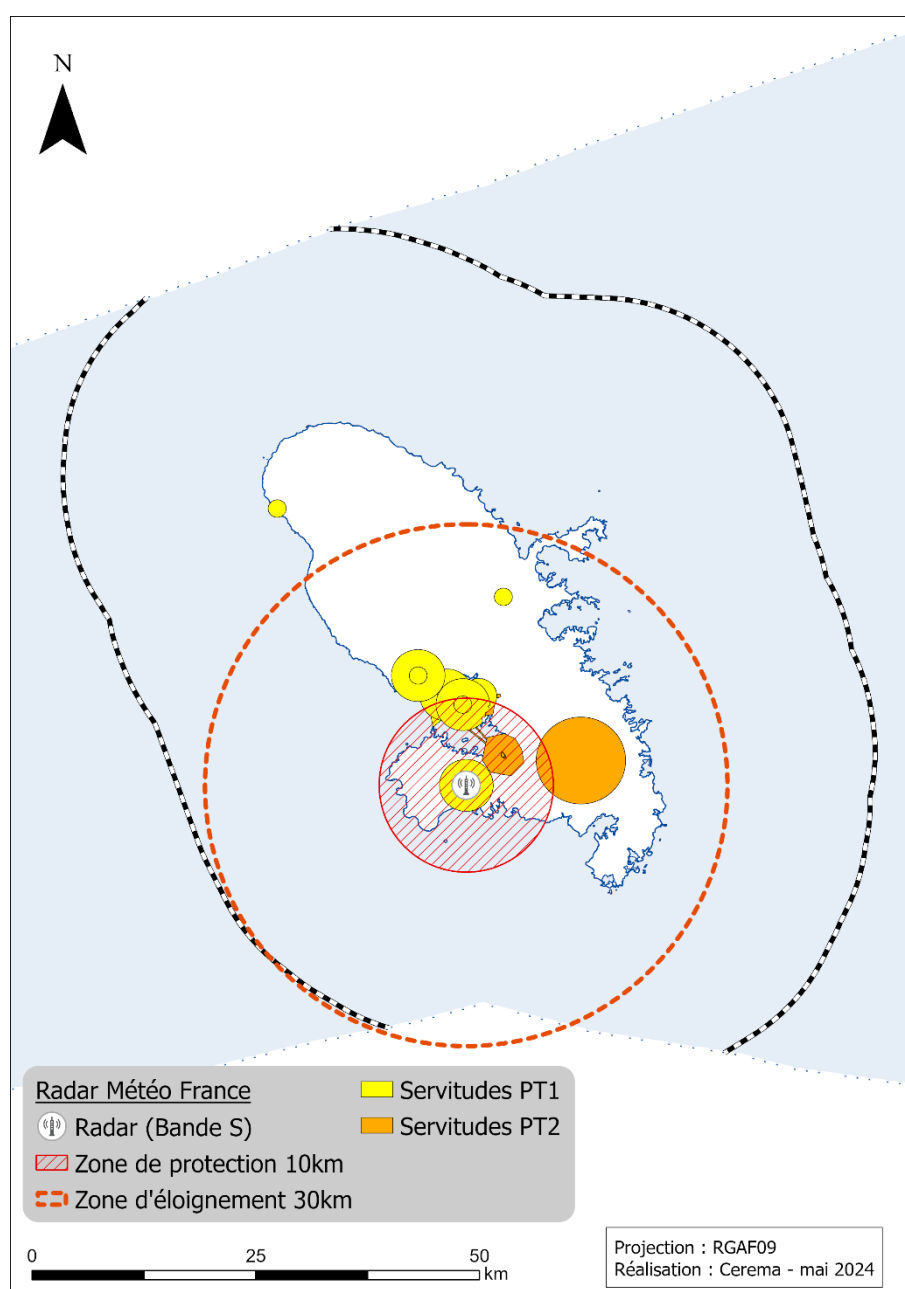


Figure 72 Protection des radars Météo France et servitudes de protection radioélectriques à la Martinique

3.7 Réseau électrique haute tension HTB (63kV)

EDF SEI, en tant que gestionnaire de réseau, est tenu de calculer et de publier de manière périodique les capacités d'injection restantes disponibles sur le réseau public de transport ainsi que les capacités de transformation dans les postes, afin d'attester de la quantité de production pouvant être raccordée sur chaque poste, et ce sans réaliser de travaux de renforcement.

En parallèle, un Schéma de raccordement au réseau des énergies renouvelables⁶⁵ (S2REnR) est élaboré pour planifier l'évolution et les adaptations du réseau de transport électrique 63 kV et des Postes Sources 63/20 kV nécessaires à la réalisation des ambitions régionales.

Dans une note de juillet 2023 intitulée « insertion des énergies marines renouvelables en Outre-mer », EDF SEI fournit la carte ci-dessous, qui présente le réseau haute tension (HTB) et les capacités résiduelles sur les postes du littoral au 1^{er} mai 2023.

Capacités résiduelles (MW) du S2REnR en cours, sur les postes du littoral, pour le raccordement d'EMR, au 01/05/2023

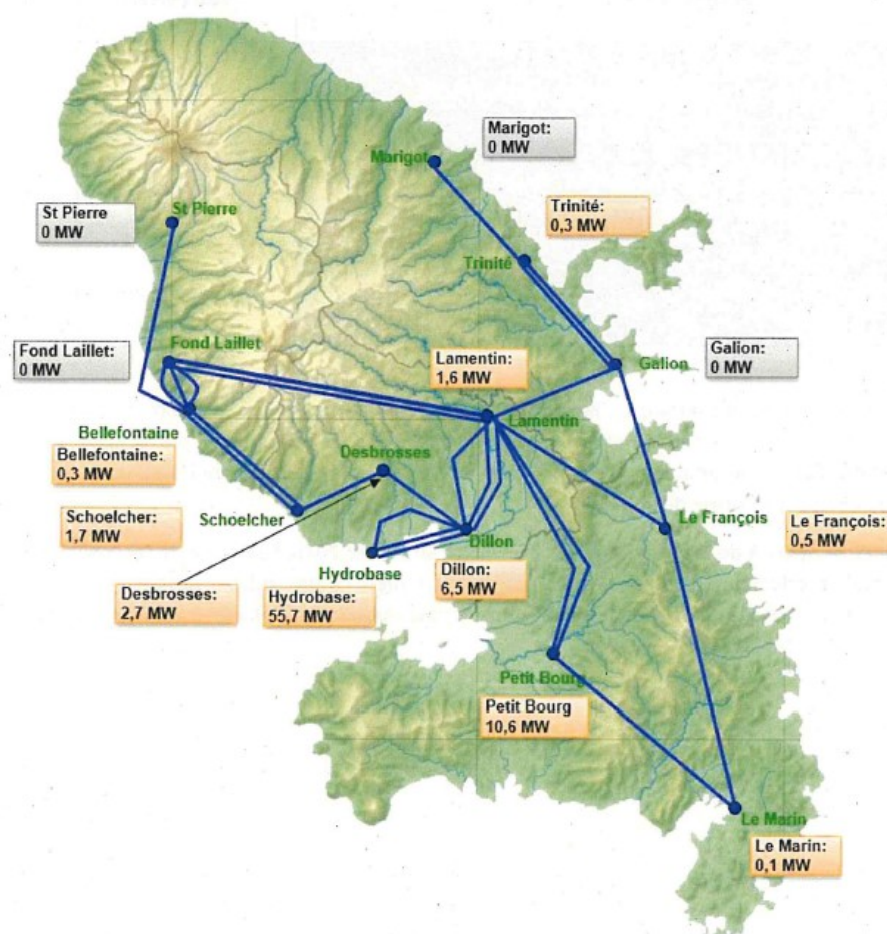


Figure 73 Capacités résiduelles (MW) du S2REnR en cours, sur les postes du littoral, pour le raccordement d'EMR, au 01/05/2023 à la Martinique (Source : EDF SEI)

A l'exception d'Hydrobase et de Petit Bourg, aucun poste n'est en mesure d'absorber la puissance unitaire d'une seule turbine⁶⁶. Aussi, des travaux de renforcement seront nécessaires. **Nous avons ici choisi de ne pas tenir compte de cette contrainte.** Pour rappel, les contraintes de raccordement en mer ont été prises en compte dans l'estimation du potentiel technique exploitable.

⁶⁵ https://www.martinique.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/s2renr_martinique.pdf

⁶⁶ Les trois éoliennes flottantes du parc « Provence Grand Large », installées fin 2023, ont une puissance unitaire de 8MW.

3.8 Paysage et patrimoine

Il n'existe pas de limite technique ou réglementaire imposant une distance minimale à la côte, comme évoqué au point 2.1.4. Aussi, les enjeux « paysage et patrimoine » présentés dans la carte ci-dessous n'ont pas été pris en compte à ce stade pour la définition des zones à éviter.

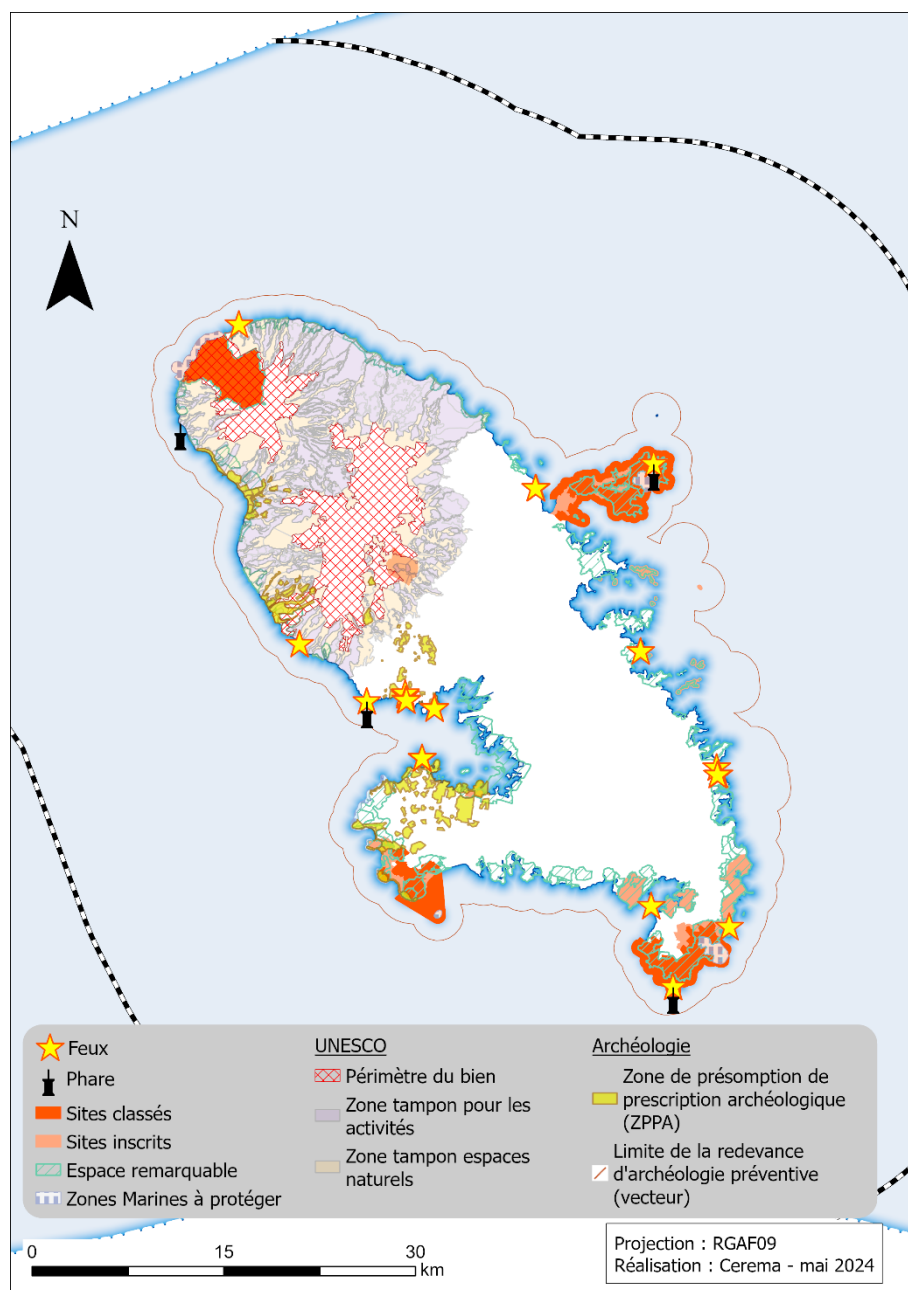


Figure 74 Enjeux « Paysage et patrimoine » à la Martinique

3.9 Croisement des enjeux et du potentiel

3.9.1 Éolien en mer

La carte ci-dessous présente les zones à éviter pour l'éolien en mer, en combinant les zones ZICO, la zone de tir, les principaux secteurs de pêche professionnelle, les enjeux de sécurité et de sûreté maritimes, les zones de protection radar, et les servitudes aéroportuaires.

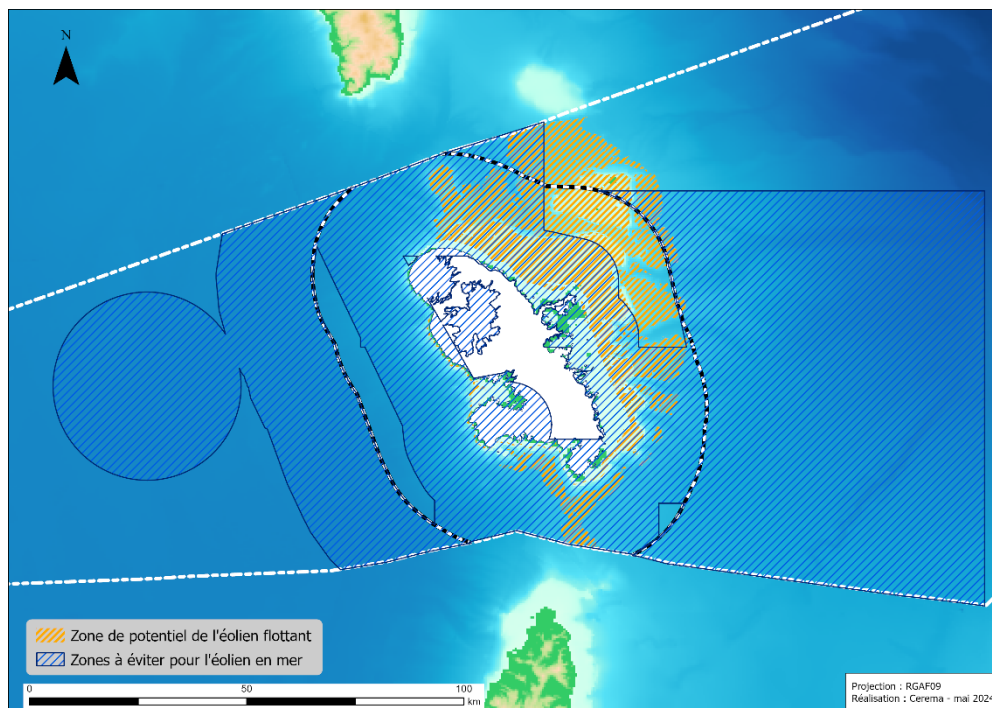


Figure 75 Zones à éviter pour le développement de l'éolien en mer à la Martinique

La loi « APER »⁶⁷ de 2023 prévoit que les 4 Documents stratégiques de façade (DSF) pour l'hexagone comprennent une cartographie des zones éoliennes en mer. Les zones doivent être « ciblées en priorité » dans la zone économique exclusive (ZEE). De plus, le régime juridique est différent en mer territoriale et en ZEE, en particulier concernant les autorisations nécessaires et la fiscalité⁶⁸, mais aussi par exemple sur les règles de navigation applicables. La présente étude distingue ainsi les zones en mer territoriale et celles en ZEE.

Deux zones à privilégier se dégagent au Nord-Est pour le développement de l'éolien en mer :

- une de 430 km² située en mer territoriale,
- une de 270 km² située en zone économique exclusive.

Elles bénéficient d'une vitesse moyenne du vent homogène et favorable, comprise entre 7 et 7.5 m/s. Il convient ensuite de les distinguer en fonction de leur bathymétrie et de la distance à la côte.

A titre d'illustration, voici les distances minimales à la côte des projets français en cours et à venir :

• Courseulles-sur mer :	10 km	• Saint Brieuc :	16 km
• Dunkerque :	10 km	• Bretagne Sud (flottant) :	20 km
• Saint Nazaire :	12 km	• Méditerranée (flottant) :	25 km
• Fécamp :	12 km	• Sud Atlantique :	30 km
• Ferme pilote PGL (flottant) :	14 km	• Centre-Manche 1 :	33 km
• Dieppe-Le Tréport :	15.5 km	• Centre-Manche 2 :	44 km

⁶⁷ Loi n° 2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables

⁶⁸ https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2021/09/2021-09_Eolien_mer_Sud_Atlantique_DMO_Fiche19.pdf

3.9.1.1 Mer territoriale

En mer territoriale, cinq zones à privilégier ont été identifiées pour le développement de l'éolien en mer. Le tableau ci-dessous présente le détail de chaque zone.

Tableau 15 Zones à privilégier pour le développement de l'éolien en mer territoriale

Bathymétrie	Numéro	Surface (km ²)	Puissance indicative (MW) (5 à 10 MW/km ² ⁶⁹)	Distance à la côte (km)	Avantages	Inconvénients
- 40 m - 100 m	MT1	88	440 à 880 MW	15	Éloignement > 15 km Bathymétrie favorable	Raccordement au-delà du plateau continental
	MT2	5	25 à 50 MW	10	Bathymétrie favorable	Surface très limitée Distance à la côte
	MT3	26	130 à 260 MW	10	Surface adaptée Bathymétrie favorable	Distance à la côte
- 100 m - 500 m	MT4	164	820 à 1 640 MW	10	Surface importante	Forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental
- 500 m - 1 000 m	MT5	150	750 à 1 500 MW	15	Surface importante Éloignement > 15 km	Très forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental

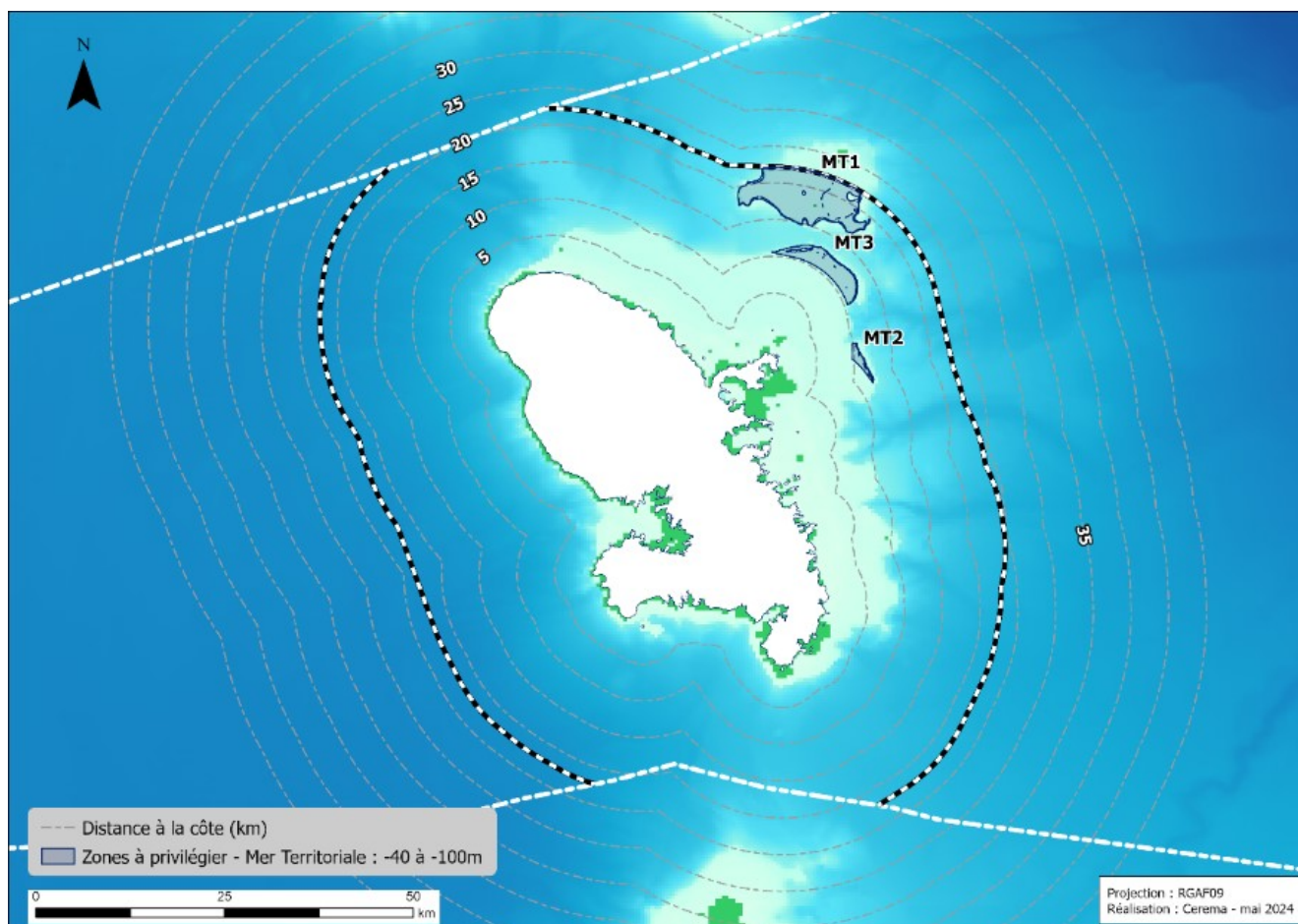


Figure 76 Zones à privilégier pour l'éolien en mer situées en mer territoriale, avec une bathymétrie entre -40 et -100m

⁶⁹ Voir 2.1.2.6 pour les hypothèses de densité énergétique

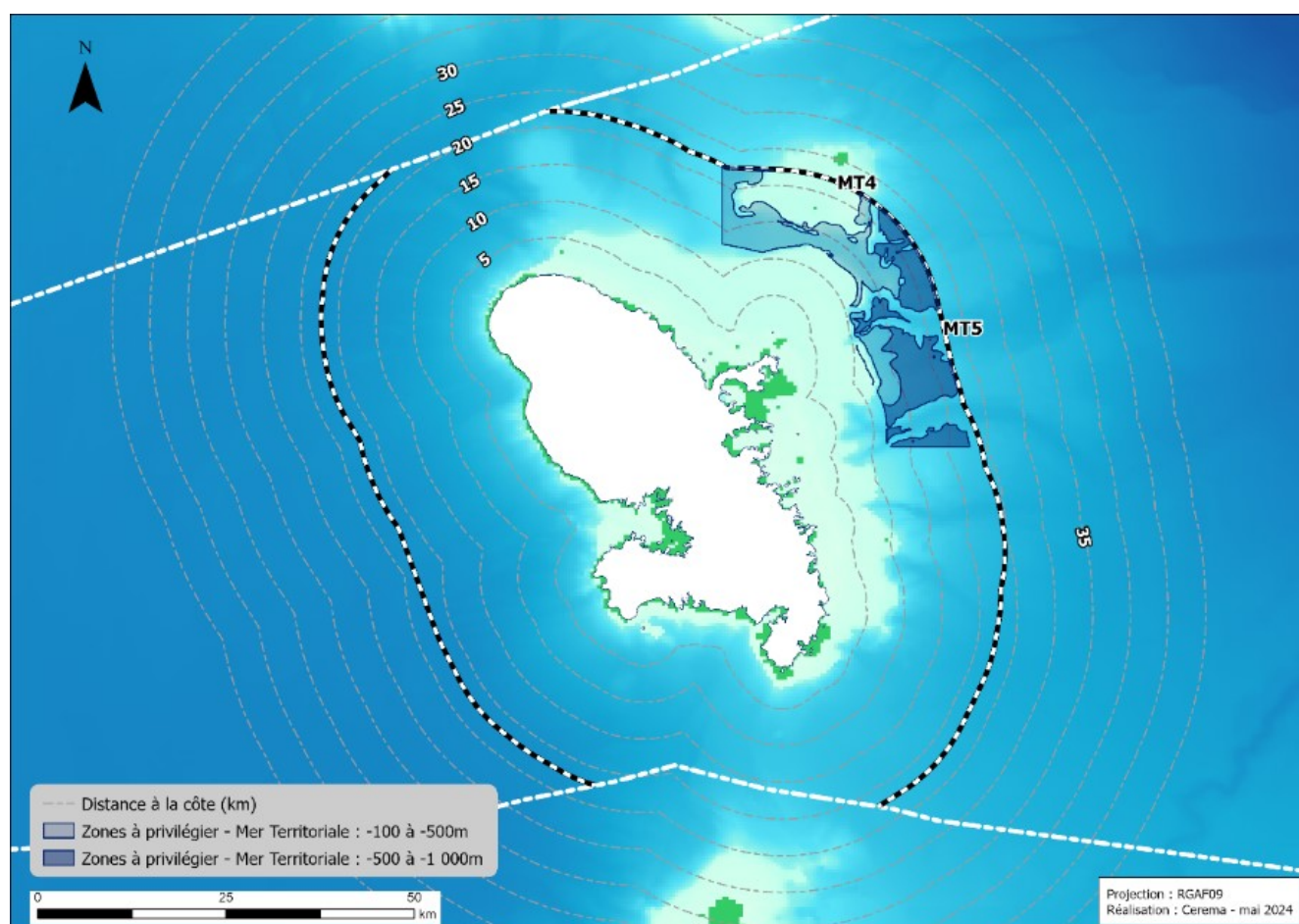


Figure 77 Zones à privilégier pour l'éolien en mer situées en mer territoriale, avec une bathymétrie entre -100 et -1 000m

3.9.1.2 Zone économique exclusive

En zone économique exclusive (ZEE), trois zones à privilégier ont été identifiées pour le développement de l'éolien en mer. Il est à noter que la réglementation de la ZEE⁷⁰ est en cours d'évolution afin de faciliter l'implantation d'EMR en son sein.

Le tableau ci-dessous présente le détail de chaque zone.

Tableau 16 Zones à privilégier pour le développement de l'éolien en ZEE

Bathymétrie	Numéro	Surface (km ²)	Puissance indicative (MW) (5 à 10 MW/km ² ⁷¹)	Distance à la côte (km)	Avantages	Inconvénients
- 40 m - 100 m	ZEE1	34	170 à 340 MW	24	Surface adaptée Éloignement > 24 km Bathymétrie favorable	Raccordement au-delà du plateau continental
- 100 m - 500 m	ZEE2	39	195 à 390 MW	24	Surface adaptée Éloignement	Forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental
- 500 m - 1 000 m	ZEE3	195	975 à 1 950 MW	24	Surface importante Éloignement	Très forte profondeur Raccordement au-delà du plateau continental

⁷⁰ <https://www.eoliennesenmer.fr/generalites-eoliennes-en-mer/cadre-reglementaire>

⁷¹ Voir 2.1.2.6 pour les hypothèses de densité énergétique

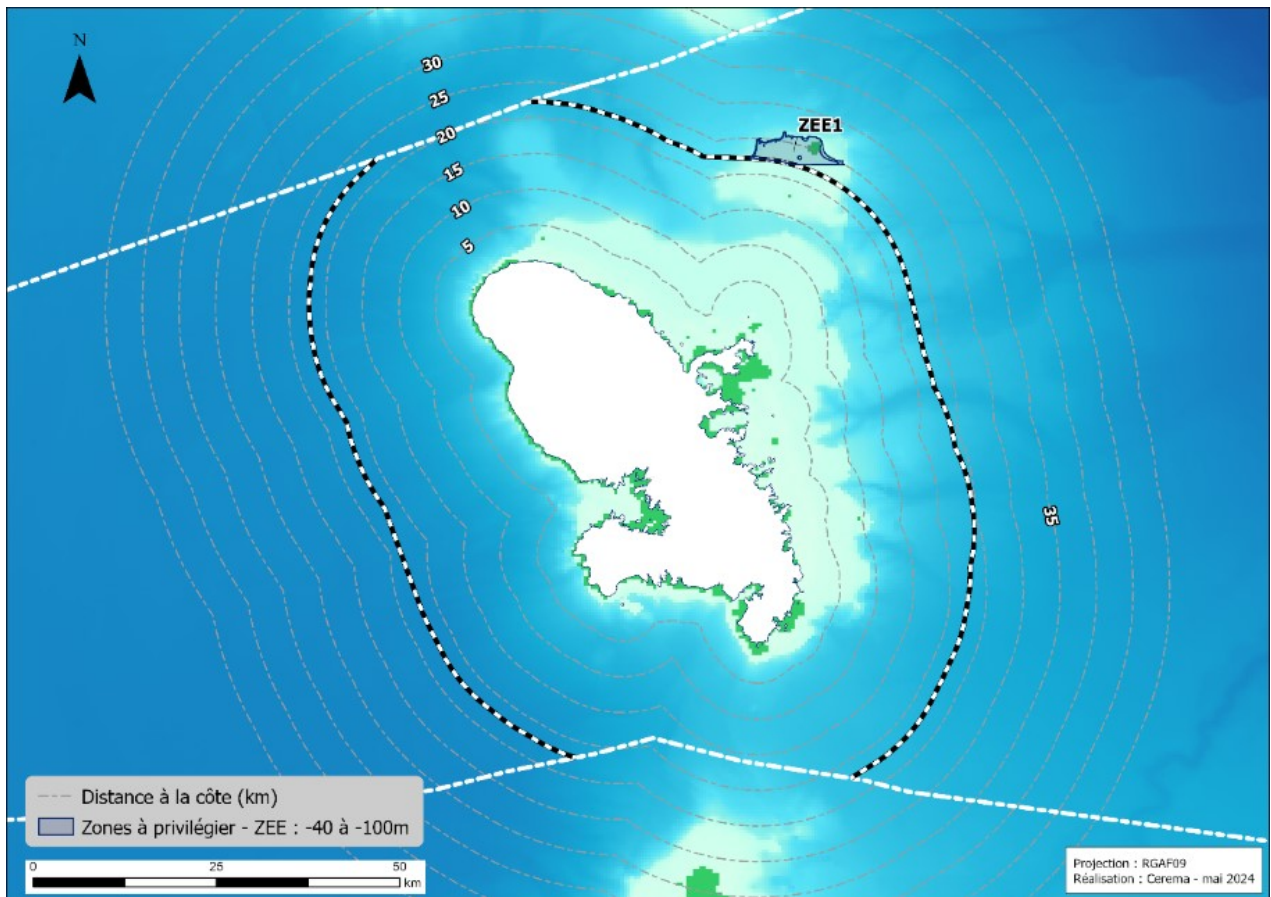


Figure 78 Zones à privilégier pour l'éolien en mer situées en ZEE, avec une bathymétrie entre -40 et -100m

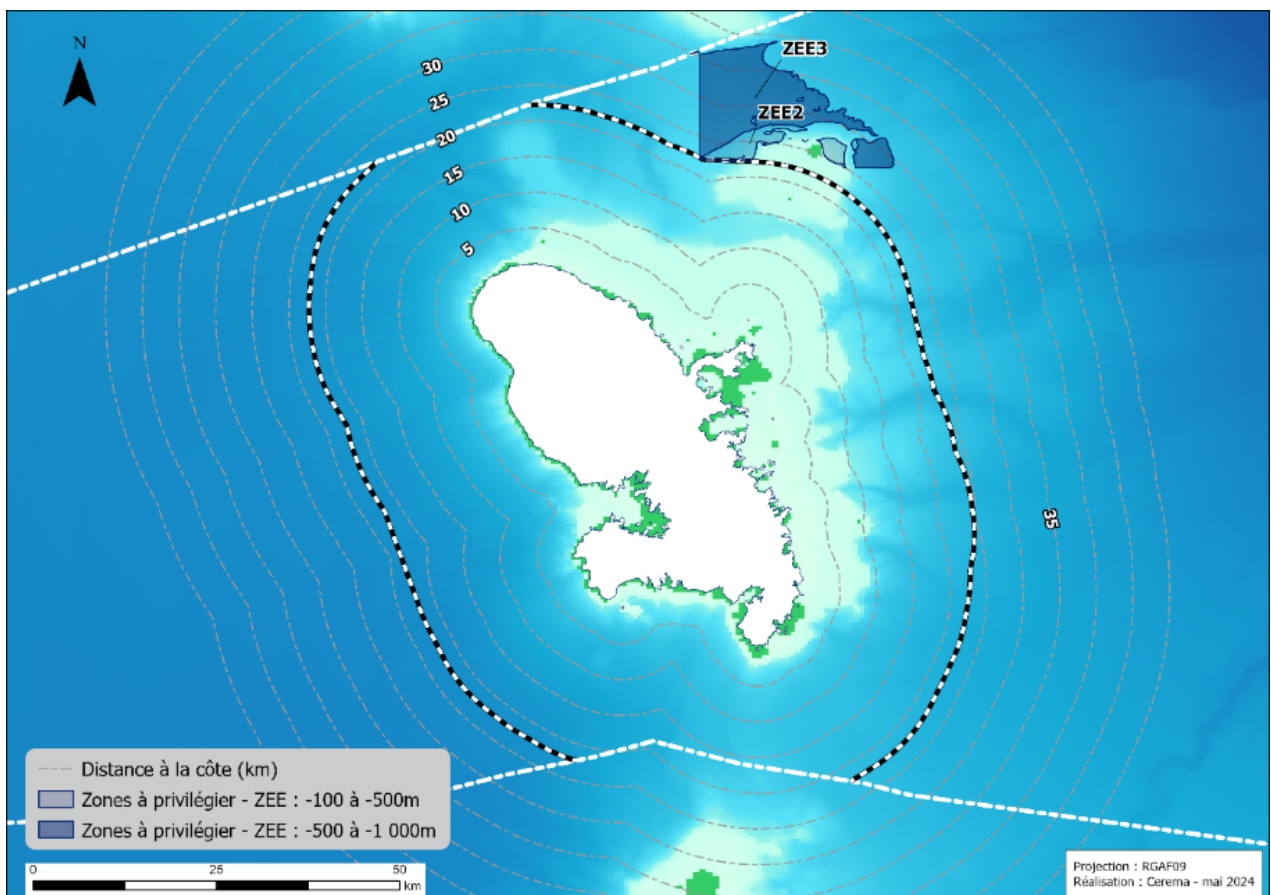


Figure 79 Zones à privilégier pour l'éolien en mer situées en ZEE, avec une bathymétrie entre -100 et -1 000m

3.9.2 Houlomoteur

La carte ci-dessous présente les zones à éviter pour les systèmes houlomoteur, en combinant la zone de tir, les principaux secteurs de pêche professionnelle et les enjeux de sécurité et de sûreté maritimes.

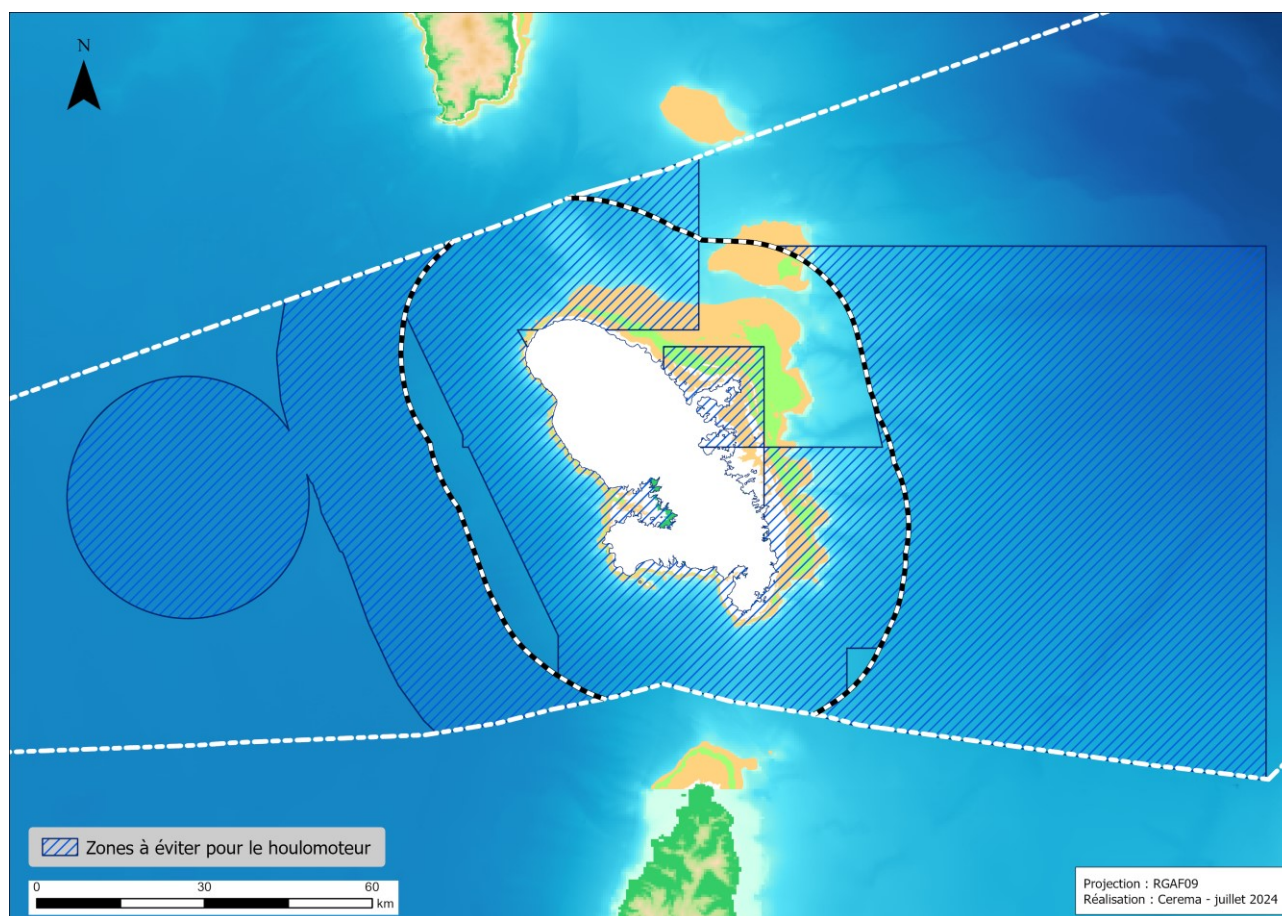


Figure 80 Zones à éviter pour le développement des systèmes houlomoteurs à la Martinique

Un travail plus précis devra toutefois être conduit sur l'activité de pêche professionnelle, en lien avec les acteurs de la filière. Les données actuellement disponibles à l'échelle d'un secteur statistique de 10 x 10 km ne permettent pas de spatialiser finement l'activité ni de connaître la technique utilisée.

De plus, les technologies de récupération de l'énergie de la houle sont très diverses et chacune a des contraintes propres notamment en termes de bathymétrie et de nature des fonds marins selon que le système soit simplement ancré ou qu'une partie du dispositif soit posée sur le fond.

Ainsi, aucune zone précise n'est ici identifiée. La carte ci-dessous présente les zones à privilégier pour le développement de projets houlomoteurs, sous réserve du potentiel physique suffisant.

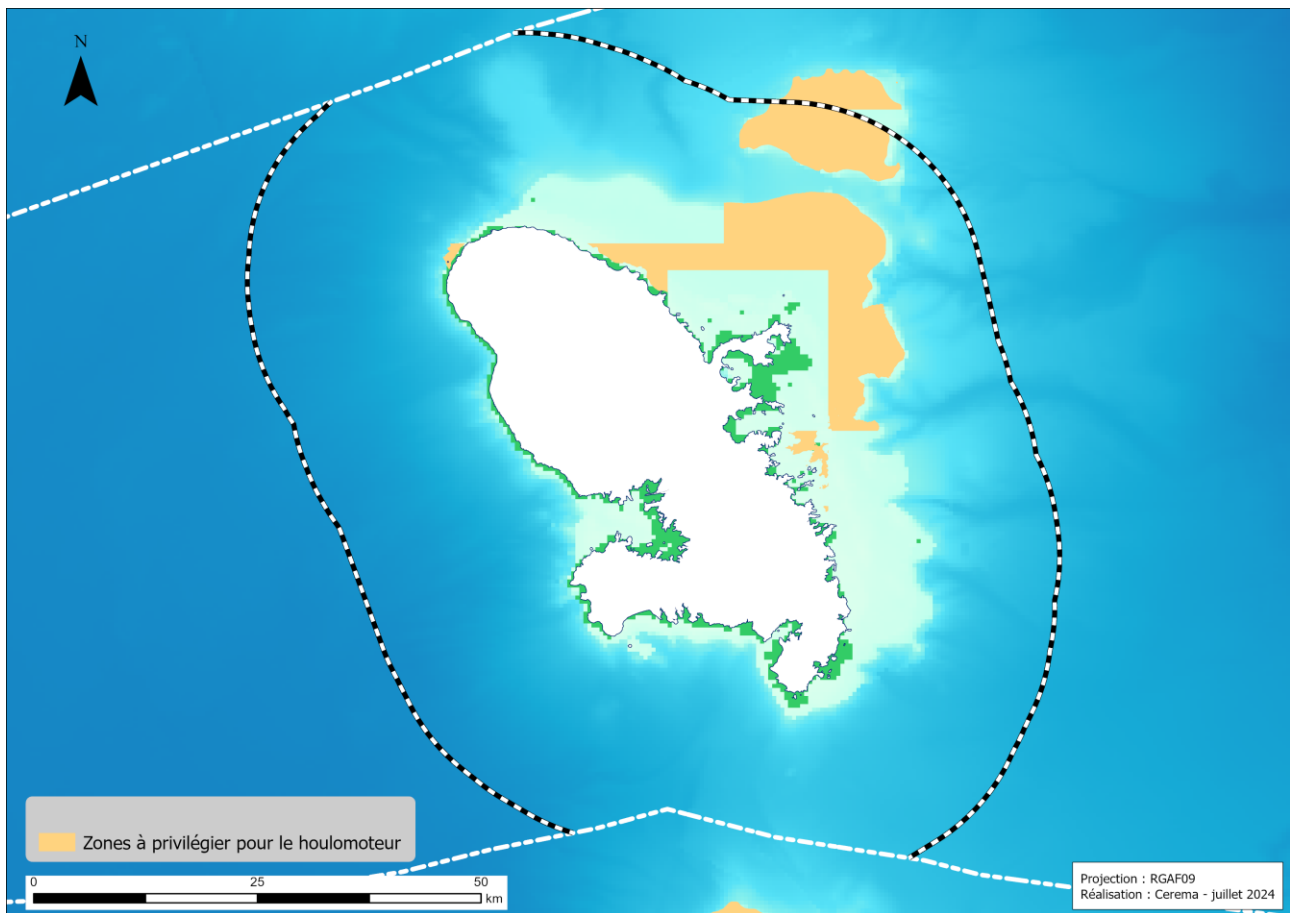


Figure 81 Zones à privilégier pour le développement des systèmes houlomoteurs, avec une bathymétrie entre -20 et -130m

4 IDENTIFICATION DES CAPACITES PORTUAIRES ET INDUSTRIELLES

Le développement des énergies marines renouvelables sur un territoire est intrinsèquement lié aux capacités portuaires et industrielles disponibles sur place et plus largement dans la sous-région géographique. Les ports jouent ainsi un rôle incontournable pour accélérer l'industrialisation et le déploiement des EMR.

En France, la stratégie nationale portuaire (SNP) adoptée en janvier 2021 met en exergue l'impératif de développer de nouveaux relais de croissance portuaires en lien avec la transition énergétique.

Dans cette partie, une analyse des deux principaux ports des Antilles françaises est réalisée sur la base d'un questionnaire et d'entretiens afin d'identifier les moyens en place permettant, ou non, de répondre au processus de mise en œuvre d'un projet EMR au travers de la chaîne de valeur.

Un regard est également posé sur les ports à l'échelle de la Caraïbes.

4.1 Infrastructure portuaire nécessaire

L'industrialisation des turbines et des fondations pour l'éolien posé est un sujet déjà bien maîtrisé et des usines ou centres de productions, en particulier de pales et de nacelles, sont implantés dans l'hexagone.

L'éolien flottant est à un stade de maturité moins avancé. En France, une première ferme pilote – Provence Grand Large - est opérationnelle depuis 2023 et un premier parc commercial vient d'être attribué au large de la Bretagne Sud.

4.1.1 Cahier des charges des infrastructures portuaires nécessaires

Dans le monde, il n'existe aujourd'hui pas d'infrastructures de production à même de fournir le marché conséquent de l'éolien flottant à venir. Par ailleurs, pour l'éolien flottant, les enjeux d'industrialisation, en termes de taille, de masse et de complexité des structures sont différents. L'absence de convergence et d'identification d'un optimum technico-économique rend difficile la détermination d'un cahier des charges « type » que devrait respecter un port en termes d'infrastructures minimales nécessaires.

En 2022, le Cerema a réalisé une cartographie⁷² de 11 ports français pré-identifiés comme capables de capter une partie de la chaîne de valeur : Port La Nouvelle, Sète et Fos en Méditerranée, Bordeaux, Brest, Cherbourg, Dunkerque, Le Havre, Lorient, La Rochelle et Saint-Nazaire sur les façades Atlantique et Manche.

Un cahier des charges a ainsi été défini en lien avec France Energie Eolienne (devenu France Renouvelables) et les ports interrogés, pour permettre la construction d'un parc flottant de 500MW en 1 saison (40 éoliennes de 12MW)

Tableau 17 Tableau récapitulatif des surfaces - infrastructures portuaires minimales pour construire un parc éolien flottant de 500MW en 1 saison (40x12MW)

Stockage éléments flotteurs	Montage des flotteurs	Stockage à terre des flotteurs	Stockage sous-ensemble turbines	Assemblage des turbines	Total
4 à 8 ha	8 à 16 ha	0 à 20 ha	7 à 14 ha	1 à 2 ha	<u>20 à 60 ha</u>

Une surface de 5 ha est également nécessaire pour le stockage et la préparation des lignes d'ancrage.

⁷² N. Ferrellec, « Le développement de l'éolien flottant, cartographie des ports français », Cerema, juin 2022

Tableau 18 Tableau récapitulatif des quais - infrastructures portuaires minimales pour construire un parc éolien flottant de 500MW en 1 saison (40x12MW)

Réception Éléments de flotteurs + Éléments de turbines	Mise à l'eau	Commissioning flotteur nu	Intégration à quai + Pré-commissioning
160-200m x 8-12m – 10t/m ² + 150-200m x 8m - 10t/m ²	100-150m 4x60m - 30-35 t/m ²	100-150m x 8-10m - 6t/m ²	250m x 10-14m 60x60m - 30 t/m ² + 250m x 10-14m

Pouvoir techniquement capter toute la chaîne de valeur signifie d'engager des investissements conséquents suffisamment tôt, et tout particulièrement concernant les quais lourds nécessaires aux intégrations de turbine à quai.

En raison des infrastructures et des espaces importants nécessaires pour la construction d'un parc complet, le recours à plusieurs ports pour différentes phases d'un même projet est envisagé. Ainsi, la construction et l'assemblage des flotteurs pourraient se faire dans un même port, puis l'assemblage et l'intégration de la turbine dans un autre port qui assurerait également le stockage temporaire avant remorquage et installation en mer. Ces ports devront idéalement se situer à proximité des futurs parcs éoliens flottants afin de limiter la durée de l'installation en mer.

« Lorsque les développeurs sont confrontés à des capacités insuffisantes des ports et chantiers régionaux, il leur est possible de compléter leur approvisionnement en fondations dans les ports plus éloignés [...]. Une fois montée sur sa fondation flottante, l'éolienne doit être remorquée au rythme maximum de 2 à 3 noeuds jusqu'à sa zone d'exploitation. A une telle vitesse, il est dangereux de déplacer l'ensemble flottant sur de grandes distances d'une traite, car la météo ne peut être précisément anticipée que sur trois jours. La limite de 400km ne constitue donc pas un seuil absolu de faisabilité technique : il s'agit néanmoins de la distance maximum privilégiée par les développeurs des parcs pour limiter les risques opérationnels et les coûts des remorquages. »⁷³

4.1.2 Expérience des fermes flottantes pilotes

L'expérience des fermes pilotes en cours de construction en Méditerranée montre toutefois qu'un port peut s'adapter à ces chantiers plus modestes (3 turbines) en mobilisant des infrastructures plus limitées.

Ainsi par exemple, le port de Fos a accueilli la fabrication des 3 flotteurs de « Provence Grand Large » pour 3 éoliennes de 8MW. Des adaptations des infrastructures ont été nécessaires, mais ce sont des modifications passagères. Le port considère d'ailleurs que le schéma du projet pilote ne pourra pas fonctionner pour les futures fermes commerciales qui nécessiteront des infrastructures dédiées.

Un quai du terminal céréalier (Gloria) a été mutualisé pour permettre l'intégration des turbines sur 4 hectares. Une réduction d'une bande de convoyeur a été nécessaire, ainsi qu'un renforcement du quai à 30 t/m² sur 2 bandes de roulement de 3m sur 20m.



Figure 82 Intégration de la turbine sur le flotteur - ferme pilote Provence Grand Large (Source EDF Renouvelables)

Le stockage à quai des flotteurs s'est fait au bout du terminal à conteneurs sur des quais « classiques » ne nécessitant pas de renforcement spécifique, grâce à un « jeu de chaises musicales » entre les flotteurs qui passent du terminal conteneurs au terminal céréalier pour l'intégration. Une fois la turbine intégrée, l'ensemble a été remorqué jusqu'au site d'implantation en mer.

⁷³ Etude sur le développement de l'industrie de l'éolien flottant et sur les infrastructures portuaires nécessaires à son développement, Rapport d'étude PWC pour l'ADEME, mars 2023

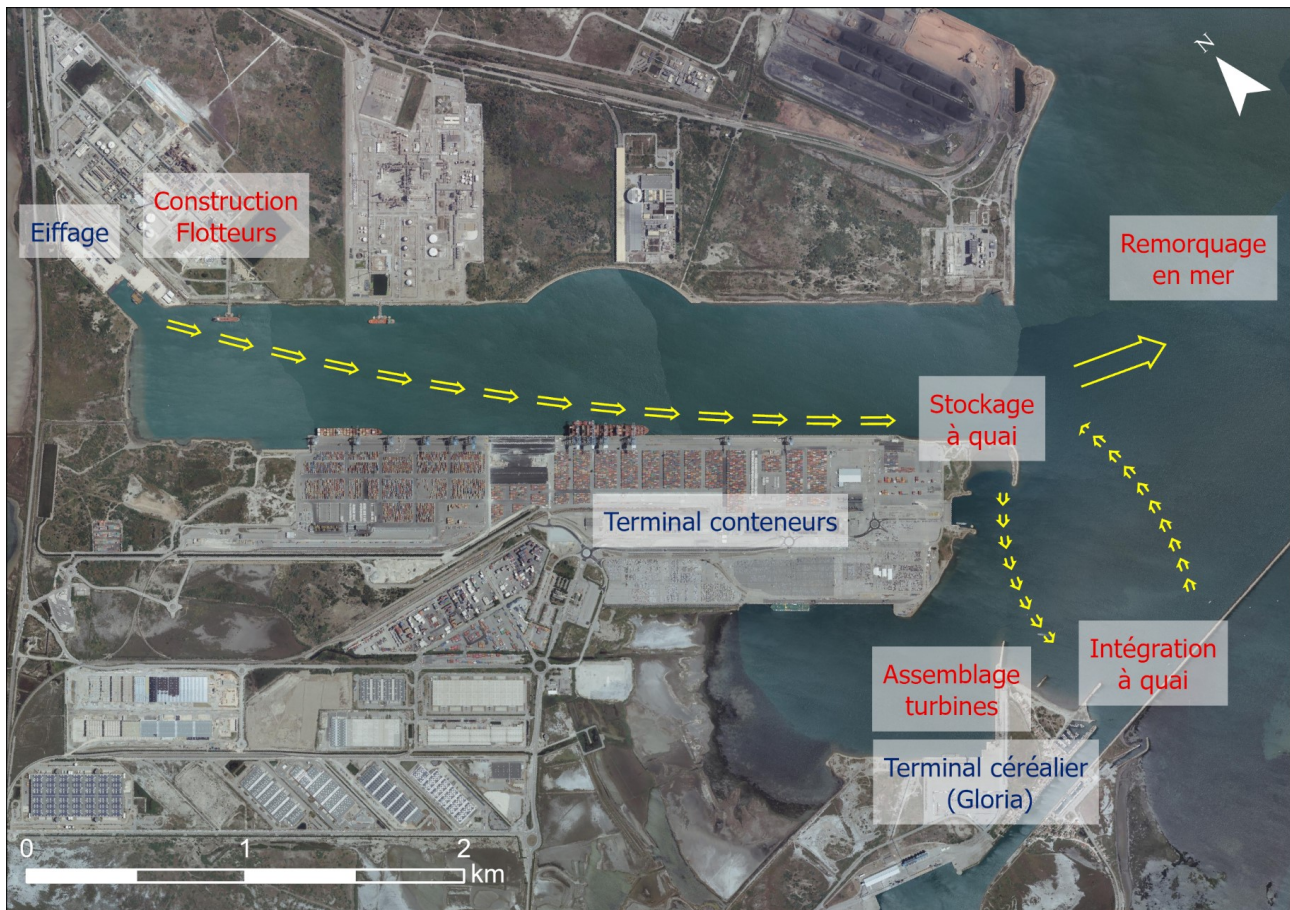


Figure 83 Plan d'exécution pour le ferme pilote flottante Provence Grand Large (Source – Cerema)

Une autre ferme pilote, composée de trois flotteurs de type « barge » en béton, est en cours de construction à Port-la-Nouvelle. Elle occupe pour l'instant un espace réduit et le port continue de développer ses espaces pour accueillir les futurs parcs commerciaux qui seront 10 à 20 fois plus grands.



Figure 84 Flotteurs d'éoliennes en béton en cours de construction à Port-la-Nouvelle (Source – Euroports)

4.2 Grand port maritime de la Martinique (GPMLM)

Implanté à l'Est de la ville de Fort-de-France, le port connaît un grand tournant lorsque celle-ci devient la capitale administrative, militaire et politique de la Martinique en 1692. Grâce à la présence de la Compagnie générale Transatlantique, de nombreux emplois sont créés, le trafic de passagers inter-îles et les échanges commerciaux sont importants, et toute l'activité est centralisée dans la rade de Fort-de-France.

L'année 1902 est marquée par l'éruption de la montagne Pelée, détruisant la ville de Saint Pierre, ce qui renforce la position stratégique de Fort-de-France.

A partir de 1953, la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Martinique (CCIM) prend en charge la concession du port et investit dans des infrastructures plus appropriées faisant évoluer les modes de manutention, de mécanisation et d'automatisation. Par ailleurs, le port s'agrandit à la fin des années 90. Il accueille ainsi ses premiers porte-conteneurs à la Pointe des Grives en 2003.

Enfin, en 2013, la concession se termine et laisse place à la création d'un établissement public autonome. Le port de Fort-de-France devient alors le Grand Port Maritime de La Martinique (GPMLM).

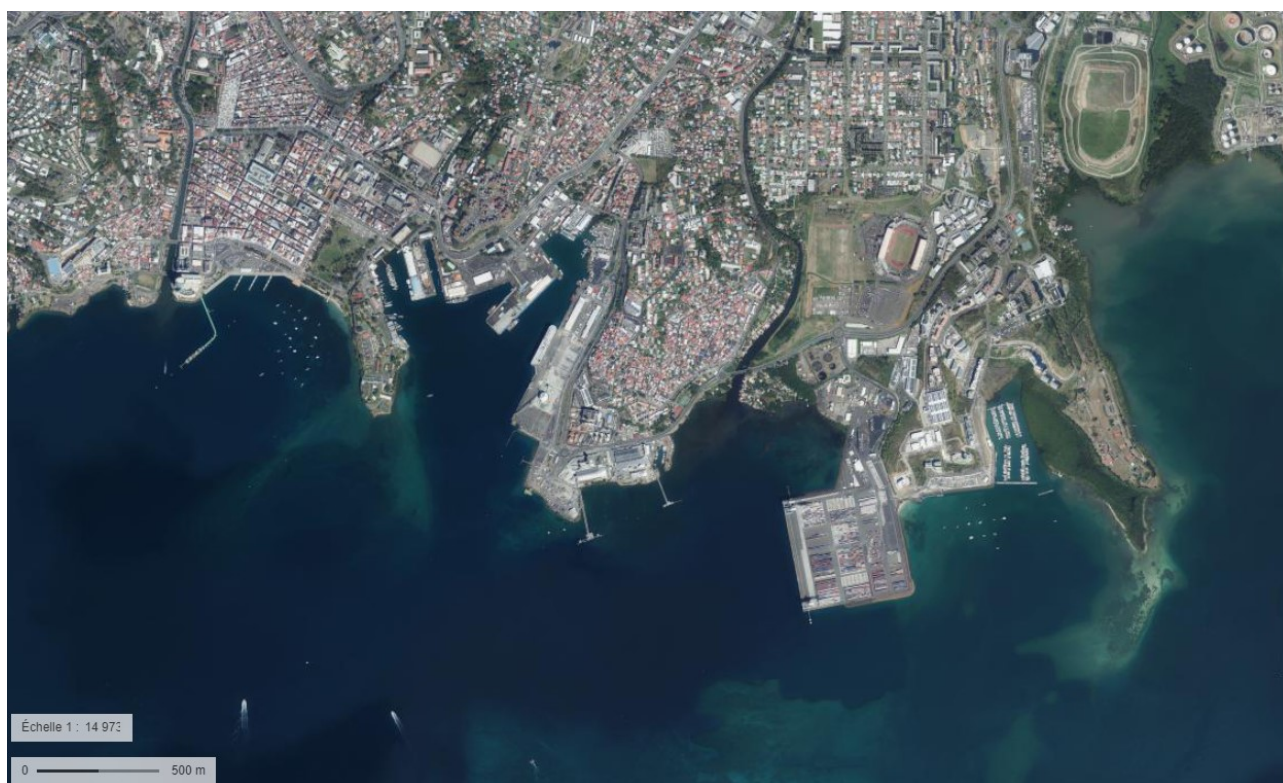


Figure 85 Vue aérienne du Grand Port Maritime de La Martinique (Source : Géoportail)

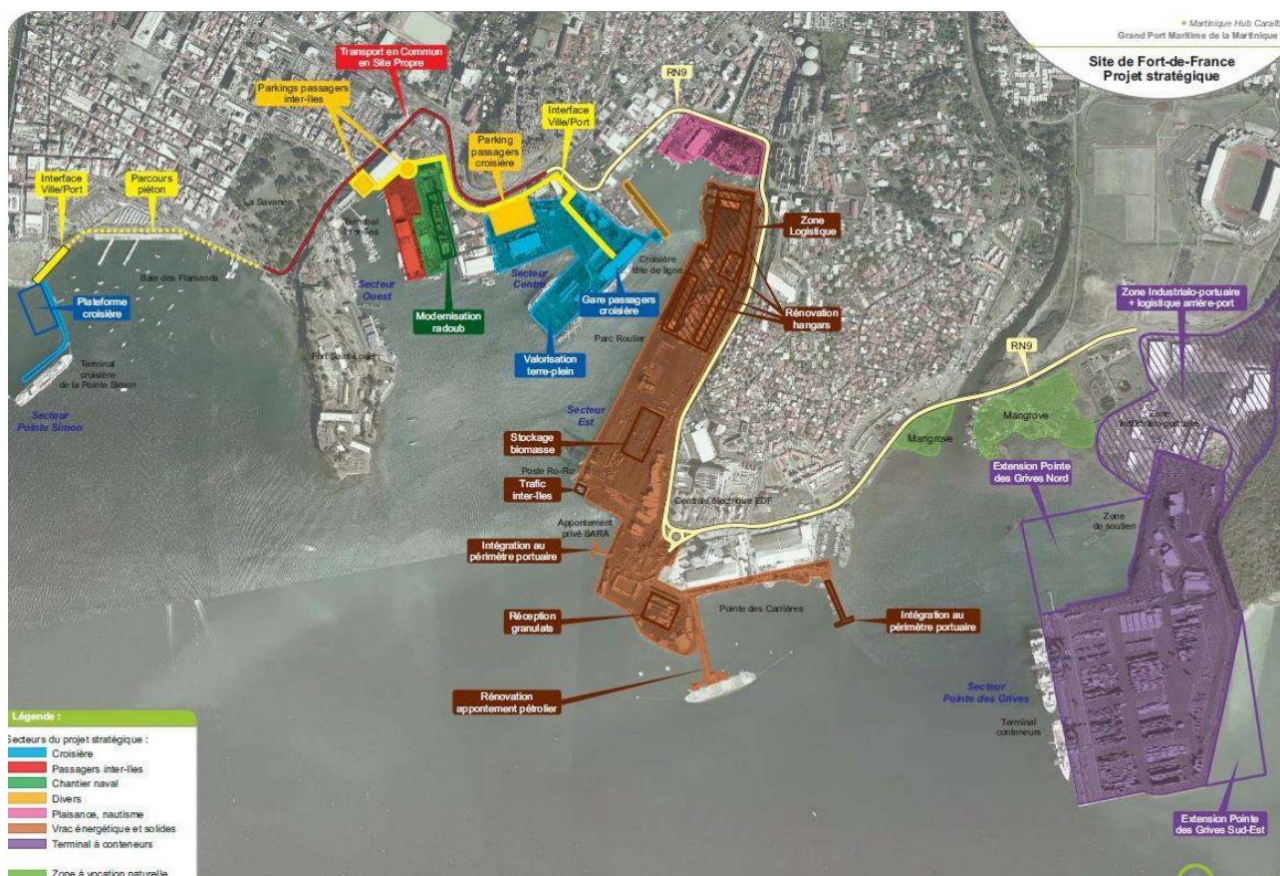


Figure 86 Carte détaillée du port de Fort-de-France (Source : projet stratégique du GPMLM)

4.2.1 Les trafics principaux

Le Grand Port Maritime de La Martinique est un port polyvalent dont le trafic est assez diversifié.

En 2016, il était le 13^{ème} port français en tonnage (3,1 millions de tonnes traitées), et 7^e pour l'activité conteneurs (153 453 EVP). Il est le 55^e port de la zone Amérique Latine-Caraïbes.

L'essentiel de ce trafic concerne l'import-export/ export de conteneurs, l'import de pétrole brut, et l'import-export de produits pétroliers. D'autres trafics (céréales, engrais, clinker, roulier...) sont présents, pour des flux faibles. Les exportations vers l'Hexagone, la Guadeloupe et la Guyane représentent plus de 90 % des exportations de la Martinique.

En 2023, trois grandes filières composent les tonnages du port (3,3 millions de tonnes)⁷⁴:

- Des marchandises diverses (50%) telles que des conteneurs (187 000 EVP) de fruits et de poissons pour la majorité ;
- Vrac liquide (39%) dont 32% de produits pétroliers à destination de la Guadeloupe et de la Guyane du fait de la présence de la raffinerie SARA, et 7% d'import EDF (Bellefontaine + FdF) ;
- Vrac solide (11%) dont le clinker et le gypse, la biomasse, l'engrais, les céréales (blé, nourriture animale, soja), du bois et des déchets ;

Le port a également accueilli 400 000 croisiéristes au cours de 173 escales, et 160 000 passagers inter-îles.

⁷⁴ <https://www.martinique.port.fr/detail-actualites.aspx?card=8112>

4.2.2 Les infrastructures et industries présentes sur le port

Le port dispose d'une surface foncière totale de 64 hectares, mais **la surface disponible ne dépasse pas 1 hectare en l'état actuel des occupations domaniales**. Ce foncier portuaire a notamment été acquis par la création du terminal à conteneurs avec ses 25 hectares.

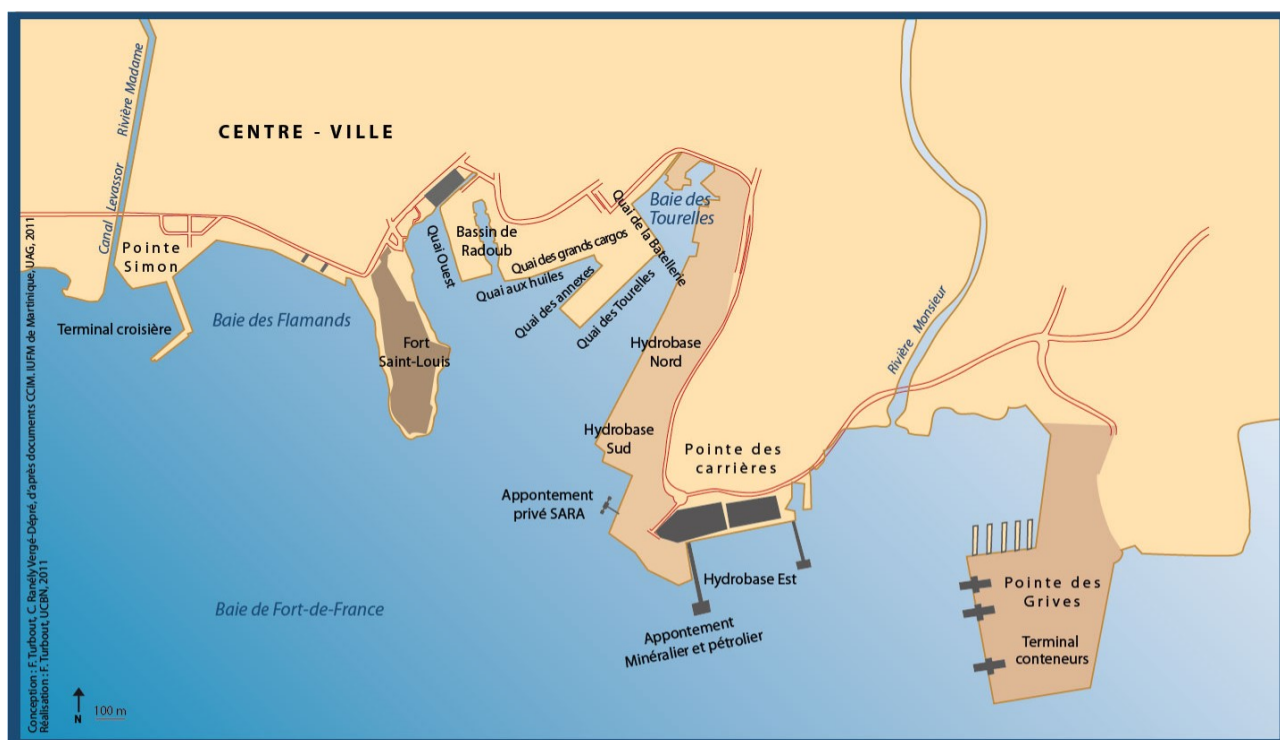


Figure 87 Installations du port de Fort-de-France (Source : Atlas Caraïbes)

Le tirant d'eau maximal à l'appontement de la pointe des carrières (appontement minéralier et pétrolier) est de 15 mètres et de 13 mètres au niveau de la Pointe des Grives (conteneurs). Ainsi, le GPMLM permet aux navires d'accéder au port, de s'amarrer et de circuler en toute sécurité. Le marnage est globalement faible puisqu'il ne dépasse pas un mètre. De plus, la baie de Fort-de-France est naturellement abritée de la houle et des vagues ce qui est à son avantage. A noter que les périodes cycloniques n'épargnent cependant aucunement la zone. En termes de conditions de vent, généralement le vent dominant provient du secteur NE-ENE avec des vitesses entre 18,5 et 46,3 km/h hors événement cyclonique.

Un chenal d'au moins 20 mètres de profondeur et d'au moins 400 mètres de large est naturellement présent dans la baie de Fort-de-France ce qui limite le dragage. Les sols sont de nature sableux-vaseux avec des roches de type sédimentaires et de nombreux coraux.

Concernant les quais à disposition, il y a notamment le quai "Hydrobase" et celui des "Grands Cargos" avec une surface 1 000 m² chacun. L'espace réservé au stockage à terre ne dépasse pas 1 hectare et le stockage en mer est inexistant.

Les capacités de mise à l'eau sont diverses. Il y a notamment le poste RoRo doté d'une rampe de 15 mètres à l'Hydrobase, une grue routière pouvant supporter jusqu'à 300 tonnes ainsi qu'une barge multi-catégories de la SOMARA. De plus, sur le terminal à conteneurs de la Pointe des Grives sont également présents trois portiques à conteneurs post-panamax de 40 tonnes de levage et 70 tonnes aux crochets.



Figure 88 Vue aérienne du terminal de l'Hydrobase (Source : Géoportail)

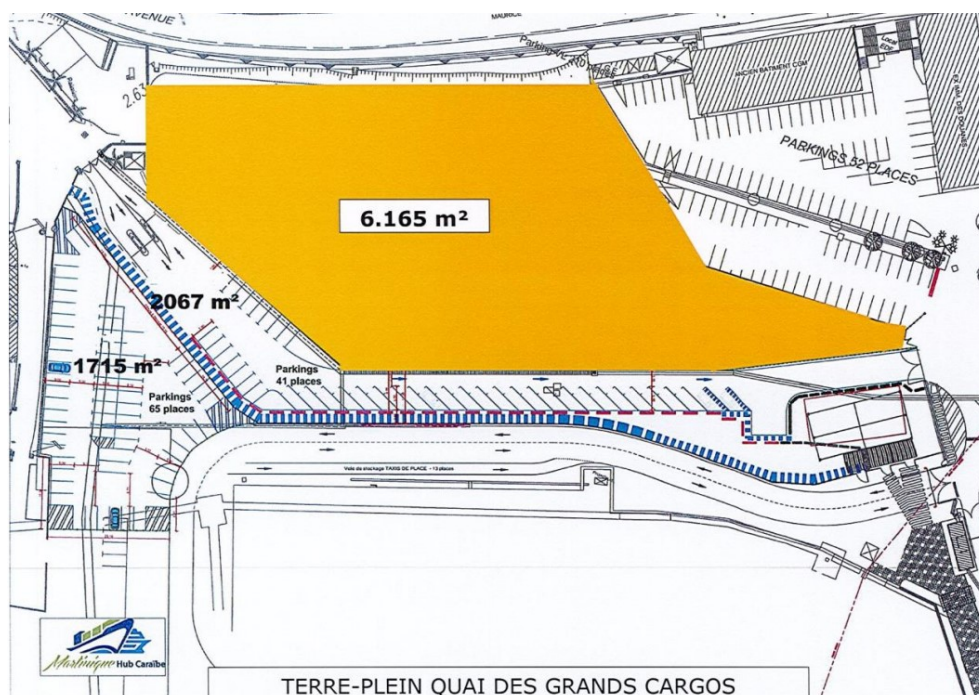


Figure 89 Plan du quai des « Grands Cargos » (Source : Grand Port Maritime de la Martinique)

4.2.2.1 Énergies renouvelables

Le Grand Port Maritime de La Martinique ne dispose pour l'instant pas de stratégie spécifique aux énergies marines renouvelables. Le projet stratégique 2020-2024 est articulé autour de trois axes : devenir un port entrepreneur (créateur de valeurs économiques), citoyen (porteur de valeurs sociales et sociétales) et vert (acteur de la transition énergétique).

En mars 2018, sept éoliennes terrestres de type Vestas V100 (2 MW unitaire) ont été acheminées d'Europe, principalement d'Italie et d'Espagne, jusqu'au port de Fort-de-France. Le matériel, dont les pales de 49 m, a été déchargé en morceaux puis stocké provisoirement sur la plateforme de transit avant d'être transféré par barge vers le port de Grand Rivière. Le parc éolien de 14 MW a ainsi été mis en service fin 2018.

Par ailleurs, un nouveau parc éolien est en cours de construction depuis 2022 sur la commune de Macouba, limitrophe de celle de Grand Rivière. Situé sur les premières pentes de la montagne Pelée, le parc de 24 MW se composera de six éoliennes de type Vestas V136 adaptées aux conditions cycloniques. En effet, elles seront capables de résister à des vents allant jusqu'à 250 km/h, ce qui est l'équivalent d'un ouragan de catégorie 5, et seront également dotées d'un système anticyclonique automatique (yaw power back up system) orientant les pales afin de limiter leur prise au vent.

Les infrastructures et matériels, dont les pales de 76m, sont arrivés par la mer jusqu'au port de Fort de France et devront ensuite prendre la route en convoi exceptionnel sur plus de 65 km pour rejoindre la commune de Macouba.



Figure 90 Déchargement des pales des éoliennes terrestres sur le port de Fort-de-France en 2018 (Source : JDL Groupe)

4.2.2.2 Terminal conteneurs

En 2004, un terminal à conteneurs est inauguré à la Pointe des Grives. Il bénéficie par ailleurs d'une extension de 3 hectares de terre-pleins lui permettant d'atteindre une surface totale de 16 hectares en 2017. Ce nouveau terminal de 450 mètres de long et doté d'un tirant d'eau de 12,5 mètres, peut accueillir simultanément **deux navires de 300 et 220 mètres de long**.

Énergies renouvelables en mer

Le potentiel de développement de la Martinique

Juillet 2024



Figure 91 Vue aérienne du terminal de la Pointe des Grives (Source : Géoportail)

4.2.2.3 Pétrolier

Dans le secteur Est du port, le sous-secteur “EDF Port” réceptionne le fuel destiné à alimenter la centrale EDF par son appontement privé. De plus, un autre appontement dédié au pétro-minéralier réceptionne le pétrole brut, le clinker et les minéraux en vrac. Par ailleurs, la Société Caraïbe d’Industrie Chimique bénéficie d’un appontement privé pour le déchargement des céréales et des engrais.

Le dernier sous-secteur, baptisé Hydrobase, était, avant la mise en service de la Pointe de Grives, la zone principale de trafic de conteneurs. Aujourd’hui, avec ses **640 mètres de longueur**, il accueille le trafic de multi-vrac, de véhicules neufs et inter-îles avec la Guadeloupe. Il est équipé d’un pôle vraquier avec un silo de céréales au nord, d’un **poste roulier RoRo** permettant aux navires à rampes d’accoster, d’un silo de stockage de biomasse pour les granulés de bois, et d’installations de manutention au sud.



Figure 92 Photographie du secteur Est de l’Hydrobase (Source : Grand Port Maritime de la Martinique)

4.2.2.4 Passagers de croisière et inter-îles

La pointe Simon, située sur le front de mer de Fort-de-France, est dotée d'un terminal de croisière avec un appontement de 300m et deux postes à quai de 200 et 365m permettant d'accueillir deux « mégaship » simultanément, en réponse à la demande importante d'escales de navires de croisière (173 escales en 2023).

Le secteur "Centre" ou Quai des Tourelles, accueille le second terminal de croisière. Enfin, dans le secteur "Ouest", depuis 2010, une gare maritime accueille des liaisons inter-îles avec la Guadeloupe, la Dominique et Saint Lucie dans la baie du Carénage. Étant l'une des plus modernes de la Caraïbe, elle est capable d'accueillir simultanément deux navires de grosse capacité et 1 000 passagers. Un prix lui a par ailleurs été décerné en 2012 par Électricité France pour la féliciter de ses efforts d'économie d'énergie.



Figure 93 Photographie de la Pointe Simon (Source : Grand Port Maritime de la Martinique)



Figure 94 Photographie de la gare inter-îles du quai Ouest (Source : Grand Port Maritime de la Martinique)

4.2.2.5 Chantier naval

La zone située au niveau du bassin de Radoub est, quant à elle, dédiée à la réparation navale. Exploitée par le Chantier Naval de la Martinique, le bassin mesure 180m de long et 23.5m de large. Un réseau de sous-traitants d'une quinzaine d'entreprises spécialisées intervient pour les réparations. La baie des Tourelles dispose également d'une zone spécialisée dans la réparation navale de plaisance dotée d'un portique de levage de 50 tonnes où des entreprises artisanales y sont installées pour la réalisation de travaux subaquatiques, de réparation de moteurs, d'électronique et d'électricité marines, de peinture anti-fouling, etc.

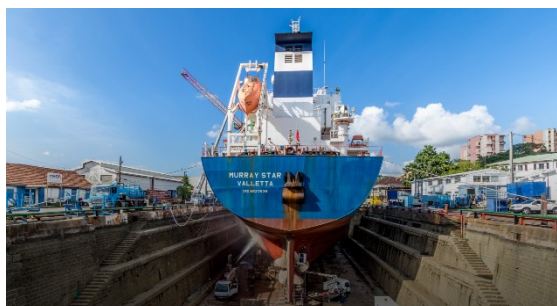


Figure 95 Photographie du bassin de Radoub (Source : Grand Port Maritime de la Martinique)



Figure 96 Photographie de la baie des Tourelles (Source : Grand Port Maritime de la Martinique)

4.2.3 Les limites et verrous identifiés

A ce stade, le port n'identifie aucun verrou législatif ou financier. Il considère que le premier verrou est de nature environnementale avec la saison des cyclones allant de juin à novembre et pouvant notamment impacter les infrastructures présentes sur le port.

Un autre verrou est de type social. A ce sujet, le port souligne qu'il y a un manque d'industrie implantée localement. De plus, aujourd'hui, l'île concentre la majorité de ses activités autour du tourisme et la population martiniquaise est globalement très peu engagée dans la transition énergétique.

Un autre verrou a été identifié concernant le manque de foncier sur le domaine portuaire étant donné qu'il n'existe qu'un seul hectare de surface disponible actuellement.

Enfin, d'un point de vue administratif, le parc naturel marin et le sanctuaire Agoa pour les mammifères marins doivent impérativement être pris en compte dans les mises en œuvre du développement du GPMLM.

4.3 Grand port maritime de Guadeloupe (GPMG)

Le port du Petit Cul-de-Sac Marin naît en 1730 pour permettre aux deux ailes de la Guadeloupe de faire le lien entre elles avec ce port naturellement abrité des houles de l'Atlantique et de l'Alizé. En 1946, la Guadeloupe devient un département français ce qui permet au port d'obtenir le statut de port départemental.

Une première gare maritime est construite en 1959 à Pointe-à-Pitre qui devient ainsi le siège de l'autorité portuaire de l'île. Le quai Gatine est ensuite aménagé pour pouvoir accueillir les passagers et les vedettes de liaisons avec l'archipel. Au début des années 2000, une nouvelle gare maritime interrégionale y est construite. Plus tard, une base de réparation pour les grands yachts voit le jour.

En 1974, le port départemental devient le port autonome de Guadeloupe et par la même occasion le 7^{ème} port autonome français.

Le début des années 80 marque le lancement de la conteneurisation. De ce fait, de nombreux terminaux à conteneurs voient le jour sur le port de Jarry dont le 3^{ème} mesurant notamment 200 mètres de long et 4,5 hectares de surface. Le port se voit aussi doter de deux portiques over panamax.

Le port autonome devient ensuite le Grand Port Maritime de la Guadeloupe en 2012 sous le nom de Grand Port Caraïbes.

Enfin, en 2015, la gare maritime du port de Basse-Terre est inaugurée et la première phase des travaux de construction d'un port de nouvelle génération est lancée par la même occasion.

Le Grand Port Maritime de la Guadeloupe est aujourd'hui implanté sur cinq sites :

- Pointe-à-Pitre – passagers et grands yachts
- Jarry – marchandises
- Basse-Terre – Fret et passagers
- Marina de Bas-du-Fort – Nautisme
- Folle-Anse – Trafic domestique / désenclavement de Marie Galante



Figure 97 Les 5 sites portuaires de la Guadeloupe
 (Source : Géoportail)

4.3.1.3 Port de Basse-Terre – Fret et passagers

Le Port de Basse-Terre est multi activités. Il représente seulement 1,5% du fret de la Guadeloupe, et 4% des passagers. C'est aussi une escale touristique. Il dispose d'un quai principal de 212m.



Figure 100 Schéma du port de Basse-Terre (Source : Grand Port Maritime de la Guadeloupe)

4.3.2 La stratégie liée aux énergies marines renouvelables

Le Grand Port Maritime de la Guadeloupe ne dispose pour l'instant pas de stratégie spécifique aux énergies marines renouvelables.

En revanche, il a pour ambition d'accroître la compétitivité de ses services portuaires, de devenir le "Smart Port" de référence de la Caraïbe, de développer une action foncière plus durable et à plus forte valeur ajoutée (augmentation de la part des revenus fonciers dans le chiffre d'affaires, stratégie d'optimisation, anticipation des besoins) et d'adapter le port au changement climatique (compensation environnementale, reconquête de la biodiversité, réduction des impacts environnementaux, décarbonation de la consommation électrique, développement d'une stratégie Climat Air Énergie, économie circulaire, solutions fondées sur la nature).

4.4 Les ports dans la Caraïbe

Le contexte caribéen est décrit comme suit dans le Document Stratégique de Bassin Maritime des Antilles⁷⁵ :

« Le bassin Caraïbe est un carrefour pour les échanges internationaux de conteneurs. Le caractère insulaire d'une grande partie de ses territoires explique sa densité portuaire élevée. À l'échelle de ce bassin Caraïbe, les principaux ports « de marché » (pour approvisionner un marché) sont situés en Colombie et au Guatemala, alors que les principaux ports de transbordement (pour assurer un stockage intermédiaire de marchandises avant envoi vers une destination finale) sont Colón au Panama et Kingston en Jamaïque. »

La cartographie ci-après illustre les disparités portuaires à l'échelle de la Caraïbes et met en valeur les ports jouant un rôle prépondérant notamment les HUB de transbordement.

⁷⁵ Document stratégique de bassin maritime des Antilles - Version finale – Juin 2021 – Fiches thématiques

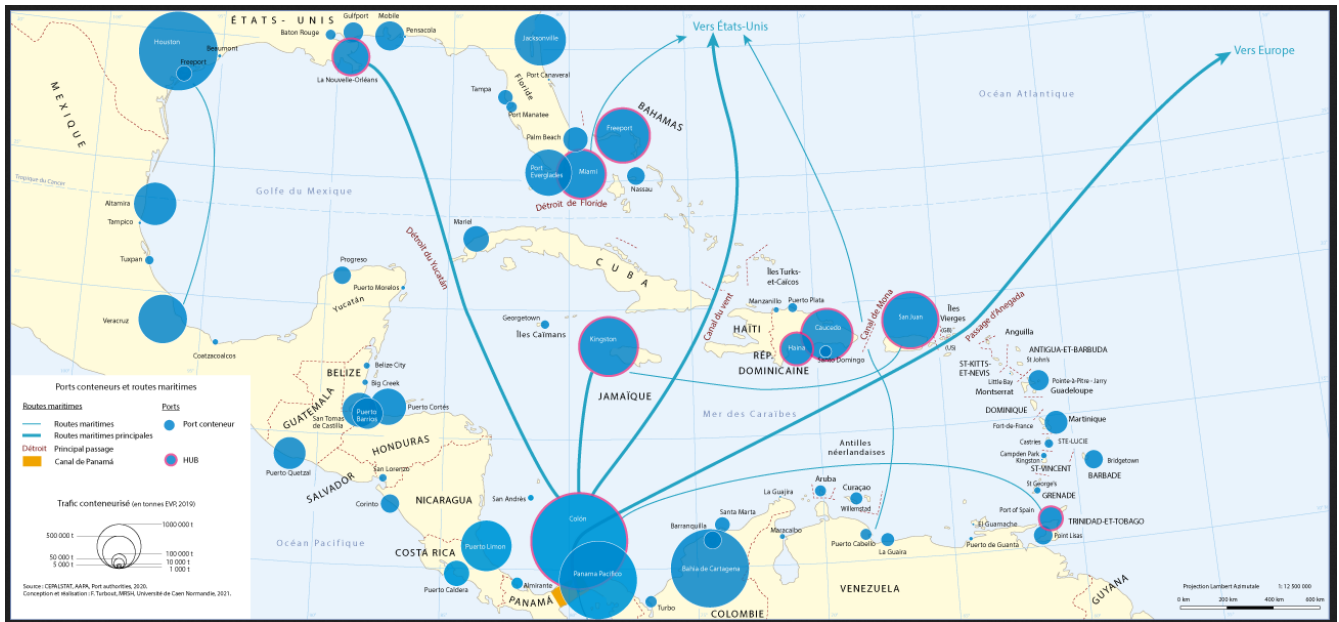


Figure 101 Les trafics conteneurisés 2019 (Sources : CEPALSTAT, 2021, Ports 2021, AAP 2021 Auteur : F. Turbout, MRSH Université de Caen Normandie, 2021)

Au sein de la Caraïbe, les petites Antilles et à fortiori les Antilles françaises pèsent peu dans le commerce maritime (port de transbordement de niveau régional et non interrégional) et sont peu desservies par les routes maritimes au sein de la Caraïbes. La majorité des échanges commerciaux se fait directement avec la France hexagonale avec un important déséquilibre entre les importations (forte dépendance de Antilles françaises aux marchandises hexagonales) et les exportations (faibles et concentrées sur des marchandises agricoles).

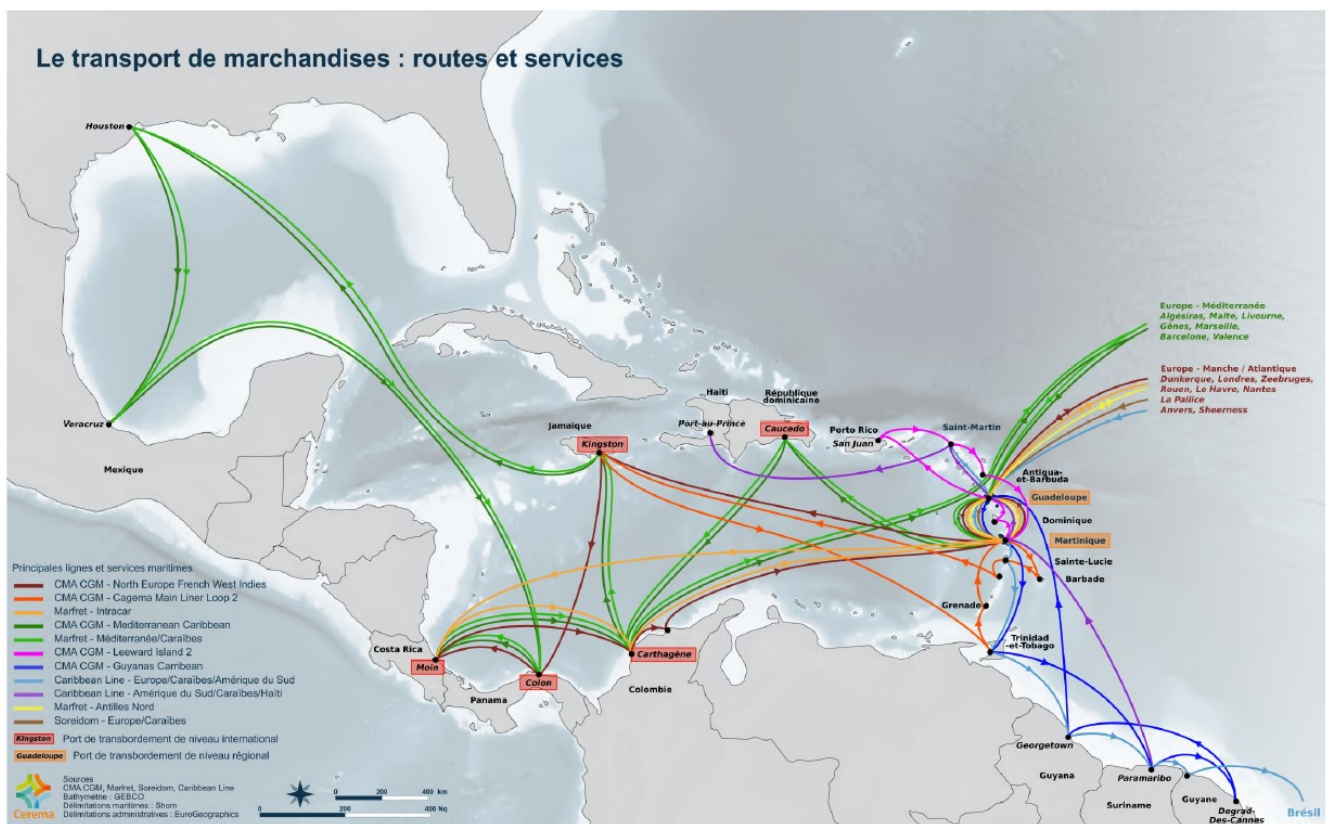


Figure 102 Document stratégique de bassin maritime des Antilles - Version finale - Annexe 2 : Cartographies

Si les informations présentées concernent les échanges commerciaux conteneurisés, on comprend cependant, dans l'hypothèse d'un développement de la chaîne de valeur des EMR à l'échelle de la Caraïbes, vers quels HUB les porteurs de projets pourraient se tourner afin d'assurer les opérations de transbordements. (ex : Kingstown).

Dans le cadre du projet TRAFIC, TRANsport maritime, Fréquentation portuaire et Inégalités environnementales dans les Caraïbes (Eric Foulquier et Iwan Le Berre mai 2022 – UMR 6554 CNRS LETG, IUEM Université de Bretagne Occidentale, Brest, France), plusieurs cartographies disponibles librement ont été produites et mettent en lumière l'état de routes maritimes dans la Caraïbe :

- Cartographie du trafic maritime dans la Caraïbe en 2019, par types de navires : <https://portail.indigeo.fr/geocms/projects/caraibes-traffic-ais-2019>
- Cartographie des ports de la Caraïbe en 2022 : https://qgiscloud.com/ileberre/QGIScloudmap_Caraibe_Ports/

Si la cartographie des ports de la Caraïbes localise près de 400 ports (avec des informations complémentaires sur les linéaires de quai par exemple), il reste néanmoins complexe de caractériser les activités portuaires utiles à la mise en œuvre d'EMR (travail à part entière).

Les cartographies du trafic par types de navires permettent entre autres de visualiser l'activité (en 2019) des navires de service : dragueurs, offshore, remorqueurs, antipollution, câbliers, hôpital. Cette information est utile dans le sens où les avancées technologiques des EMR (éolienne offshore en particulier) sont liées au secteur de l'« *oil and gas* » et donc aux navires de service de type « offshore » ou encore « remorqueur ».

Ainsi, en s'intéressant au secteur de l'« *oil and gas* », les îles de Trinidad et Tobago incluses au sein des petites Antilles sont le principal producteur et exportateur d'hydrocarbures de la Caraïbe avec une production essentiellement off-shore. Considérant que « Port of Spain » joue également un rôle de HUB à l'échelle de la sous-région, Trinidad et Tobago pourraient être un relai local dans le développement des EMR.

Le gouvernement de Trinidad et Tobago affiche d'ailleurs depuis 2021 l'ambition de développer l'éolien en mer au large de ses côtes⁷⁶.



Figure 103 Densité de trafic des navires de services en 2019 dans le bassin Caraïbe (Source Projet TRAFIC)

⁷⁶ <https://www.4coffshore.com/news/trinidad-and-tobago-to-investigate-offshore-wind-nid20911.html>

5 RECOMMANDATIONS

A l'issu de cette identification des zones d'implantation favorables à l'installation de projets de production d'EMR à l'horizon 2030, nous recommandons que soient menées les actions suivantes :

→ **Consulter les parties prenantes afin de**

- Clarifier la faisabilité technique de l'éolien flottant dans les zones de fortes pentes, ainsi que pour les zones où la bathymétrie est comprise en -500 et -1 000m, en lien avec la filière.
- Ouvrir une réflexion sur la prise en compte des enjeux paysagers et notamment sur la distance à la côte acceptable.
- Réaliser un travail plus précis sur l'activité de pêche professionnelle, notamment en tenant compte de la technique utilisée, en lien avec les acteurs de la filière.
- Poursuivre le travail de réflexion sur les infrastructures portuaires mobilisables à l'échelle locale, régionale et internationale.
- Clarifier la faisabilité du raccordement électrique maritime et terrestre et ses implications techniques et financières, en lien avec le gestionnaire du réseau de transport.

→ **Mener des études de caractérisation**

- Sur la zone à privilégier pour l'éolien en mer, en particulier concernant le vent (étude de productible) et la bathymétrie à une résolution fine, en lien avec la DGEC.
- Sur les zones potentielles de raccordement électrique en mer, en particulier concernant la nature des fonds marins, en lien avec le gestionnaire du réseau (EDF-SEI) pour déterminer les meilleures configurations possibles pour le raccordement au réseau électrique.
- Sur la côte Atlantique pour déterminer plus finement le potentiel houlomoteur, en se rapprochant du réseau Candhis pour le déploiement d'un houlographe qui permettrait de fiabiliser les données issues de différents modèles de houle.

→ **Se rapprocher du projet "EnRezo"** conduit par le Cerema, avec le soutien de l'ADEME et de la DGEC, pour le développement du potentiel « SWAC »

6 CONCLUSION

Cette étude s'inscrivait dans le cadre de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) en cours de révision avec comme objectif pour pouvoir éclairer et objectiver le débat quant à l'implantation d'énergies marines renouvelables en Martinique, et ce afin que les décideurs publics puissent s'engager dans la planification du développement de futurs de projets EMR en connaissance de cause.

Au travers de cette étude, il a été identifié plusieurs zones favorables à l'implantation d'éoliennes en mer (posées ou flottantes sous couvert des études de caractérisation des sites à conduire). La surface des zones identifiées permet de répondre aux besoins en énergie visés dans la PPE.

Le travail mené a aussi permis de déterminer certaines contraintes au développement des EMR telles que la capacité actuelle du réseau électrique à supporter une installation d'EMR conséquente (supérieure 50 MW) ou encore la complexité à réunir à l'échelle des Antilles voire même de la Caraïbe l'ensemble des éléments de la chaîne de valeur nécessaire à la mise en œuvre d'un projet EMR.

Si ce rapport constitue une première étape vers le développement de projets EMR en Martinique, il n'en reste pas moins nombre d'étapes à franchir dont les principales sont présentées au paragraphe précédent sous la forme de recommandations.

Aussi, certaines études techniques doivent-elles être programmées à court / moyen terme afin de venir renforcer la connaissance des différents sites identifiés.

Au-delà des informations purement techniques, une large phase de concertation avec l'ensemble des parties prenantes doit désormais s'ouvrir afin de s'assurer de la bonne prise en compte et d'affiner la compréhension des enjeux du territoire martiniquais. Cette concertation approfondie est l'une des garantes de l'acceptabilité de potentiels projets futurs.

En ce sens et pour conclure, la mise à disposition auprès des décideurs publics d'un outils d'aide à la décision sous la forme d'un visualiseur des données concaténées et produites au cours de cette étude est un atout pour engager les discussions sur la base d'un socle de connaissance commun et partagé.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN