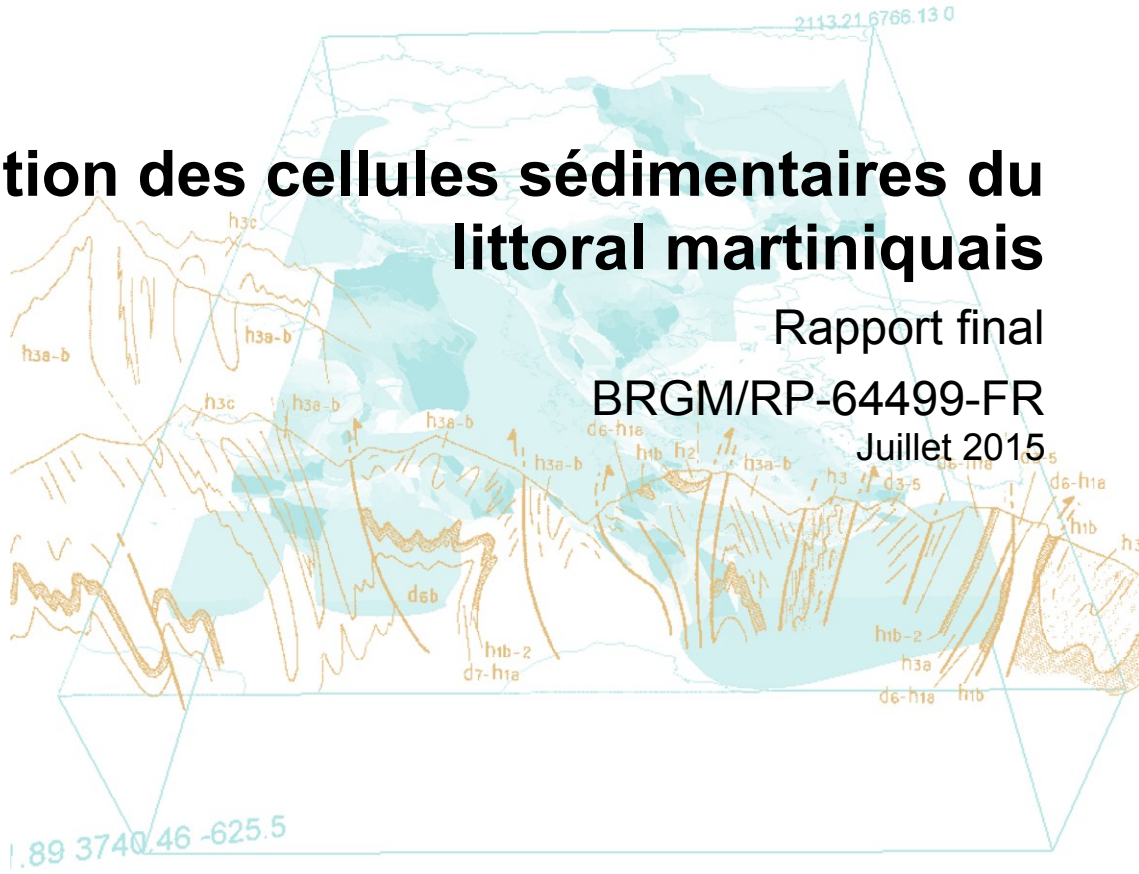
Document public

Définition des cellules sédimentaires du littoral martiniquais

Rapport final

BRGM/RP-64499-FR

Juillet 2015



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Définition des cellules sédimentaires du littoral martiniquais

Rapport final

BRGM/RP-64499-FR
Juillet 2015

Étude réalisée dans le cadre des projets
d'appui aux politiques publiques du BRGM 13OBS0715

A. Nachbaur, Y. Balouin, A. Nicolae Lerma, L. Douris, R. Pedreros

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : M. Garcin Date : 23/04/2015	Nom : J.C. Audru Date : 11/05//2015

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
DEAL Martinique

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Littoral, cellules sédimentaires, dérive littorale, houles, Martinique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Nachbaur A., Balouin Y., Nicolae Lerma A., Douris L., Pedreros R. (2015) – Définition des cellules sédimentaires du littoral martiniquais. Rapport final. BRGM/RP- 64499 -FR, p. 95, 46 ill., 2 ann., CD.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le littoral est un système dont l'équilibre dynamique dépend des échanges et des transferts de sédiments qui se produisent latéralement et transversalement sous l'action des houles et des courants. Il est d'usage d'appréhender son équilibre au travers de l'analyse de son bilan sédimentaire au sein d'unités considérées comme homogènes dont les limites spatiales n'ont rien de commun avec les limites administratives (MEEDTL, 2010).

Ces unités, appelées « cellules sédimentaires », sont des portions de côte à l'intérieur desquelles les circulations sédimentaires, contrôlées par la dérive littorale (courant d'intensité variables en fonction de l'énergie des vagues, capable de déplacer les sédiments le long de la plage) ont un fonctionnement autonome par rapport aux portions voisines : les mesures d'aménagement prises dans une de ces cellules peuvent avoir un impact sur d'autres secteurs de la même cellule mais pas sur les autres cellules.

La définition des cellules sédimentaires régissant le littoral martiniquais fait l'objet de la convention de recherche signée le 21 novembre 2013 entre la DEAL et le BRGM. L'objectif de cette étude est de délimiter ces cellules et la direction dominante des transferts sédimentaires associés.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs démarches ont été nécessaires :

- Les caractéristiques des vagues proches de la côte qui déterminent la direction de la dérive littorale, ont été déterminées le long du littoral martiniquais au moyen de simulations numériques et de classification statistique ;
- L'ensemble des plages martiniquaises où se concentrent les échanges sédimentaires ont été expertisées en novembre 2014, ce qui totalise plus d'une centaine de plages ;
- Les principaux acteurs du littoral ont été consultés pour capitaliser la connaissance existante de la dynamique hydro-sédimentaire.

Ainsi, une analyse statistique des caractéristiques des vagues et des vents au large de la Martinique a été réalisée à partir de modèles régionaux (IOWAGA-CRB et vent CFSR). Cinq classes de houle représentatives des conditions au large ont ainsi été identifiées. Le modèle numérique SWAN (Booij et al., 1999) a ensuite été utilisé pour caractériser les conditions des houles à proximité des côtes martiniquaises. Cette analyse statistique a confirmé la particularité de la côte Caraïbes où la direction de provenance des vagues à la côte est essentiellement déterminée par les caractéristiques du vent et non, comme ailleurs, par les conditions de vagues au large. Sur cette côte particulière, plusieurs directions de provenance des vagues possibles ont donc été déterminées. Rappelons que la base de données de vent utilisée dans le cadre de cette étude régionale tient compte des vents à l'échelle du domaine d'étude, mais ne peut représenter les vents issus d'effets locaux (orographiques, brises thermiques… etc).

À partir des caractéristiques de la houle à la côte, de grands ensembles homogènes en terme de transits sédimentaires dominants ont été délimités. Les unités hydro-sédimentaires et la direction dominante de la dérive littorale associée ont ensuite être précisées au 1/25 000, appuyées sur une expertise de terrain. Sur les 57 km de côtes sableuses, un total de 92 cellules sédimentaires indépendantes ont été identifiées régissant les 117 plages sableuses martiniquaises. Les cellules les plus étendues (3.9 km de longueur maximum) sont situées sur la côte Caraïbes, entre la commune de Schœlcher et du Prêcheur soit une côte peu découpée,

expliquée par un volcanisme récent. Toute gestion doit être élaborée à l'échelle de ces cellules sédimentaires. Ces délimitations constituent notamment l'emprise latérale minimale des études d'impacts, pour tout aménagement sur le littoral.

Cette étude a conduit à produire plusieurs types de résultats qui améliore la connaissance de la dynamique littorale à l'échelle de l'île, permettant d'avoir une vue d'ensemble de l'exposition du littoral martiniquais et de comparer spatialement son exposition et sa vulnérabilité à l'érosion. Il est désormais disponible :

- Un atlas de 30 climats de vagues, le long du littoral, proche de la côte ;
- Une description des 117 plages martiniquaises à l'aide de plusieurs paramètres quantitatifs caractéristiques des plages sableuses et de leur vulnérabilité à l'érosion ;
- Un indicateur permettant de hiérarchiser les plages selon leur vulnérabilité à l'érosion, tenant compte à la fois des conditions morphologiques actuelles (largeur et bathymétrie de l'avant côte) et des constats de mobilité à long terme du haut et du bas de plage. Cet indicateur constitue donc un outil d'aide à la décision pour le choix de la stratégie de gestion du trait de côte tel que défini par le MEDDE (2013) : laissé faire, relocalisation des enjeux ou maintien des enjeux. Au-delà de cet indicateur de vulnérabilité, l'autre critère à prendre en compte reste la valeur des enjeux ;
- Une liste des solutions techniques pour lutter contre l'érosion déclinable au littoral martiniquais.

Les solutions techniques pertinentes en Martinique pour lutter contre l'érosion ont été présentées. Sur ce dernier point, il ressort que le rechargement de plages reste l'une des techniques douces les plus efficaces pour lutter contre l'érosion. Elle nécessite cependant de s'assurer de ne pas entrainer un déficit sédimentaire sur les lieux de prélèvements, qui peuvent être en dehors de la cellule sédimentaire. Dans ce contexte, la mise en place d'un « Plan de gestion des sédiments » basée sur les cellules sédimentaires identifiées dans la présente étude, permet d'anticiper ces transferts sédimentaires globalement en identifiant les ressources, en anticipant les transits et les modalités de rechargement et en respectant les écosystèmes marins.

Sommaire

1. Cadre de l'étude 11

2. Le littoral martiniquais 13

2.1. PRÉSENTATION MORPHOLOGIQUE 13
2.1.1. Contexte morphologique 13
2.1.2. Nature des fonds 14
2.1.3. Typologie côtière 16

2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE 16
2.2.1. Régime des vents 16
2.2.2. Les climats de vagues 17

3. La dynamique des plages martiniquaises 19

3.1. CARACTÉRISATION DES PLAGES SABLEUSES MARTINIQUAISES 19
3.1.1. Description morphologique des plages 20
3.1.2. Comportement morphodynamique des plages martiniquaises 22

3.2. LES OBSERVATIONS HISTORIQUES ILLUSTRANT LA DYNAMIQUE DES PLAGES MARTINIQUAISES 23
3.2.1. La mobilité de la végétation permanente de haut de plage (LVP) 23
3.2.2. La mobilité de l'interface terre-mer (ITM) 23
3.2.3. Évaluation de ces deux indicateurs sur les plages martiniquaises 24

4. Caractérisation des houles saisonnières 29

4.1. DONNÉES D'ENTRÉES ET MODÈLE UTILISÉ POUR LES SIMULATIONS ... 29
4.1.1. Données des houlographes 29
4.1.2. Données bathymétriques 29
4.1.3. Données de vent et de vagues à l'échelle de l'Arc antillais 30
4.1.4. SWAN, le modèle de propagation des houles utilisé 33

4.2. RECONSTITUTION DES HOULES AU LARGE ET CLASSIFICATION STATISTIQUE 34
4.2.1. Reconstitution des chroniques de houles en 3 points caractéristiques 34
4.2.2. Classification des vagues au NW, NE et SE de la Martinique 35
4.2.3. Vents associés aux classes de vagues au large 38

4.3. MODÉLISATION DES CONDITIONS DE HOULE AUTOUR DE LA MARTINIQUE 40

4.3.1. Principe 40
4.3.2. Résultat 41
4.3.3. Évaluation de l'influence du vent sur les conditions de vagues à la côte. 42

4.4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS LE LONG DU LITTORAL 44

5. Caractérisation des cellules sédimentaires 47

5.1. DÉLIMITATION DES COMPARTIMENTS HYDRO-SÉDIMENTAIRES 47

5.2. DÉFINITION DES CELLULES HYDRO-SÉDIMENTAIRES 49
5.2.1. Détermination des limites des cellules sédimentaires 49
5.2.2. Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire de chacune des cellules 49
5.2.3. Résultats 55

6. Préconisations de gestion des côtes sableuses 57

6.1. PRÉCONISATION DE GESTION À L'ÉCHELLE DES CELLULES SÉDIMENTAIRES 57

6.2. UN INDICATEUR COMME OUTIL D'AIDE AU CHOIX DE LA STRATÉGIE 57

6.3. SOLUTIONS TECHNIQUES POUR LUTTER CONTRE L'ÉROSION 59
6.3.1. Dispositifs atténuateurs de houle (en mer) 59
6.3.2. Un transfert sédimentaire pour compenser ou prévenir un déséquilibre . 60
6.3.3. La protection de la plage en général 62
6.3.4. La protection du stock de haut de plage en particulier 64
6.3.5. Gestion des embouchures 66
6.3.6. Synthèse sur les solutions techniques et leur applicabilité 66

7. Conclusion 69

8. Bibliographie 71

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des massifs coralliens de la Martinique (Battistini, 1978) (1 : récifs frangeants et cayes, 2 : récifs barrières) 14

Illustration 2 : Nature des substrats marins entre 0 à 50 m de profondeur. Année 2006-2008 (Legrand, 2009) 15

Illustration 3 : Composition du littoral martiniquais (Nachbaur et al., 2014) 16

Illustration 4 : La typologie des plages martiniquaises 19

Illustration 5 : Caractéristique morphologique d'une plage de poche (a : profondeur, Ro : ouverture, β : angle entre la houle dominante et l'ouverture de la baie) (Bowman et al., 2009) 20

Illustration 6 : Estimation de la largeur des plages martiniquaises (en m) et l'indendation des plages de poche à partir des photos aériennes de 2010 21

Illustration 7 : Mécanismes de : a) basculement d'une plage (Modifié d'après Short et Masselink, 1999) ; et b) oscillation d'une plage de poche. 22

Illustration 8 : Exemple de basculement sur la plage de Madiana (photographies ©GoogleEarth)23

Illustration 9 : Classes utilisées pour la détermination qualitative des avancées/reculs du trait de côte à moyen et long-terme 24

Illustration 10 : Evolution de la limite de végétation permanente (LVP) (en haut) à long et moyen-terme ; Evolution de l'interface terre-mer (ITM) (en bas) à long et moyen terme.25

Illustration 11 : Evolution de la position de la limite de végétation permanente (LVP) et de l'interface terre-mer (ITM) à long et moyen-terme sur les plage de Martinique (En rouge, recul fort, en orange recul modéré, en blanc, stabilité, en vert et vert foncé, avancée modérée et forte). 26

Illustration 12 : Nombre de plages présentant des reculs ou avancées de la limite de végétation permanente (LVP) et de l'interface terre-mer (ITM) à long et moyen-terme 27

Illustration 13 : Modèle Numérique de Terrain de la bathymétrie de la Martinique construit à partir des données du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) (Maillage : 100 m * 100 m). Source : Poisson et Pedreros, 2007. 30

Illustration 14 : Emprise du modèle IOWAGA-CRB, image google earth 31

Illustration 15 : Comparaison des hauteurs caractéristiques des vagues (Hs), entre observations à la bouée de Basse Pointe (97202) et données issues du modèle IOWAGA-CRB forcé par les vents CFSR pour l'année 2012. 32

Illustration 16 : Comparaison des caractéristiques des vagues (hauteurs significative Hs, période pic Tp et direction pic Dp) entre observations à la bouée de Basse Pointe (en bleu) et données issues du modèle IOWAGA-CRB (en rouge) pour l'année 2012..... 33

Illustration 17 : Localisation des points ayant fait l'objet d'une classification 34

Illustration 18 : Série temporelle des hauteurs significatives Hs des vagues entre 1990 et 2012, au point 194 35

Illustration 19 : Caractéristiques moyennes et saisonnalité des 5 classes de vague 36

Illustration 20 : Caractéristiques moyennes et répartition saisonnière aux 3 points d'analyse : NW , NE et SE de l'île 37

Illustration 21 : Conditions de vents associées aux classes de vagues, au point NE (n°194) 38

Illustration 22 : Distribution des conditions de vent au point NE (n°194) pour les 5 classes déterminées 39

Illustration 23 : Forçages associés à chacune des classes..... 40

Illustration 24 : Emprise du modèle, conditions aux limites et localisation des 30 points de sortie localisés sur l'isobathe 20 m 40

Illustration 25 : Caractéristiques des vagues (Hauteur Hs et direction) obtenues pour les 5 classes de vagues/vents déterminées 41

Illustration 26 : Zones où les conditions de vague à la côte sont relativement homogènes 42

Illustration 27 : Influence des paramètres de vent (direction et vitesse possible à l'échelle du domaine d'étude) sur les conditions de vagues à la côte dans la zone 4 : En orange, la provenance des vagues est globalement Nord-Ouest ; en bleu, elle est globalement Sud/Sud-Est. La zone grisée correspond à la situation où le vent local a les mêmes caractéristiques que le vent modélisé 43

Illustration 28 : Les directions possibles des vagues à la côte au point P30 (commune du Prêcheur), balayant toutes les situations possibles de vent au large. En bleu/vert les directions pour des vents de direction de provenance 40° à 120°, en jaune/orange les directions pour des vents de provenance 0 à 40°. Les quartiers correspondent au pourcentage d'occurrence de chaque classe de vague. 44

Illustration 29 : Exemple des conditions de vagues caractéristiques au point P5 sur la côte Atlantique 45

Illustration 30 : Exemple des conditions de vagues caractéristiques au point P24 sur la côte Caraibes..... 45

Illustration 31 : Conditions de vagues caractéristiques à proximité des côtes martiniquaises (sur l'isobathe 20 m)..... 46

Illustration 32 : Grands compartiments hydrosédimentaires homogènes en terme de direction de transfert sédimentaire 48

Illustration 33 : Différents types de limites observées : 1 – limite imperméable (côte rocheuse très avancée entre deux baies) ; 2 – Limite semi-perméable (Embouchure de la rivière du Prêcheur où le transfert sableux d'une côte à l'autre est observé) ; 3 – Limite semi-perméable (côte rocheuse partiellement et ponctuellement contournée par les bancs de sable sur l'avant-côte). 49

Illustration 34 : Photographies de la plage d'Anse d'Arlet lors de la visite du 6 novembre 2014 (en haut, de gauche à droite : photographie depuis le sud de la plage vers le nord ; photographie depuis le ponton central vers le nord ; schéma du profil de plage au nord et au sud ; en bas : panoramique de la plage depuis la jetée centrale). ... 50

Illustration 35 : Schéma conceptuel de la dynamique de la plage d'Anse d'Arlet lors de la visite de terrain du 6 novembre 2014..... 51

Illustration 36 : Evaluation de l'angle d'incidence dominante (en degrés) devant chaque anse sableuse..... 52

Illustration 37 : Evaluation de la puissance moyenne de la houle devant chaque anse sableuse.53

Illustration 38 : Exemple de transport transverse mis en évidence par les panaches que forment les courants d'arrachements (rip Current), Petite Anse des Salines..... 54

Illustration 39 : Exemple des cellules hydro-sédimentaires identifiées sur la presqu'île de Sainte Anne..... 56

Illustration 40 : Indicateur de vulnérabilité proposé par le BRGM 58

Illustration 41 : Le géotextile installé à anse Figuier, à une dizaine de mètre du rivage. Source : http://www.sous-les-cocotiers.com/ 60

Illustration 42 : Système de by-pass (Balouin et al., 2012) 62
Illustration 43 : Principe d'un drainage de plage (@Ecoplage) 63
Illustration 44 : Exemple des deux strates de végétation : Patate Bod-lanmè et cocotier. Plage de Grand Macabou. 65
Illustration 45 : Solution technique de lutte contre l'érosion et évaluation de leur applicabilité. . 67
Illustration 46 : Solution technique de lutte contre l'érosion et évaluation de leur applicabilité (suite) 68

Liste des annexes

Annexe 1 Conditions de vagues à la côte le long du littoral 73
Annexe 2 Cellules hydro-sédimentaires du littoral Martiniquais 85

1. Cadre de l'étude

Le littoral est un système dont l'équilibre dynamique dépend des échanges et des transferts de sédiments qui se produisent latéralement et transversalement sous l'action des houles et des courants. Il est d'usage d'appréhender son équilibre au travers de l'analyse de son bilan sédimentaire au sein d'unités homogènes dont les limites spatiales n'ont rien de commun avec les limites administratives (MEEDTL, 2010).

Ces unités, appelées « cellules sédimentaires », sont des portions de la côte à l'intérieur desquelles les circulations sédimentaires ont un fonctionnement autonome par rapport aux portions voisines : les mesures d'aménagement prises dans une de ces cellules peuvent avoir un impact sur d'autres secteurs de la même cellule mais pas sur les autres cellules. Toute gestion de l'érosion littorale doit être élaborée à l'échelle de la cellule sédimentaire.

La définition des cellules sédimentaires régissant le littoral martiniquais fait l'objet de la convention de recherche signée le 21 novembre 2013 entre la DEAL et le BRGM. L'objectif de cette étude est de délimiter ces cellules et la direction des transferts sédimentaires associés sachant que ces transferts sont largement contrôlés par la dérive littorale.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs démarches ont été nécessaires :

- Les caractéristiques des vagues proches de la côte qui déterminent la direction de la dérive littorale, ont été déterminées le long du littoral martiniquais au moyen de simulations numériques et de classification statistique ;
- L'ensemble des plages martiniquaises où se concentrent les échanges sédimentaires ont été expertisées en novembre 2014, ce qui totalise plus d'une centaine de plages ;
- Les principaux acteurs du littoral ont été consultés pour capitaliser la connaissance existante de la dynamique hydro-sédimentaire. Le Comité des Pêches (CRPMEM) et la Direction de la Mer ont notamment fait part des dysfonctionnements sédimentaires dont il avait connaissance sur le littoral.

Les caractéristiques du littoral et de la dynamique des plages martiniquaises sont présentées dans les chapitres 2 et 3. Les chapitres 3 à 5 visent ensuite à délimiter les cellules sédimentaires le long du littoral et à déterminer la direction des transferts sédimentaires associés.

Lors de la réunion de clôture du 19 novembre 2014, les participants ont convenu que le BRGM ne s'attachera pas à définir la valeur des enjeux dans le cadre de cette étude bien que défini dans le cahier des charges. Le dernier chapitre consiste à proposer des outils d'aide à la décision pour apporter des éclairages aux décideurs. Le BRGM a notamment conçu un indicateur pour hiérarchiser la vulnérabilité côtière des plages sableuses à l'érosion côtière ainsi qu'un guide pour choisir les techniques à préconiser ou à proscrire en Martinique.

2. Le littoral martiniquais

2.1. PRÉSENTATION MORPHOLOGIQUE

Le littoral martiniquais (hors ilets) comptabilise 450 km de côte dont 60 km environ sont anthropisés, c'est-à-dire bordées par des aménagements urbains, des ouvrages portuaires ou par des ouvrages de défense contre la mer.

2.1.1. Contexte morphologique

Un contraste morphologique net existe entre le nord de la Martinique, résultat du volcanisme le plus récent, et le sud. Ainsi, la côte nord, entre Fort-de-France et Trinité, est essentiellement caractérisée par des falaises et une absence de baie alors que la côte sud est découpée et présente une succession de baies, de caps et d'anses (Revert, 1949). Ce contraste est également confirmé sur l'Illustration 1 par la présence de récifs uniquement au sud.

La côte Est ou « côte au vent » est bordée par l'Océan Atlantique. La partie nord allant de Grand-Rivière à Sainte-Marie est essentiellement constituée de falaises. Entre Sainte-Marie et La Trinité, la côte devient moins abrupte. Les fonds forment un grand plateau continental atteignant une extension maximale de l'ordre de 25 km au large de la Trinité.

À partir de la Presqu'île de la Caravelle, un récif barrière s'étend sur 25 km jusqu'à l'extrême sud de l'île, tronçonné par des passes (cf. Illustration 1, Battistini, 1978). Ce récif est en grande partie immergé sous 5 à 10 m d'eau, à l'exception de certaines cayes. Côté interne du lagon, une succession de récifs frangeants borde la côte depuis la pointe de la Caravelle jusqu'à l'extrême sud de l'île.

La côte sud de l'île n'est bordée que par des récifs frangeants.

La côte Caraïbe, ou « côte sous le vent », est caractérisé par un plateau insulaire très réduit, c'est-à-dire qu'il existe une rupture de pente importante des fonds marins, à proximité des côtes. Cette côte est régulière et peu découpée.

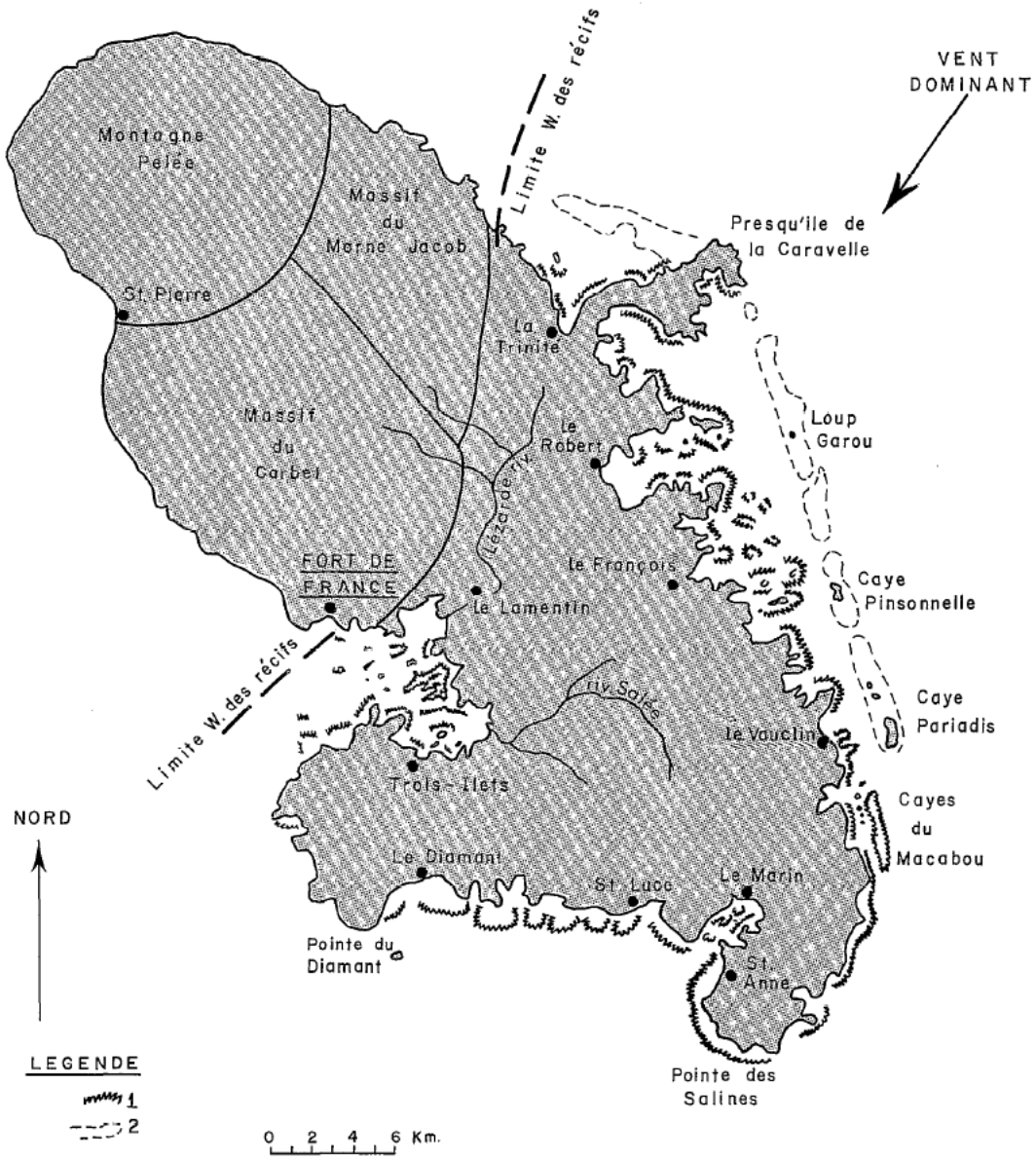


Illustration 1 : Localisation des massifs coralliens de la Martinique (Battistini, 1978)
(1 : récifs frangeants et cayes, 2 : récifs barrières)

2.1.2. Nature des fonds

D'après la cartographie de la nature des fonds marins que l'Observatoire du Milieu Marin Martiniquais (OMMM) a réalisé en 2009 (Illustration 2), les fonds sableux dominent sur l'ensemble du littoral martiniquais en représentant 44 % de la zone littorale jusqu'à 50 m de profondeur (Legrand, 2009). Les substrats rocheux et mixte sable et roche sont répartis sur l'ensemble du littoral martiniquais. Les fonds de baies ont une nature essentiellement sablo-vaseuse. Les substrats coralliens et vaseux n'ont été observés qu'à très faible profondeur.

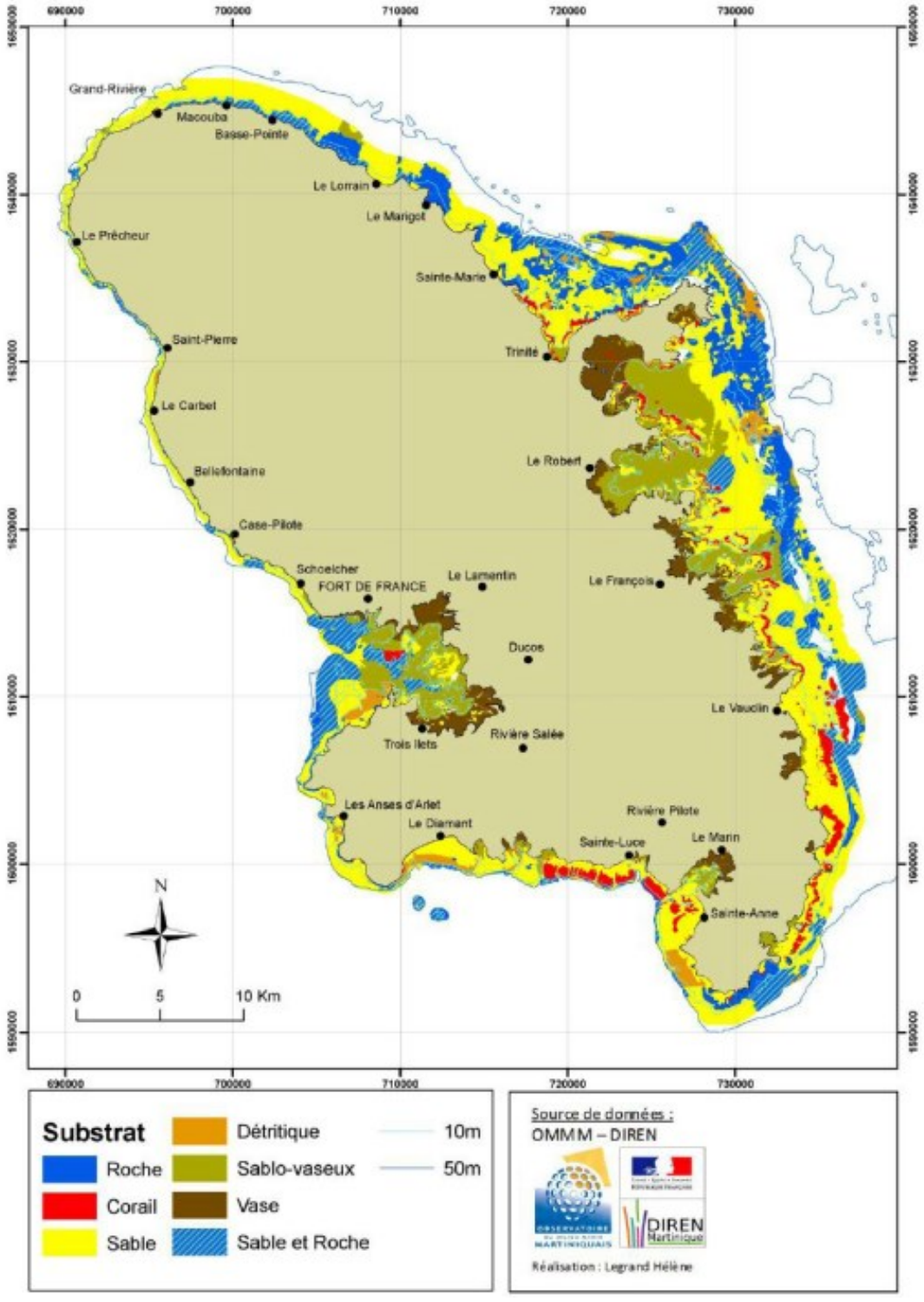


Illustration 2 : Nature des substrats marins entre 0 à 50 m de profondeur. Année 2006-2008 (Legrand, 2009)

2.1.3. Typologie côtière

Les deux-tiers des côtes martiniquaises sont constitués de côtes dites meubles, englobant des mangroves, des plages et des côtes meubles peu escarpées (végétalisées, remblais..) (Illustration 3, Nachbaur et al, 2014). Le reste du linéaire se répartit entre des côtes rocheuses et des côtes artificialisées, regroupant les aménagements portuaires, les ouvrages de défense contre la mer et les aménagements urbains.

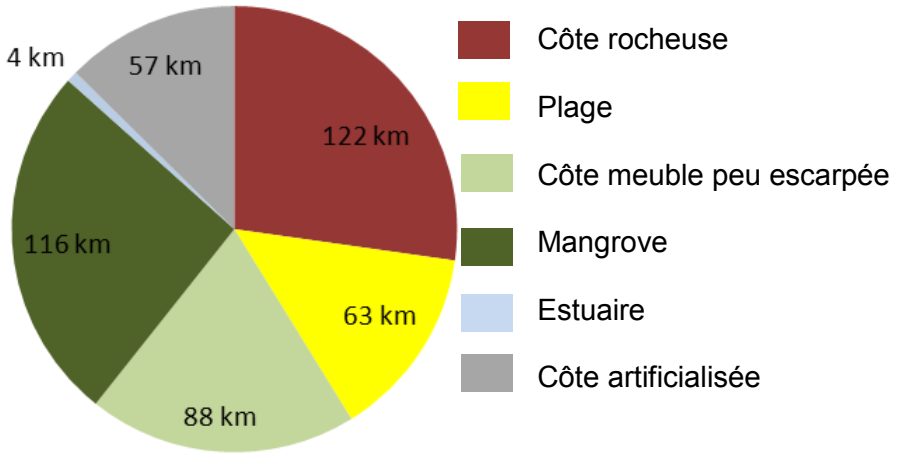


Illustration 3 : Composition du littoral martiniquais (Nachbaur et al., 2014)

2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

2.2.1. Régime des vents

La Martinique connait un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le Carême (de décembre à mai, centrée sur les mois de février/mars) et une saison humide, l'Hivernage (de juin à novembre). Ces conditions climatiques sont directement liées aux positions respectives de l'anticyclone des Açores et de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT).

La Martinique est soumise aux alizés toute l'année. En provenance constante de l'Est/Nord-Est à l'Est, ces vents soufflent en moyenne à une vitesse de 7 m/s (soit 25 km/h). Plus en détails :

- Pendant le carême, l'anticyclone des Açores et la ZCIT migre vers le Sud. Les alizés sont soutenus et réguliers, susceptibles notamment de se renforcer de décembre à Février (11 à 19 m/s) et de générer ainsi de plus fortes houles (Bosser et al., 2000). Le climat est relativement sec et moins chaud que durant l'hivernage ;

- Pendant l'Hivernage, l'anticyclone des Açores remonte vers l'Atlantique nord, les alizés diminuent. La ZCIT remonte vers 10° de latitude Nord et la Martinique est soumise à des pluies fréquentes.

En parallèle, l'arc caribéen est parcouru par de fréquents cyclones. La saison cyclonique s'étend de juillet à mi-novembre. Les vents peuvent alors dépasser les 150 km/h, avec des précipitations qui peuvent atteindre les 1000 mm d'eau par jour.

2.2.2. Les climats de vagues

De manière générale, l'état de surface de la mer est la résultante de l'action des vents sur la surface de l'océan. On décompose ainsi, l'état de surface de la mer en deux grands types de vagues dont l'origine et les caractéristiques sont différentes.

- Les houles sont générées par l'action des vents soufflants de manière prolongées sur d'importantes distances. Elles sont relativement ordonnées, caractérisées par des hauteurs importantes (le plus souvent supérieures à 1 m), des périodes longues (supérieures à 7 - 8 s) et un étalement directionnel plutôt réduit (20 à 25°).
- La mer du vent est générée par des vents locaux, dont l'action est par définition plus courte et locale. Ces vents génèrent une situation plus instable, caractérisée par des ondulations de petites hauteurs (inférieures à 1 m), de courtes périodes (inférieures à 5 – 6 s) et souvent avec un étalement directionnel important (environ 50°).

En tout point d'analyse, l'état de mer est caractérisé par ces grands types de vague. Dans le cas de la Martinique et hors situations exceptionnelles :

- la côte Atlantique est principalement affectée par des houles générées par les alizés sur l'ensemble de l'Atlantique. Une mer du vent est bien générée localement mais elle n'a pas ou peu d'influence sur les vagues arrivant à la côte.
- la côte Caraïbe connait une situation plus contrastée. Elle est abritée du régime dominant de houle et les vagues sont principalement générées par les vents locaux. Ces vents locaux évoluent au cours de la journée (intensité et direction) et sont influencés par les effets orographiques.

Comme évoqué au § 2.2.1, la Martinique est également soumise au passage de cyclones dont les trajectoires peuvent être très variables. Ces systèmes peuvent provoquer des houles très puissantes susceptibles d'affecter l'ensemble du littoral Martiniquais. Toutefois, les houles dites « cycloniques » sont considérées comme relativement exceptionnelles. Rappelons qu'en moyenne, la Martinique est exposée à un phénomène cyclonique (tempête ou ouragan) tous les 4-5 ans (source Météo France).

L'objectif étant ici la délimitation des cellules sédimentaires et la caractérisation des régimes de houles dominants en régime « normal », les conditions de houles cycloniques ne seront pas étudiées, même si les impacts passés (retour d'expérience de l'ouragan DEAN et de la houle cyclonique OMAR : Barras et al. (2008), Barras (2008)) sont pris en compte dans l'évaluation à dire d'expert de l'exposition et la vulnérabilité des plages. En effet, ce sont essentiellement les houles autres que cycloniques, qu'on appelera ici « houles saisonnières » qui sont responsables de la dérive littorale et donc de l'évolution à long terme des plages. Les événements cycloniques correspondent à des évènements rares dont les conséquences morphologiques sont toujours particulières au regard de leur trajectoire et de leur intensité.

3. La dynamique des plages martiniquaises

3.1. CARACTÉRISATION DES PLAGES SABLEUSES MARTINIQUAISES

En Martinique, on identifie environ 117 plages, dont plus d'une centaine ont fait l'objet d'une expertise de terrain dans le cadre de cette étude, en novembre 2014.

On distinguera deux principaux types de plages en Martinique : celles situées en fond de baies, généralement convexes, encadrées par des côtes rocheuses et généralement alimentées par une rivière qu'on appellera « plage de poche » (ou « de baie ») et les autres, dites « plages ouvertes » occupant un grand linéaire côtier sableux, longeant par exemple, les pieds de falaises rocheuses.

Les trois-quarts des plages de Martinique sont des plages dites « de poche ». Une trentaine seulement ont une indentation très faible et présentent en conséquence un comportement de plages dites ouvertes comme le montre l'Illustration 4.

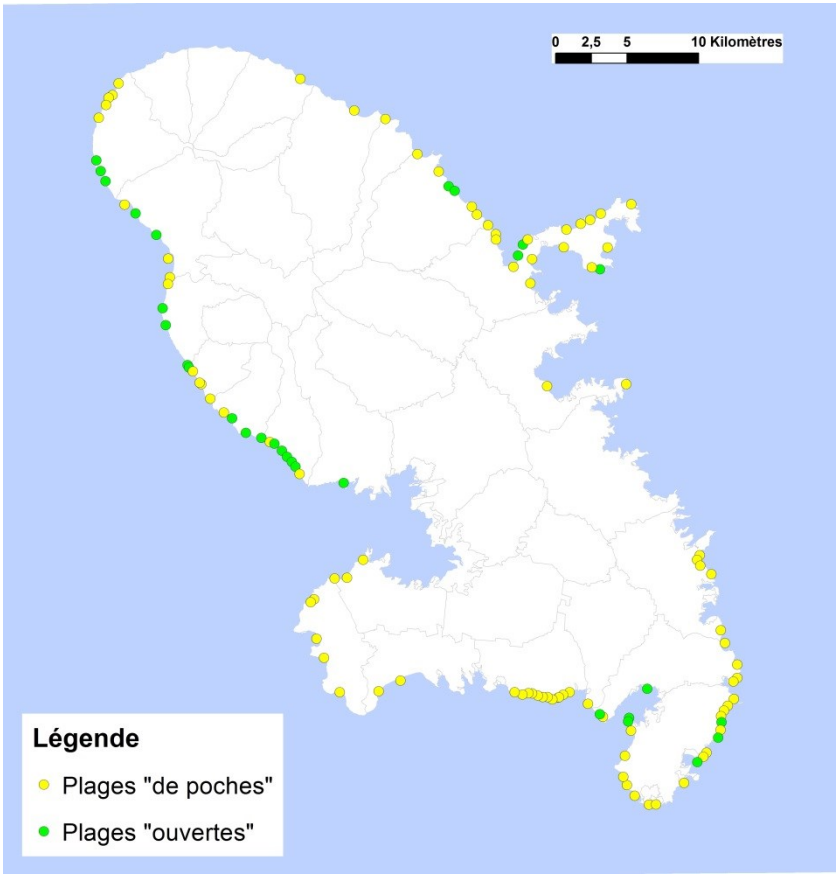


Illustration 4 : La typologie des plages martiniquaises

3.1.1. Description morphologique des plages

Caractérisation des plages

Les plages dites ouvertes sont usuellement décrites, par leur largeur (définie comme la distance moyenne entre l'interface terre-mer et la limite de végétation), la pente de l'avant côte et leur orientation.

Les plages de poches sont souvent mieux caractérisées car leur dynamique est en grande partie aussi déterminée par les caractéristiques de la baie : indentation (profondeur a sur ouverture Ro), ouverture Ro, angle entre la houle dominante et l'ouverture de la baie β (cf. Illustration 5). D'après les travaux de Hsu *et al.* (1989), la géométrie de la baie est en équilibre avec les conditions de forçages. Les caractéristiques morphologiques à un instant t permettent en conséquence d'évaluer si une plage est en équilibre ou si elle devrait évoluer pour rejoindre cette équilibre, auquel cas elle est considéré instable (Balouin *et al.,* 2014).

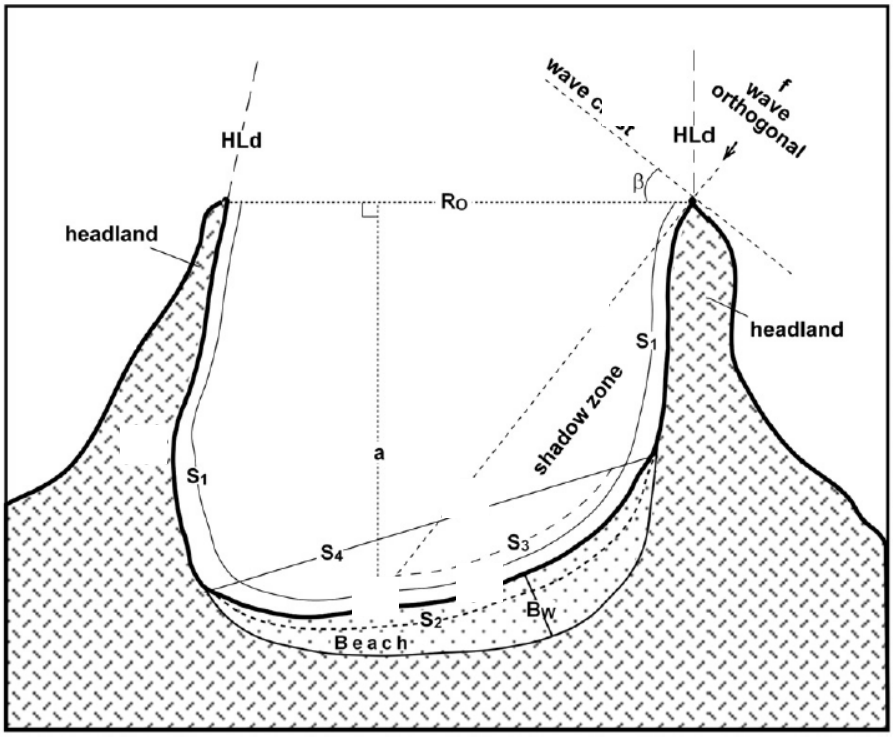


Illustration 5 : Caractéristique morphologique d'une plage de poche (a : profondeur, Ro : ouverture, β : angle entre la houle dominante et l'ouverture de la baie) (Bowman et al., 2009)

Description morphologique des plages martiniquaises

Dans le cadre de cette étude, les caractéristiques morphologiques de chaque plage ont été déterminées à partir des photos aériennes. Parmi ces caractéristiques, la largeur et l'indentation sont représentées en Illustration 6.

Ainsi, la largeur des plages martiniquaises définie comme la distance moyenne entre l'interface terre-mer et la limite de végétation à un instant donné (sur la photo de 2010) oscille entre un minimum de 2 m jusqu'à 35 m.

L'indentation des plages est définie comme le ratio profondeur/ouverture (a/Ro de l'Illustration 5). Les classes d'indentation présentées ici sont les suivantes :

- 0.01<a/Ro<0.1 : indentation très faible (l'ouverture est au moins 10 fois supérieure à la profondeur) ;
- 0.1<a/Ro<0.3 : indentation faible ;
- 0.3<a/Ro<0.5 : indentation moyenne ;
- 0.5<a/Ro<1 : indentation forte ;
- 1<a/Ro<2 : indentation très forte.

On constate sur l'Illustration 6 que les plages de poche du nord de la Martinique ont une indentation plus faible, ce qui rejoint le contraste morphologique entre le nord et le sud, beaucoup plus découpé par une succession de baies, de caps et d'anses. Les plages les plus « indentées » sont situées sur les massifs géologiques les plus anciens, au sud de l'île et plus particulièrement, sur la presqu'ile de la Caravelle où l'érosion et l'évolution morphologique a conduit à inciser les baies.

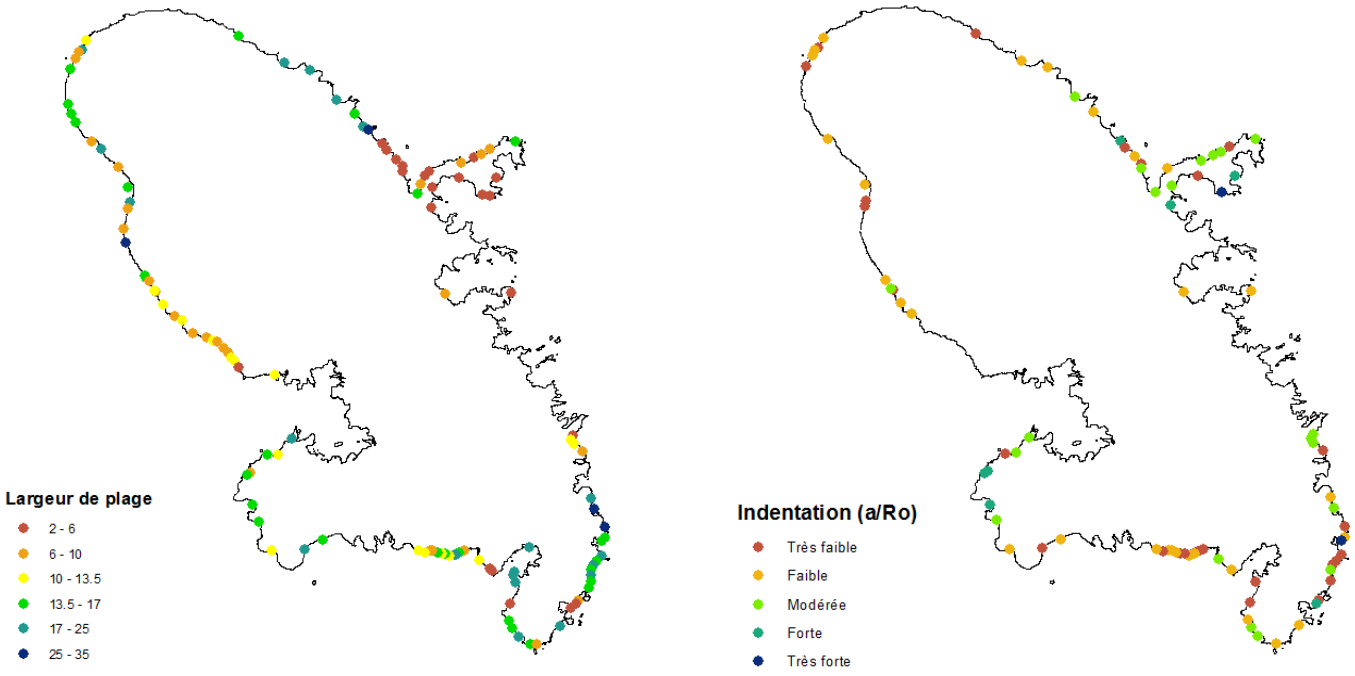


Illustration 6 : Estimation de la largeur des plages martiniquaises (en m) et l'indendation des plages de poche à partir des photos aériennes de 2010

3.1.2. Comportement morphodynamique des plages martiniquaises

Ces plages de poches ont une particularité géomorphologique : elles sont souvent indépendantes des plages adjacentes et ont des comportements morphodynamiques typiques de basculement et/ou d'oscillations.

Le basculement d'une plage est lié à l'alternance des conditions de houle, saisonnières ou plus ponctuelles qui modifie le transit sédimentaire d'un côté à l'autre de la baie et aboutissent à des accumulations de sables (cf. Illustration 7a).

L'oscillation correspond à l'alternance d'une avancée et d'un recul du trait de côte de la baie, de manière homogène sur tout le linéaire (cf. Illustration 7b). Cette avancée/recul s'effectue de manière saisonnière ou lors de tempêtes. Les bermes sur le haut de plage participent à ce mécanisme en stockant le sable pendant la phase de ré-engraissement des plages. Sur le moyen à long terme (décennale à pluri-décennale), notamment en cas de déficit d'apport sédimentaire, le recul peut être dominant du fait d'une migration cross-shore des sédiments lors d'évènements énergétiques. Les sédiments peuvent alors être stockés sur l'avant plage (partie sous-marine) et être, dans ce cas, remobilisables et participer ultérieurement au réengraissement de la plage ou au contraire, sortir définitivement du système car stockés à une profondeur trop importante pour être repris en charge. Cette dynamique peut alors se traduire par une perte en sable pour la plage et un recul du trait de côte.

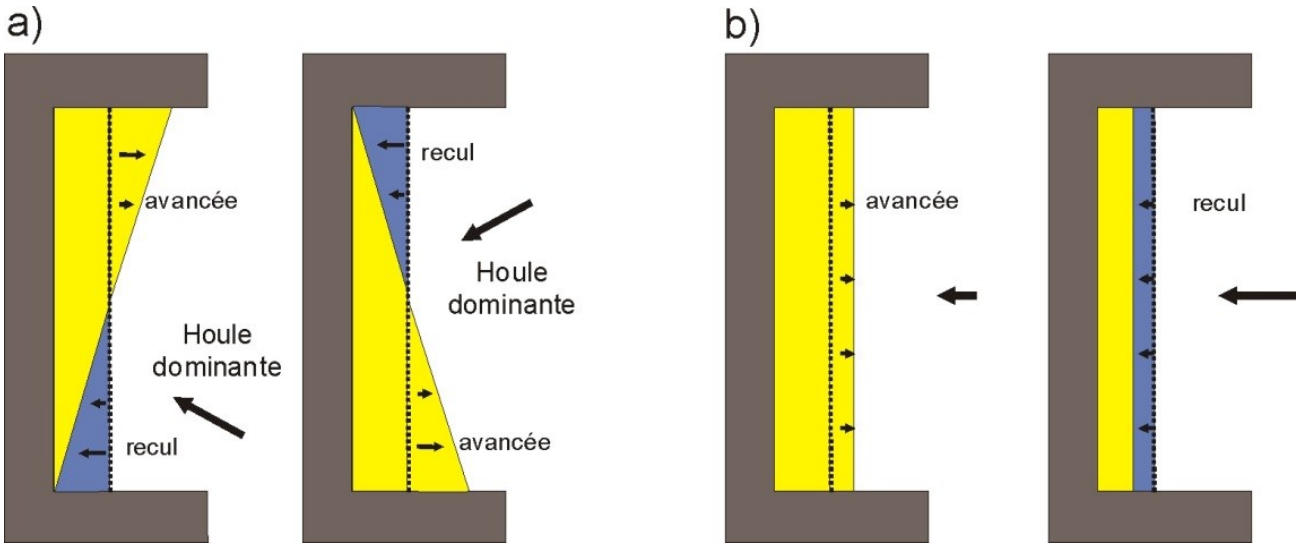


Illustration 7 : Mécanismes de : a) basculement d'une plage (Modifié d'après Short et Masselink, 1999) ; et b) oscillation d'une plage de poche.

L'analyse des photographies aériennes et de la position de la ligne de rivage au cours du temps permet généralement de mettre en évidence ce type de fonctionnement hydro-sédimentaire (cf l'exemple sur la plage de Madiana présenté en Illustration 8).

Illustration 8 : Exemple de basculement sur la plage de Madiana (photographies ©GoogleEarth)

3.2. LES OBSERVATIONS HISTORIQUES ILLUSTRANT LA DYNAMIQUE DES PLAGES MARTINIQUAISES

Deux indicateurs complémentaires l'un de l'autre, sont nécessaires pour mesurer la dynamique des plages :

- Un indicateur géomorphologique mesurant l'évolution de la position du trait de côte à moyen et long terme (décennale à pluri décennale). Pour les plages, cet indicateur est souvent la limite de végétation permanente de haut de plage (LVP) ;
- Un indicateur plus sensible aux variations intra-annuelles des stocks sableux (pouvant être très importante en période cyclonique) : l'interface terre-mer (ITM), soit la limite du jet-de-rive ou la berme de basse plage lorsqu'elle est présente.

3.2.1. La mobilité de la végétation permanente de haut de plage (LVP)

Les études précédentes (Nachbaur A. et al. (2014) - BRGM/RP-63238-FR) ont mis en évidence la mobilité du trait de côte martiniquais défini comme l'interface entre la plage et la limite végétalisée du haut de plage.

Sur les 117 plages sableuses principales, 25 présentent un recul à long terme de la limite de la végétation permanente (cf Nachbaur *et al.,* 2014). Parmi ces plages en érosion, 5, localisées essentiellement au sud-est sur la côte atlantique, présentent également, un recul à moyen terme de la LVP. Certaines plages présentent à l'inverse une avancée de la LVP.

Cependant, si la limite de la végétation permanente de haut de plage représente l'évolution de la position du trait de côte à long terme, elle ne permet pas de caractériser les variations intra-annuelles des stocks sableux.

3.2.2. La mobilité de l'interface terre-mer (ITM)

La mobilité de l'interface terre-mer (ITM) est un indicateur de l'état des plages, complémentaire de l'évolution de la limite de végétation. Il permet en effet d'appréhender la largeur de plage (largeur de plage(t) = ITM(t) – LVP(t)), et par conséquent le stock sédimentaire émergé

disponible sur un site. Par ailleurs, cette interface est plus sensible à l'hydrodynamique saisonnière que la limite de la végétation permanente (LVP).

Les deux indicateurs (limite de la végétation permanente et interface terre-mer) sont donc complémentaires et permettent d'anticiper les évolutions attendues. En effet, une plage où la limite de végétation (LVP) est stable mais où l'interface terre-mer recule de manière chronique, voit sa vulnérabilité à l'érosion augmenter progressivement alors qu'une plage où la limite de végétation a reculé lors d'un événement, mais où la largeur semble stable, aura un potentiel de résilience beaucoup plus important.

Dans cette étude, l'interface terre-mer (ITM) des plages n'a pas été digitalisée mais un indicateur a pu être défini par plage afin d'évaluer la tendance d'évolution de cette interface terre-mer d'après l'observation des photos aériennes.

3.2.3. Évaluation de ces deux indicateurs sur les plages martiniquaises

L'Illustration 10 présente l'évolution de ces deux indicateurs sur deux échelles de temps, se basant sur l'étude de Nachbaur et al. (2014) (BRGM/RP-63238-FR) et sur l'évaluation de l'évolution de la position de l'interface terre-mer effectuée dans le cadre de la présente étude. Sont présentées les évolutions à long-terme (1951-2010) et l'évolution à moyen-terme (2004-2010).

	Long terme (1951-2010)	Moyen terme (2004-2010)
Recul fort	Δtdc > -25 m	Δtdc > -10 m
Recul modéré	-10 m< Δtdc < -25 m	-5 m< Δtdc < -10 m
Stabilité	Δtdc < ±10 m	Δtdc < ±5 m
Avancée modérée	+10 m < Δtdc < +25 m	+5 m < Δtdc < +10 m
Avancée forte	Δtdc > +25 m	Δtdc > +10 m

Illustration 9 : Classes utilisées pour la détermination qualitative des avancées/reculs du trait de côte à moyen et long-terme

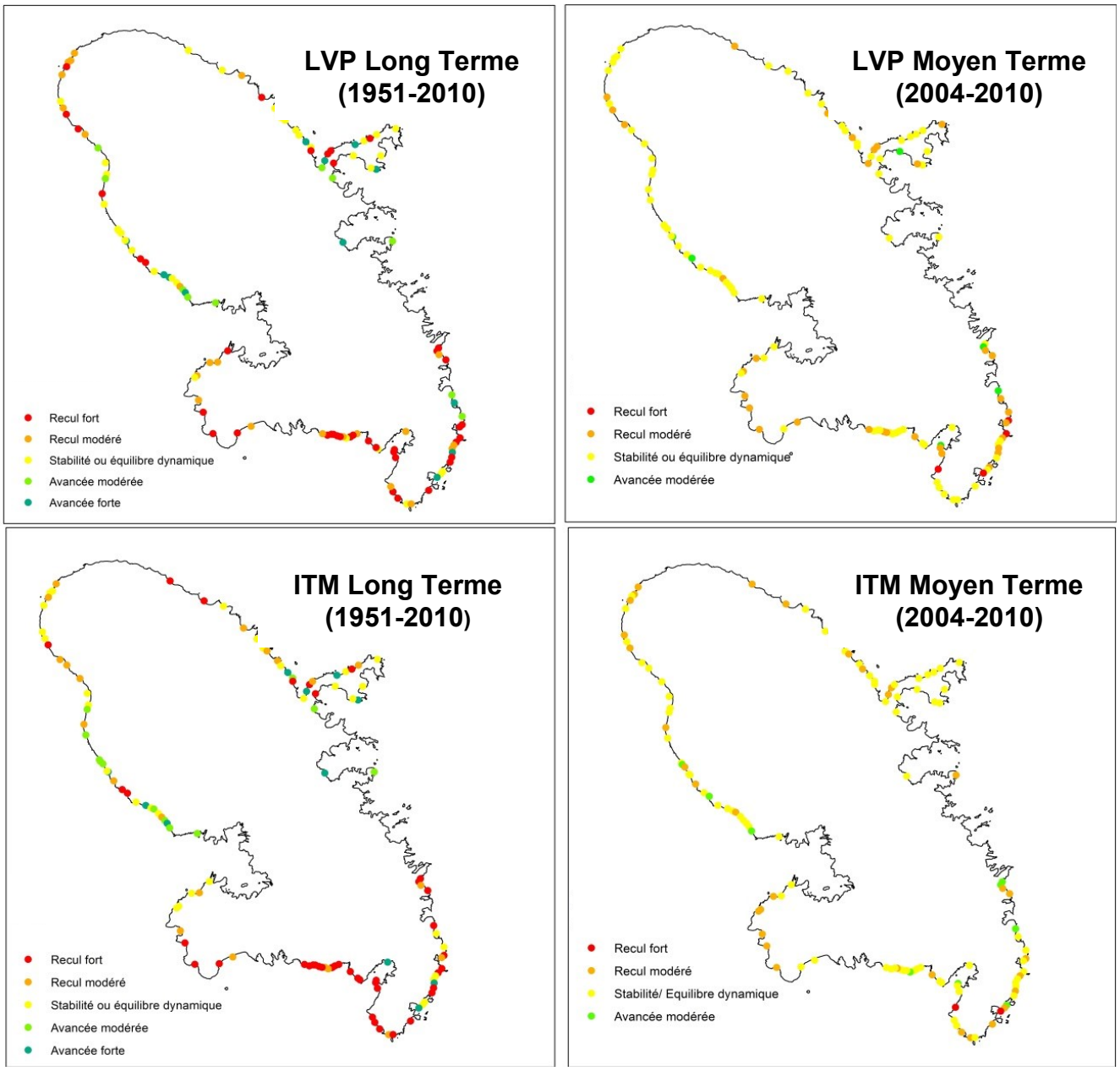


Illustration 10 : Evolution de la limite de végétation permanente (LVP) (en haut) à long et moyen-terme ; Evolution de l'interface terre-mer (ITM) (en bas) à long et moyen terme.

On note que si globalement les positions des deux indicateurs (LVP et ITM) présentent des évolutions similaires (cf. Illustration 11 et Illustration 12), certains sites présentent des évolutions contrastées. C'est par exemple le cas de l'anse Mabouyas à Sainte-Luce où la LVP recule modérément mais l'interface terre-mer recule fortement, ce qui se traduit par une diminution de la largeur de plage et donc une augmentation de sa vulnérabilité à l'érosion (diminution de sa capacité résiliente).

		LVP Long Terme	LVP Moyen Terme	ITM Long Terme	ITM Moyen Terme			LVP Long Terme	LVP Moyen Terme	ITM Long Terme	ITM Moyen Terme
Plage Bourg Sainte Luce	Ste-Luce					Plage Anse Madame (FondSaint Jacques)	Ste-Marie				
Plage Anse Gros Raisin	Ste-Luce					Plage Lieu-dit L'Union	Ste-Marie				
Plage en aval Anse Gros Raisin (1w)	Ste-Luce					Plage Rade Sainte-Marie	Ste-Marie				
Plage en aval Anse Gros Raisin (2e)	Ste-Luce					Plage Anse Dufour (2)	Ste-Marie				
Plage Lieu-dit Gros Raisin	Ste-Luce					Plage Anse Azérot	Ste-Marie				
Plage en aval Pointe Philippeaux	Ste-Luce					Plage Anse Richer	La Trinité				
Plage Lieu-dit Pont Café	Ste-Luce					Plage Anse à Dièque	La Trinité				
Plage Anse Corps de Garde (1)	Ste-Luce					Plage Anse Cosmy	La Trinité				
Plage Anse Corps de Garde (2)	Ste-Luce					Plage Baie des Raisiniers	La Trinité				
Plage Anse Corps de Garde (3)	Ste-Luce					Plage Vierge des Marin-Pointe Jacob	La Trinité				
Plage Anse Corps de Garde (4)	Ste-Luce					Plage en amont Pointe Rochelle	La Trinité				
Plage Anse Mabouyas	Ste-Luce					Plage Pointe Rochelle - Pointe Batterie	La Trinité				
Plage Anse Figuier	Rivière-Pilote					Plage Baie de Tartane	La Trinité				
Plage Grande Anse	Ste-Anne					Plage Lieu-dit La Brèche	La Trinité				
Plage Anse la Balle (1)	Ste-Anne					Plage Anse l'Etang	La Trinité				
Plage Anse la Balle (2)	Ste-Anne					Plage Anse Bonneville	La Trinité				
Plage en amont Anse Noire	Ste-Anne					Plage Anse du Bout	La Trinité				
Plage Anse Noire (2)	Ste-Anne					Plage Pointe Ferré / Pointe Granjean	La Trinité				
Plages Anse Esprit et Anse au Bois	Ste-Anne					Plage Pointe Brunel /Baie Gros Raisin	La Trinité				
Plage Anse Michel	Ste-Anne					Plage Baie Gros Raisin	La Trinité				
Plage Lieu-dit Petit Sable	Ste-Anne					Plage Lieu-dit Spoutourne	La Trinité				
Plage Anse Trabaud	Ste-Anne					Plage Anse Belgrade	La Trinité				
Plage Anse à Prunes (1)	Ste-Anne					Plage Lieu-dit Cité Bac ou le Galion	La Trinité				
Plage Anse à Prunes (2)	Ste-Anne					Plage Lieu-dit Four à Chaux	Le Robert				
Plage Grande Anse des Salines	Ste-Anne					Plage en aval Pointe La Rose	Le Robert				
Plage Petite Anse des Salines	Ste-Anne					Plage Anse des Galets	Le Précheur				
Plage Anse Meunier	Ste-Anne					Plage Anse à Voile	Le Précheur				
Plage Anse Caritan	Ste-Anne					Plage Anse Lévrier	Le Précheur				
Plage Pointe Marin (1)	Ste-Anne					Plage Anse Couleuvre	Le Précheur				
Plage Pointe Marin (2)	Ste-Anne					Plage Anse Céron	Le Précheur				
Plage Pointe Marin (3)	Ste-Anne					Plage Les Abymes	Le Précheur				
Plage en amont Pointe Coton	Ste-Anne					Plage Bourg Prêcheur	Le Précheur				
Plage en aval Pointe Coton	Ste-Anne					Plage Quartier du Cimetière	Le Précheur				
Plage Grande Anse (Diamant)	Le Diamant					Plage de Fond Canonville à Pointe Lamare	St-Pierre				
Plage Anse Cafard	Le Diamant					Plage en amont Fond Canonville	St-Pierre				
Plage Petite Anse (Diamant)	Anses-d'Arlet					Plage Lieu-dit Fond Corré	St-Pierre				
Plage Anse d'Arlet	Anses-d'Arlet					Plage Bourg Saint Pierre	St-Pierre				
Plage Grande Anse d'Arlet	Anses-d'Arlet					Plage Anse Latouche	Le Carbet				
Plage Anse Noire (1)	Anses-d'Arlet					Plage Anse Turin	Le Carbet				
Plage Anse Dufour (1)	Anses-d'Arlet					Plage Bourg Carbet	Le Carbet				
Plage Anse Mathurin	Les Trois-Ilets					Plage Lieu-dit Le Coin	Le Carbet				
Plage Anse à l'Ane	Les Trois-Ilets					Plage Lieu-dit Fond Capot	Le Carbet				
Plage Anse Mitan	Les Trois-Ilets					Plage Lieu-dit l'Autre Bord	Le Carbet				
Plage Anse Simon	Le Vauclin					Plage Bourg Bellefontaine	Bellefontaine				
Plage Baie du Vauclin	Le Vauclin					Plage amont appontement Bellefontaine	Bellefontaine				
Plage Bourg Vauclin	Le Vauclin					Plage aval appontement Bellefontaine	Bellefontaine				
Plage Pointe Faula	Le Vauclin					Plage Lieu-dit Fond Boucher	Bellefontaine				
Plage Petite Anse Macabou	Le Vauclin					Plage Lieu-dit Petit Fourneau	Case-Pilote				
Plage Grande Anse Macabou	Le Vauclin					Plage Bourg Case Pilote	Case-Pilote				
Plage Anse Grosse Roche	Le Marin					Plage Fond Bourlet	Case-Pilote				
Plage Anse Four à Chaux	Le Marin					Plage Fond Bellemare	Case-Pilote				
Plage Anse Baleine	Le Marin					Plage Fond Bernier	Schoelcher				
Plage Bourg Marin	Le Marin					Plage Fond Lahaye	Schoelcher				
Plage en aval Pointe Borgnesse (1)	Le Marin					Plage Anse Collat	Schoelcher				
Plage en aval Pointe Borgnesse (2)	Le Marin					Plage Anse Madame	Schoelcher				
Plage Anse Chalvet	Basse-Pointe					Plage Bourg Schoelcher	Schoelcher				
Plage Grande Anse (Lorrain)	Le Lorrain					Plage Madiana	Schoelcher				
Plage Anse Mass	Marigot					Plage Anse Gouraud	Schoelcher				
Plage Anse Charpentier	Ste-Marie					Plage Fort Saint Louis	Fort-de-France				

Illustration 11 : Evolution de la position de la limite de végétation permanente (LVP) et de l'interface terre-mer (ITM) à long et moyen-terme sur les plage de Martinique (En rouge, recul fort, en orange recul modéré, en blanc, stabilité, en vert et vert foncé, avancée modérée et forte).

	Recul fort	Recul modéré	Stabilité	Avancée modérée	Avancée forte
Mobilité de la végétation permanente de haut de plage (LVP)					
LVP Long-terme (1951-2010)	41 (35%)	22 (19%)	33 (28%)	10 (8%)	12 (10%)
LVP Moyen -terme (2004-2010)	4 (3%)	33 (28%)	75 (64%)	6 (5%)	11 0 (0%)
Mobilité de l'interface terre-mer (ITM)					
ITM Long-terme (1951-2**010)**	42 (36%)	21 (18%)	32 (27%)	12 (10%)	(9%)
ITM Moyen-terme (2004-2010)	2 (2%)	33 (28%)	74 (63%)	9 (8%)	0 (0%)

Illustration 12 : Nombre de plages présentant des reculs ou avancées de la limite de végétation permanente (LVP) et de l'interface terre-mer (ITM) à long et moyen-terme

Les préconisations de gestion de ces plages sableuses et les moyens de lutte contre l'érosion et le recul du trait de côte, sont abordés au chapitre 6.

4. Caractérisation des houles saisonnières

Le courant de dérive littorale (le courant parallèle à la côte) est le principal moteur du transport de sédiment et donc, de l'évolution du trait de côte à long terme. Ce courant est généré par le déferlement de la houle et se concentrent sur les plages et l'avant plage sous-marine. Sa direction dépend directement de l'angle d'incidence de la houle dans la zone de déferlement. L'incidence est donc l'angle que forme la côte avec la direction de propagation des vagues, une houle arrivant parfaitement perpendiculairement au littoral a une incidence dite « normale » à la côte et ne génèrera pas de courant longitudinal et de dérive littorale.

De manière à caractériser les types de houles affectant le littoral martiniquais, une classification des conditions de vague et de vent au large à partir de 23 ans de données (modèle de vague forcé par des vents de ré-analyses sur la période 1990 à 2012) a été réalisée. Ce travail permet de déterminer des classes de vague et vent représentatives des situations moyennes observables au large. À partir de ces conditions moyennes, des modélisations en domaine côtier (résolution 100 m), ont permis de tenir compte de l'évolution des conditions de vague du large à la côte en fonction de l'exposition du littoral, de la bathymétrie ou de la présence de récifs coralliens. Ces simulations ne prennent toutefois pas en compte les particularités des vents locaux et notamment les effets orographiques, brises thermiques, etc.

4.1. DONNÉES D'ENTRÉES ET MODÈLE UTILISÉ POUR LES SIMULATIONS

4.1.1. Données des houlographes

Il existe autour de la Martinique trois houlographes du réseau Candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ : http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/) : une au Nord à Basse Pointe (période de mesures du 31/12/1998 au 31/12/2014),une au Sud près de l'île de Sainte Lucie (période de mesures du 20/06/2007 au 17/03/2011) et une au large de la Baie de Fort de France (période de mesures du 21/11/2001 au 06/04/2011). Pour chacune de ces bouées, les informations disponibles sont : les données des houles en temps réel au jour le jour et heure par heure, des graphes mensuels des hauteurs des vagues et de nombreuses données statistiques.

Ces données disponibles à proximité des côtes martiniquaises (cf. Illustration 14) permettent de valider les modèles considérés.

4.1.2. Données bathymétriques

Les données bathymétriques utilisées proviennent des sondes HISTOLITT-SHOM (cf. Illustration 13).

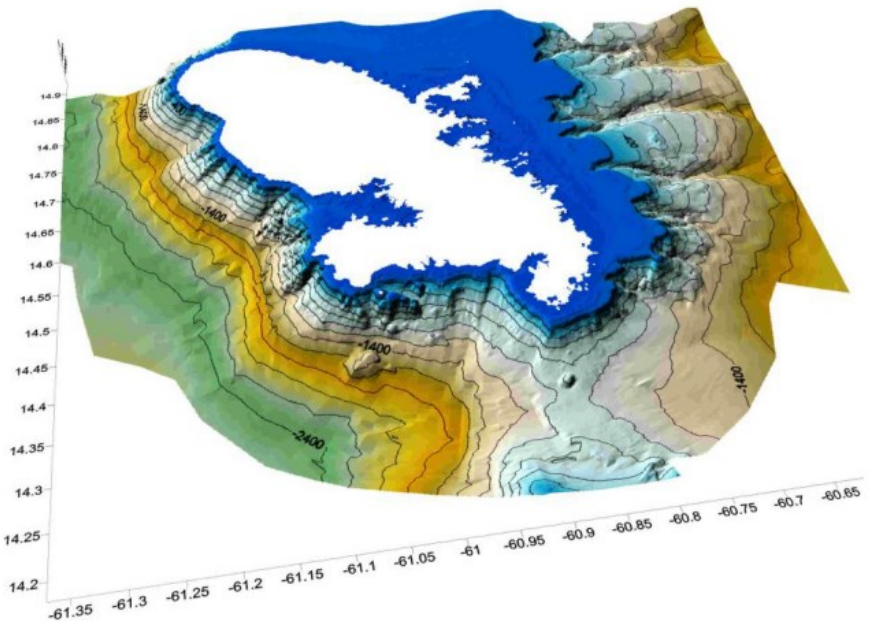


*Illustration 13 : Modèle Numérique de Terrain de la bathymétrie de la Martinique construit à partir des données du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) (Maillage : 100 m * 100 m). Source : Poisson et Pedreros, 2007.*

4.1.3. Données de vent et de vagues à l'échelle de l'Arc antillais

Les données de vague utilisées sont les résultats du modèle de génération de vagues IOWAGA-CRB[1] développé par l'IFREMER. Ce modèle permet de calculer les paramètres de vague (dont la hauteur significative, la période et la direction) pour l'Arc antillais à partir de donnée de vents, à une résolution spatiale de 0,05 x 0,05° (≈ 3,7 km x 3,7 km) (cf. Illustration 14).

Les données de vent utilisées comme données d'entrée sont les données de ré-analyse CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)[2], qui ont une résolution spatiale (0,5 x 0,5°) (≈ 55 km x 55 km) et une résolution temporelle de 3h.

Ainsi, les données de vagues au large sont extraites du modèle de vagues IOWAGA-CRB sur 23 ans de données, de 1990 à 2012, avec une résolution temporelle de 3h.

[1] http://wwz.ifremer.fr/iowaga/

[2] *Climate Forecast System Reanalysis* du NCEP (*National Centers for Environmental Prediction)* du centre Américain de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) pour la période 1990 à 2012 (cf : http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/)

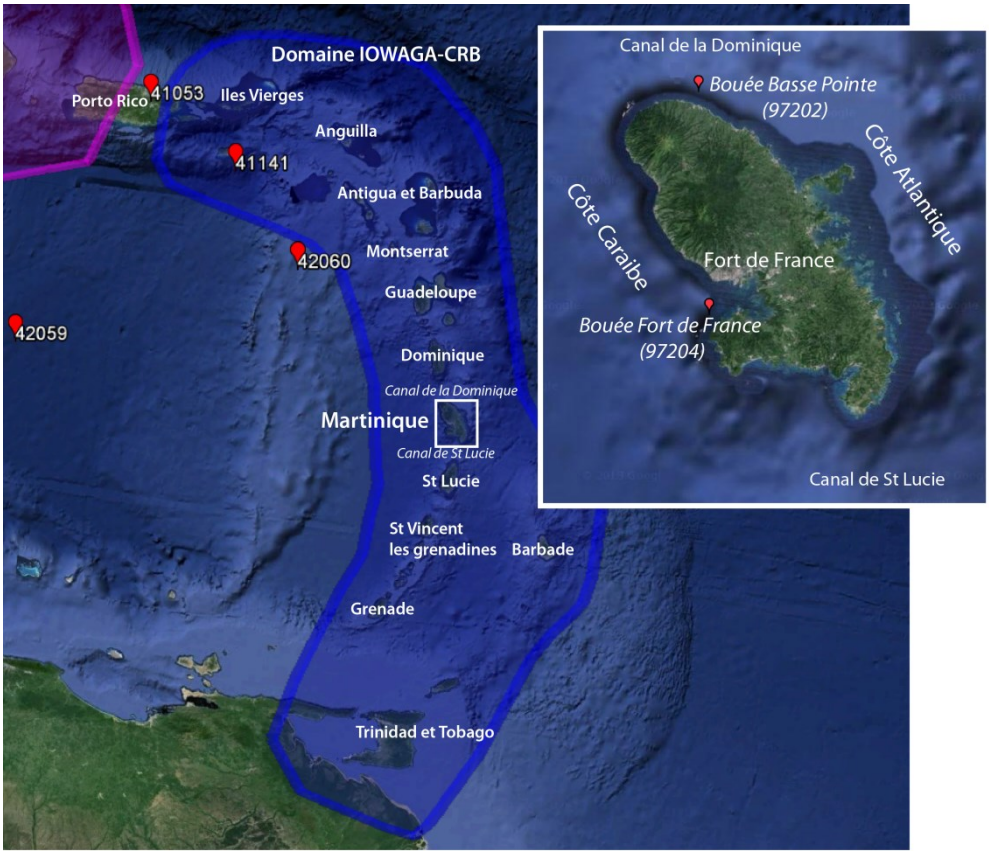


Illustration 14 : Emprise du modèle IOWAGA-CRB, image google earth

La validité de ce modèle a été vérifiée par comparaison avec les observations à la bouée de Basse-Pointe, localisée à environ 2 km des côtes au Nord de l'île (profondeur 51 m) (cf Illustration 14).

La comparaison des conditions de houle (Hauteur significatives : Hs) observées et modélisées est illustrée ci-dessous (Illustration 15) pour l'année 2012, cette année offrant des observations quasi continue toute l'année. On constate que les hauteurs significatives des vagues sont correctement reproduites.

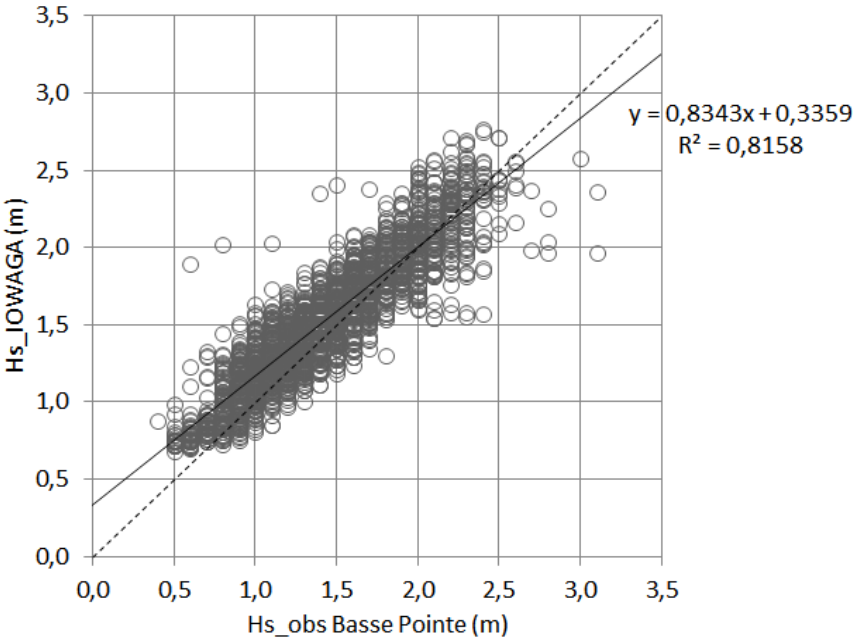


Illustration 15 : Comparaison des hauteurs caractéristiques des vagues (Hs), entre observations à la bouée de Basse Pointe (97202) et données issues du modèle IOWAGA-CRB forcé par les vents CFSR pour l'année 2012.

Au-delà, la capacité du modèle à reproduire l'ensemble des paramètres fondamentaux des vagues (hauteurs significatives Hs, période pic Tp et direction Dp) est illustrée en Illustration 16. On constate que les données modélisées (en rouge) suivent précisément les fluctuations de chacun des paramètres observés (en bleu), plus particulièrement :

- les données de hauteurs significatives (Hs) sont bien reproduites sur l'ensemble de la période avec parfois une légère sous-estimation du modèle lors des plus fortes vagues ;
- Les variations des conditions de périodes pics (Tp), sont correctement reproduites dans le temps, cependant la modélisation donne des périodes quasi systématiquement plus longues que les observations. Cette surestimation de l'ordre de 1.75 s en moyenne devra être gardée en mémoire mais elle n'aura pas d'impact sur les résultats de la présente étude. Ce type d'erreur est courant, la modélisation de la période présentant couramment des erreurs de l'ordre de 20 à 25 % ;
- Concernant les directions pics (Dp), la reproduction est également de bonne qualité, elle intègre notamment les changements rapide de directions et des situations peu fréquentes (provenance de Nord).

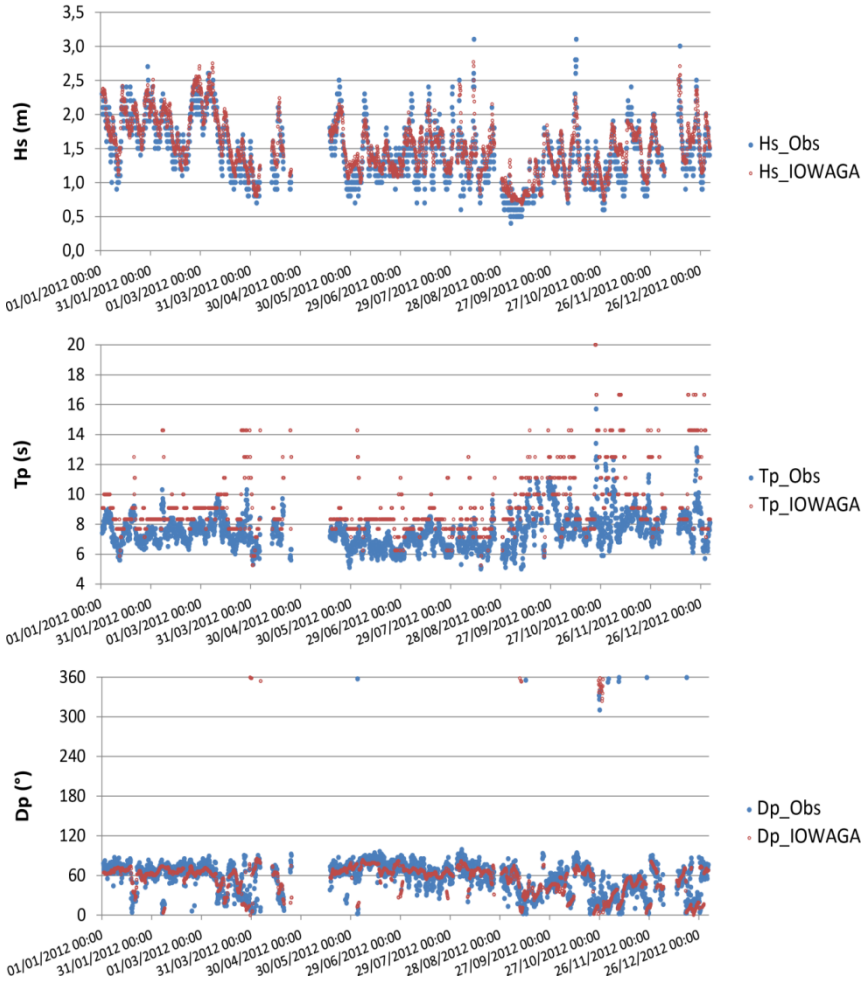


Illustration 16 : Comparaison des caractéristiques des vagues (hauteurs significative Hs, période pic Tp et direction pic Dp) entre observations à la bouée de Basse Pointe (en bleu) et données issues du modèle IOWAGA-CRB (en rouge) pour l'année 2012

Au regard des comparaisons réalisées entre données modélisées et observations, les résultats fournis par le modèle IOWAGA-CRB présentent un niveau de fiabilité adapté pour la réalisation d'une classification statistique des régimes de vague. Toutefois, l'analyse des données de IOWAGA – CRB pour la côte Caraïbe (bouée Fort de France, cf. Le Roy *et al.,* 2014 ; BRGM/RP-63529-FR) a montré des résultats plus contrastés sur la côte Caraïbes notamment dû à la résolution du modèle, mal adapté à proximité des côtes. C'est pourquoi, le traitement statistique des données du modèle sera réalisé pour des données au large, avant d'être propagé à la côte.

4.1.4. SWAN, le modèle de propagation des houles utilisé

Le modèle SWAN (Simulating Wave Nearshore) est un modèle spectral de houle développé par l'Université de Delft (Pays Bas), il permet de simuler :

- La propagation de la houle dans le temps et l'espace, le gonflement de la houle à la côte, la réfraction due aux courants ou à la bathymétrie ;
- La génération des vagues par le vent ;
- Les interactions vague-à-vague ou les interactions pour les houles composées de 3 à 4 nombres d'ondes en résonnance ;
- Le moutonnement, le frottement au fond et le déferlement dû aux variations bathymétriques ;
- Le set-up induit par la houle.

Le modèle SWAN est généralement utilisée pour simuler la propagation de la houle sur des zones côtières pour des bathymétries simples à complexes, sur des domaines d'études s'étendant sur des échelles allant du kilomètres à plusieurs centaines de kilomètres (Booij et al., 1999).

4.2. RECONSTITUTION DES HOULES AU LARGE ET CLASSIFICATION STATISTIQUE

4.2.1. Reconstitution des chroniques de houles en 3 points caractéristiques

À partir des résultats du modèle de houle IOWAGA-CRB décrit au § 4.1.3, les chroniques de houle ont été traitées sur les 23 ans de données disponibles, en 3 points positionnés pour tenir compte des caractéristiques des vagues sur les différentes façades de la Martinique[3]: P182, P194 et P29 localisés sur l'Illustration 17. En effet, les sorties du modèle sont fiables au large mais inadaptées à proximité des côtes, compte tenu de la résolution du modèle. La situation hydrodynamique à la côte sera ensuite obtenue par simulation numérique (cf. § 4.3) à partir de la classification statistique des climats de houle au large.

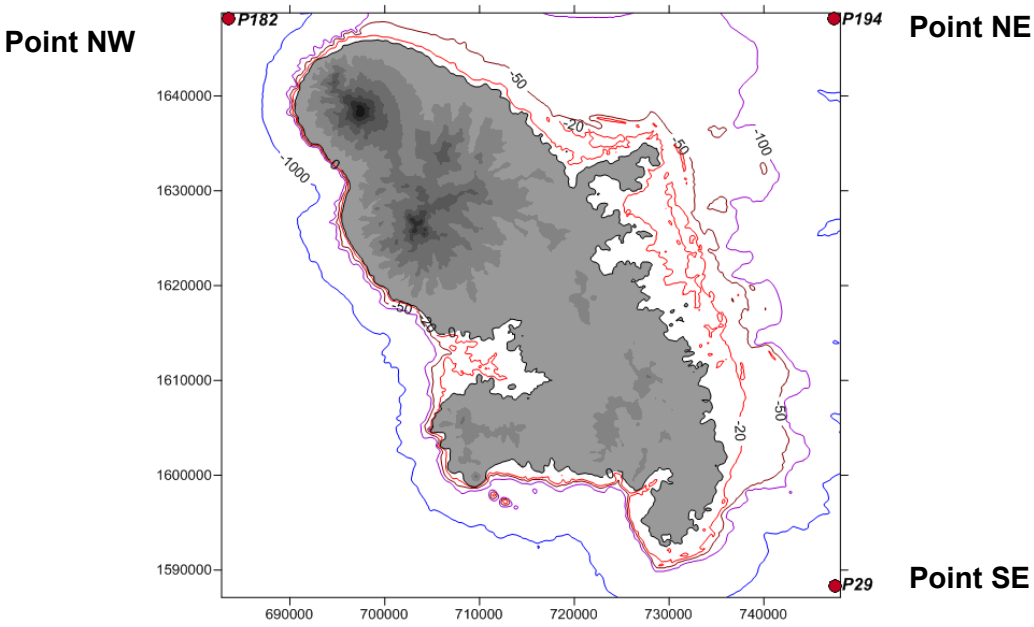


Illustration 17 : Localisation des points ayant fait l'objet d'une classification

[3] Le coin Sud-Ouest positionné « sous le vent », i.e. relativement à l'abri par rapport à la forme de l'île et à la direction de provenance des vagues. En ce point, les vagues sont orientés vers l'Ouest et sortent du domaine d'étude, il n'a donc pas été analysé.

Pour exemple, la série temporelle des hauteurs significatives des vagues entre 1990 et 2012 est donnée en Illustration 18.

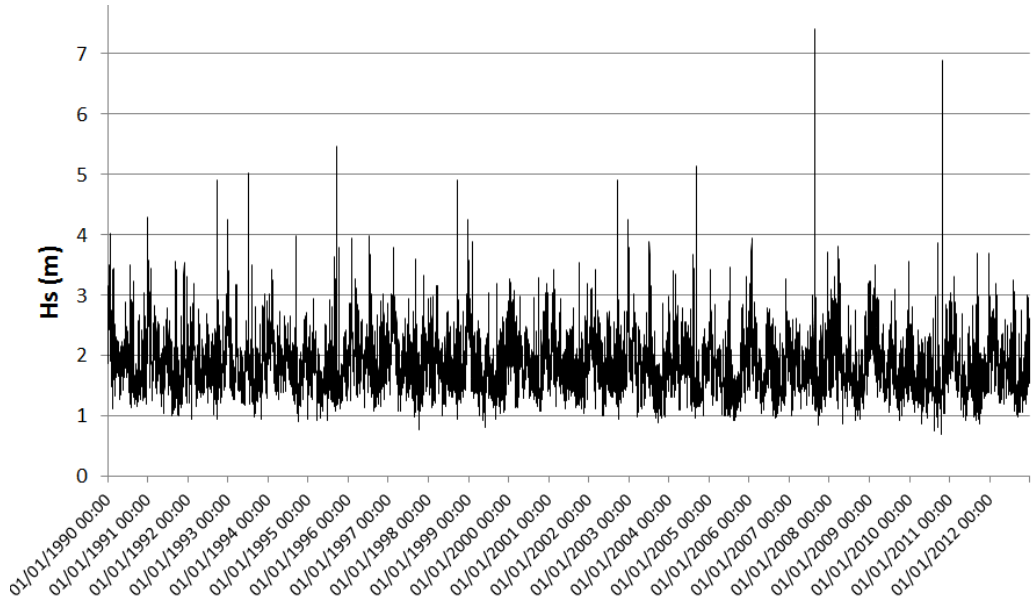


Illustration 18 : Série temporelle des hauteurs significatives Hs des vagues entre 1990 et 2012, au point 194

4.2.2. Classification des vagues au NW, NE et SE de la Martinique

Principe

La classification des régimes de vague a donc été réalisée au large de la Martinique. L'algorithme de classification utilisé est l'algorithme k-means (Le Cozannet *et al*., 2011). Les caractéristiques des vagues obtenues sont exprimées par un triplet de paramètres statistiques conventionnellement utilisés dans les études en océanographie littorale : une hauteur significative Hs[4], une période pic Tp[5] et une direction associée au pic d'énergie des vagues Dp[6].

Résultats

Cette classification a conduit à déterminer 5 classes de vague statistiquement représentatives des vagues observables sur les frontières Est et Nord de la Martinique.

Compte tenu de l'exposition de la côte atlantique aux vagues (provenant exclusivement de l'Est), les points NE et SE présentent des résultats similaires. Le point NW présente des caractéristiques légèrement différentes du fait de sa localisation (frontière Nord-Ouest) et donc

[4] Hs (m) « *Hauteur significative des vagues »* : moyenne du tiers de la hauteur des plus fortes vagues.

[5] Tp (s) « *Période pic des vagues* » : durée entre deux crêtes de vagues dominantes c'est-à-dire pour laquelle la densité spectrale est maximale.

[6] Dp (°) « *Direction pic de provenance des vagues* ») : direction en degrés au moment du maximum d'énergie spectral. L'angle est compté positivement, suivant le sens des aiguilles par rapport au Nord géographique (convention nautique).

de son exposition aux vagues : on y retrouve les mêmes classes dominantes de vague mais des valeurs de Hs globalement atténuées et de direction plus nettement Nord/Nord-Ouest.

Ces classifications mettent en évidence deux caractéristiques fondamentales de la saisonnalité du climat de houle à l'Est de La Martinique. On observe :

- que les vagues (mer du vent et houles) issues des vents alizés (origine locale à régionale) sont représentées tout au long de l'année et comptent pour entre 40 % et 95 % des vagues observables ;
- une différenciation nette des périodes de carême et d'hivernage se traduisant principalement par des vagues plus longues (houles), de provenance plutôt Nord/Nord-Est durant la période de carême.

L'Illustration 19 précise la saisonnalité de ces 5 grandes classes de vagues tandis que l'Illustration 20 détaille les caractéristiques aux trois points d'analyse.

	Hs	Tp	Dp	Type de vague	Origine	Mois max	Mois min	Saison privilégiée	Occurrence annuelle moy (%)
Classe 1	1 - 1,5 m	8 - 9 s	Est	Mer du vent/Houles	Locale/Régionale	Août	Janvier	Hivernage	≈ 35
Classe 2	≈ 2 m	8 - 9 s	Est	Mer du vent/Houles	Locale/Régionale	Juin	Décembre	Hivernage/Transition	≈ 30
Classe 3	≈ 1,5 m	≥ 10 s	Nord-Est	Houles	Lointaine	Décembre	Juillet	Carême/Transition	≈ 12
Classe 4	≈ 2 m	≈ 13 s	Nord/ Nord-Est	Houles	Lointaine	Décembre	Juillet/Aout	Carême/Transition	≈ 10
Classe 5	> 2 m	≈ 10 s	Est/ Nord-Est	Houles	Lointaine	Janvier	Juin	Carême	≈ 15

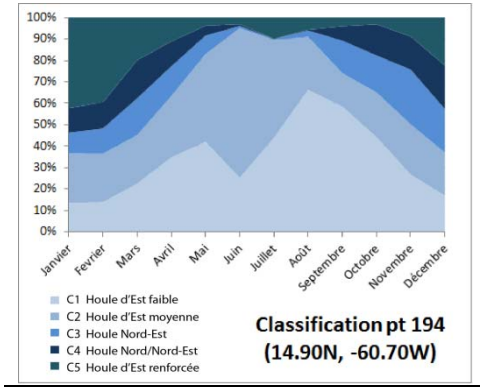
Illustration 19 : Caractéristiques moyennes et saisonnalité des 5 classes de vague

Significativité des résultats (Variabilité intra-classe)

Les valeurs associées à chaque classe sont des valeurs moyennes. La valeur de l'écart type de chaque paramètre donne une information sur la dispersion au sein de chaque classe. Ainsi, on note que la dispersion intra-classe est comprise :

- pour le paramètre Hs entre 10 et 25 % ;
- pour le paramètre Tp entre 7 et 11 %.

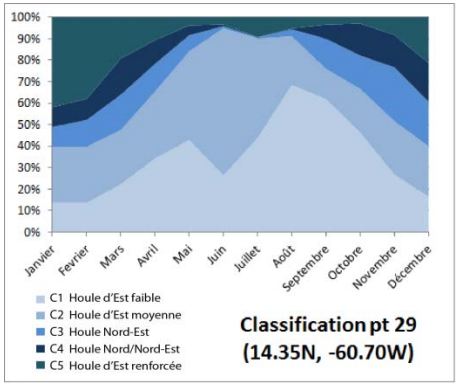
La dispersion directionnelle des vagues est de l'ordre de 10°. Toutefois, les houles lointaines de Nord/Nord-Est (classe 3 et 4), étant beaucoup moins fréquentes, sont regroupées pour constituer une classe statistiquement pertinente, ce qui induit une dispersion directionnelle plus importante (de l'ordre de 50 à 60 degrés en moyenne). La classe 4 peut ainsi regrouper des houles longues en provenance des secteurs NNO à NNE. La propagation de ces houles à la côte avec une valeur directionnelle moyenne peut en conséquence engendrer un lissage de certaines directions de provenance des vagues qu'il conviendra de prendre en compte dans l'interprétation des résultats à la côte.



Point NE

Classe	Point Nord-Est (pt194)	Hs (m)	σ-Hs (m)	Tp (s)	σ-Tp (s)	Dp (°)	σ-Dp (°)	Occurrence (%)
C1	Houle d'Est faible	1.4	0.2	8.4	0.8	81	13	34
C2	Houle d'Est moyenne	1.9	0.2	8.1	0.6	89	8	30
C3	Houle de Nord-Est	1.6	0.4	10.1	0.9	37	27	12
C4	Houle de Nord/Nord-Est	1.8	0.4	13.1	1.4	15	102	10
C5	Houle d'Est renforcées	2.5	0.4	9.1	0.9	74	9	15

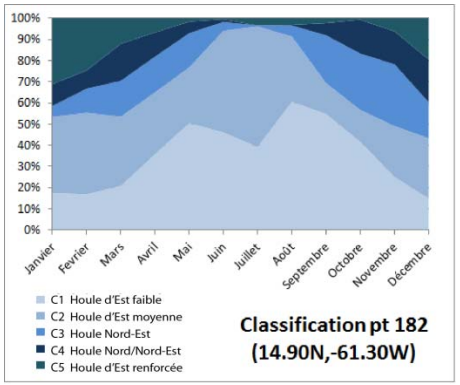
	Carême				Transition		Hivernage					Transition
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Houle d'Est faible	14	14	23	35	42	25	44	66	58	44	27	17
Houle d'Est moyenne	23	23	23	29	41	70	46	25	16	21	23	20
Houle de Nord-Est	10	12	17	14	9	1	0	3	15	17	26	20
Houle de Nord/Nord-Est	11	12	18	12	5	1	0	0	7	15	15	20
Houle d'Est renforcées	42	39	20	11	4	3	10	6	4	3	9	22



Point SE

Classe	Point Sud-Est (pt29)	Hs (m)	σ-Hs (m)	Tp (s)	σ-Tp (s)	Dp (°)	σ-Dp (°)	Occurrence (%)
C1	Houle d'Est faible	1.4	0.2	8.4	0.8	82	13	35
C2	Houle d'Est moyenne	1.9	0.2	8.1	0.6	87	8	31
C3	Houle de Nord-Est	1.6	0.4	10.1	0.9	41	16	11
C4	Houle de Nord/Nord-Est	1.8	0.4	13.1	1.5	19	34	9
C5	Houle d'Est renforcées	2.5	0.4	9.1	0.8	73	8	14

	Carême				Transition		Hivernage					Transition
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Houle d'Est faible	14	14	22	34	43	26	44	68	62	46	27	16
Houle d'Est moyenne	26	26	25	31	41	68	46	23	14	20	25	23
Houle de Nord-Est	9	12	16	13	8	1	0	3	14	16	25	21
Houle de Nord/Nord-Est	9	10	17	11	5	1	0	0	7	15	15	18
Houle d'Est renforcées	42	38	19	11	4	3	9	5	3	3	8	21



Point NW

Classe	Point Nord-Ouest (pt182)	Hs (m)	σ-Hs (m)	Tp (s)	σ-Tp (s)	Dp (°)	σ-Dp (°)	Occurrence (%)
C1	Houle d'Est faible	1.0	0.2	7.9	0.8	69	12	35
C2	Houle d'Est moyenne	1.5	0.2	8.2	0.8	68	6	32
C3	Houle de Nord-Est	1.0	0.3	10.4	1.1	33	61	14
C4	Houle de Nord/Nord-Est	1.4	0.4	13.5	1.6	26	58	9
C5	Houle d'Est renforcées	2.1	0.3	9.2	1.0	60	8	9

	Carême				Transition		Hivernage					Transition
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Houle d'Est faible	17	17	21	36	50	46	39	61	55	42	25	15
Houle d'Est moyenne	36	38	33	29	26	48	57	31	15	15	24	28
Houle de Nord-Est	5	11	17	17	16	4	0	5	23	27	29	17
Houle de Nord/Nord-Est	10	9	17	11	5	1	0	0	6	16	16	20
Houle d'Est renforcées	31	25	12	7	2	1	3	3	2	1	6	19

Illustration 20 : Caractéristiques moyennes et répartition saisonnière aux 3 points d'analyse : NW , NE et SE de l'île

4.2.3. Vents associés aux classes de vagues au large

Les conditions de vent (i.e. les vents soufflants à l'échelle du domaine d'étude) peuvent jouer un rôle primordial sur la propagation des vagues du large à la côte. Dans le cas de notre étude, le domaine (cf. Illustration 14) étant large de plusieurs dizaines de kilomètres et les forçages étant appliqués à plusieurs kilomètres de la côte, l'action des vents sur l'état de surface de la mer ne peut être négligée. Une analyse des conditions de vent issue du modèle a donc été réalisée.

L'analyse est réalisée pour le point NE (n°194), considéré comme un point de référence du fait de son exposition (cf. § précèdent). L'objectif ici est d'identifier pour chacune des classes de vagues déterminées précédemment, les conditions de vents correspondantes.

Ainsi, la vitesse et la direction des vents associées à chaque classe de vague ont été caractérisées et sont présentées en Illustration 21 et Illustration 22.

		Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Vitesse moy (m/s)	Vitesse med (m/s)	σ-Vitesse (m/s)	Direction moy (°)	Direction med (°)	σ-Direction
C1	Houle d'Est faible	1.4	8.4	80.8	6.0	6.0	1.9	88	80	46.8
C2	Houle d'Est moyenne	1.9	8.1	89.3	6.4	6.5	1.8	87	83	37.2
C3	Houle de Nord-Est	1.6	10.1	37.3	7.9	7.9	1.3	86	85	16.1
C4	Houle de Nord/Nord-Est	1.8	13.1	14.8	5.9	6.0	1.5	91	87	32.0
C5	Houle d'Est renforcées	2.5	9.1	74.4	8.9	9.0	1.8	81	78	25.7

Illustration 21 : Conditions de vents associées aux classes de vagues, au point NE (n°194)

On constate que les conditions de vent sont globalement stables, d'intensités modérées (6 à 9 m/s) et centrées sur une provenance Est (entre 80 et 90° N). En effet, les valeurs statistiques (moyennes et médianes, écart-types) montrent que les distributions sont nettement unimodales et symétriques. Par ailleurs, des écarts-types compris entre 20 et 30% sont classiques pour les conditions de vents (par nature plus instables que les conditions de vagues).

Ainsi, à chaque classe de vagues, il est possible d'associer des conditions de vents caractéristiques issus de la base de données CFSR (cf. Illustration 21). On rappelle que les conditions de vent traitées sont issus de la base de données CFSR de résolution spatial 0,5°x 0,5° (soit environ 55 km x 55 km). Cette base de données de vent ne permet pas de tenir compte des particularités des vents locaux (issues des brises thermiques, des effets orographiques..). Cependant, comme les vagues sur la côte Ouest de la Martinique sont particulièrement influencées par les vents locaux (cf § 2.3), ce point sera discuté au § 4.3.3.

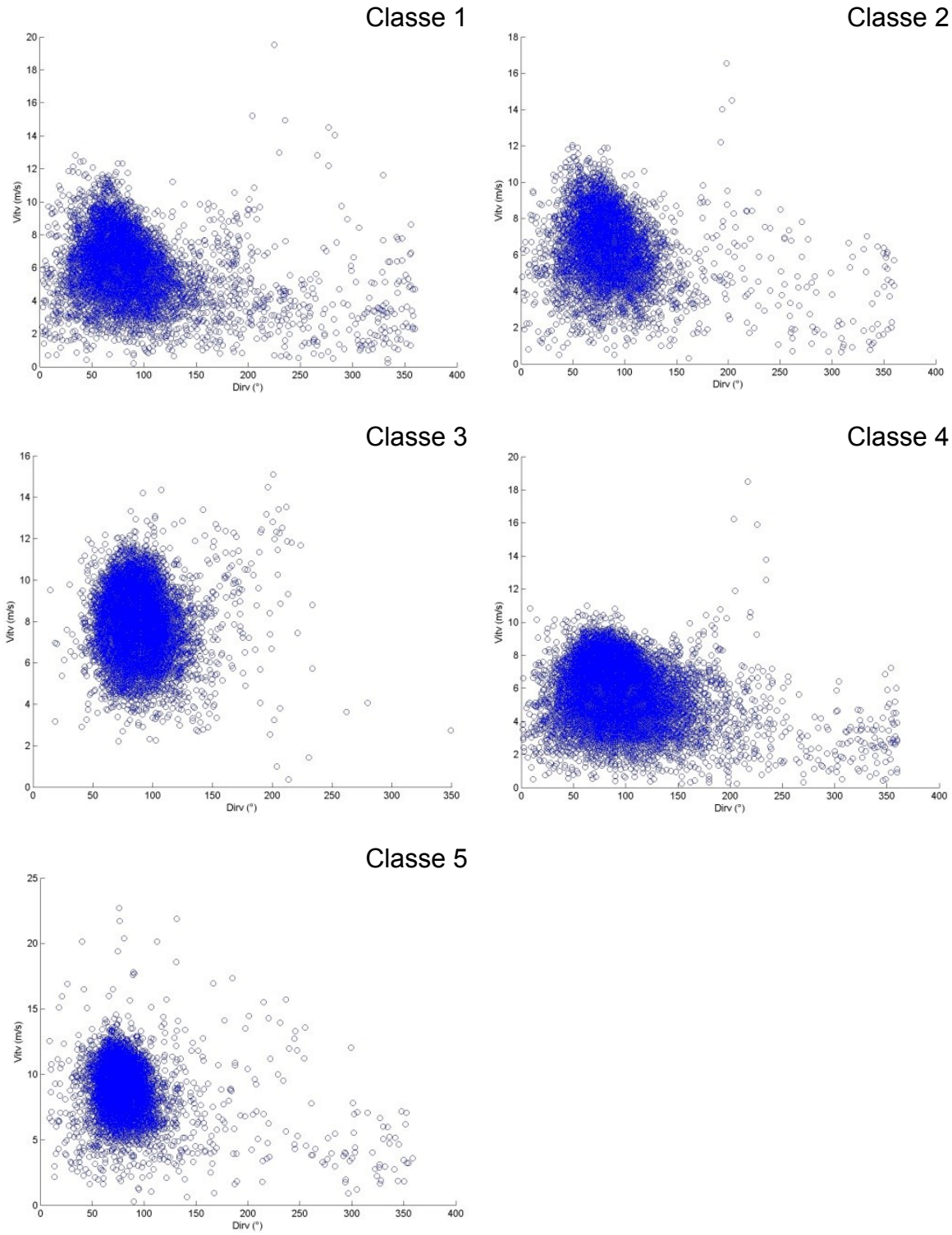


Illustration 22 : Distribution des conditions de vent au point NE (n°194) pour les 5 classes déterminées

4.3. MODÉLISATION DES CONDITIONS DE HOULE AUTOUR DE LA MARTINIQUE

4.3.1. Principe

À partir de la classification des vagues et des vents réalisée pour des conditions au large, les conditions à la côte ont été déterminées à une résolution spatiale de 100 m x 100 m sur l'ensemble du linéaire côtier martiniquais, grâce à une modélisation avec le code SWAN (présenté au § 4.1.4). L'emprise de la modélisation est présentée en Illustration 24. Lors de la simulation, les paramètres de discrétisation utilisés sont de 2 à 20 secondes en fréquence et de 10° en direction.

Un forçage a donc été appliqué aux frontières Est et Nord du modèle, à partir de la classification au large (cf. § 4.2.2). Un gradient est appliqué à la frontière Nord pour tenir compte de l'affaiblissement et du changement de direction des conditions de vague le long de cette frontière. Compte tenu de la direction dominante des vagues, les frontières Sud et Ouest sont des frontières ouvertes (les vagues se propageant vers l'extérieur du domaine). Les conditions de forçage aux points NW (n°182), NE (n°194) et SE (n°29) sont résumées dans l'Illustration 23 ci-dessous.

	Vagues Nord-Ouest (point 182)				Vagues Nord-Est (point 194)				Vagues Sud-Est (point 29)				Vents		Occurrence
	Hs	Tp	Dp	Etal	Hs	Tp	Dp	Etal	Hs	Tp	Dp	Etal	Vit	Dir	en %
Classe 1	1	7,9	69	27,8	1,4	8,4	81	40,5	1,4	8,4	82	40,5	6	88	34
Classe 2	1,5	8,2	68	31,4	1,9	8,1	89	36,8	1,9	8,1	87	36,8	6,4	87	30
Classe 3	1	10,4	33	34,4	1,6	10,1	37	34,4	1,6	10,1	41	34,4	7,9	86	12
Classe 4	1,4	13,5	26	25,9	1,8	13,1	15	37,8	1,8	13,1	19	37,8	5,9	91	10
Classe 5	2,1	9,2	60	30,4	2,5	9,1	74	42,4	2,5	9,1	73	42,4	8,9	81	15

Illustration 23 : Forçages associés à chacune des classes

Compte tenu de l'analyse présentée au § 4.2.3, les conditions de vent associées à chaque classe sont donc appliquées sous la forme d'une grille de vent d'intensité et de direction homogène couvrant l'ensemble du domaine d'étude (cf. Illustration 21).

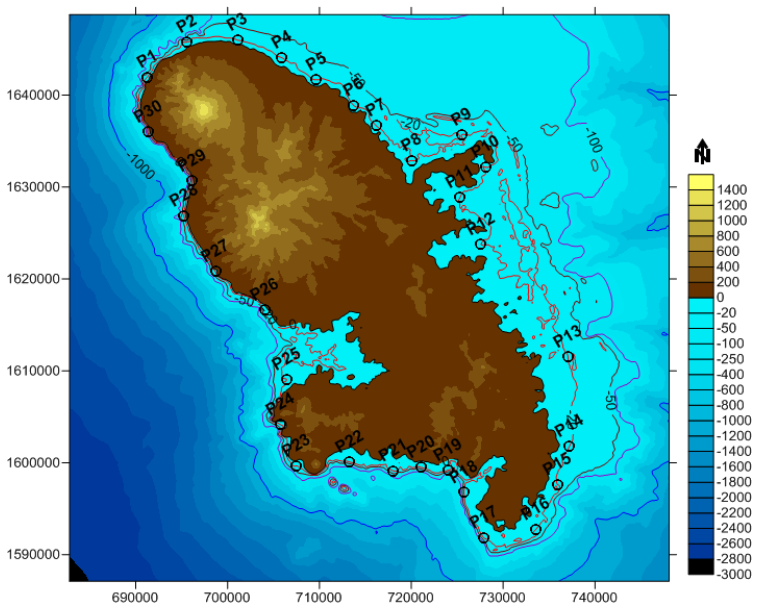


Illustration 24 : Emprise du modèle, conditions aux limites et localisation des 30 points de sortie localisés sur l'isobathe 20 m

En sortie du modèle, les conditions de vagues à la côte ont été analysées en 30 points, P1 à P30, répartis le long du littoral, sur l'isobathe 20 m (cf Illustration 24). Ces conditions tiennent compte de l'effet bathymétrique (notamment les interactions vagues/barrières coralliennes) dans la limite de résolution du modèle, soit 100 m x 100 m.

4.3.2. Résultat

Les résultats des modélisations pour les 5 classes de vagues/vents, sont représentés sur l'Illustration 25.

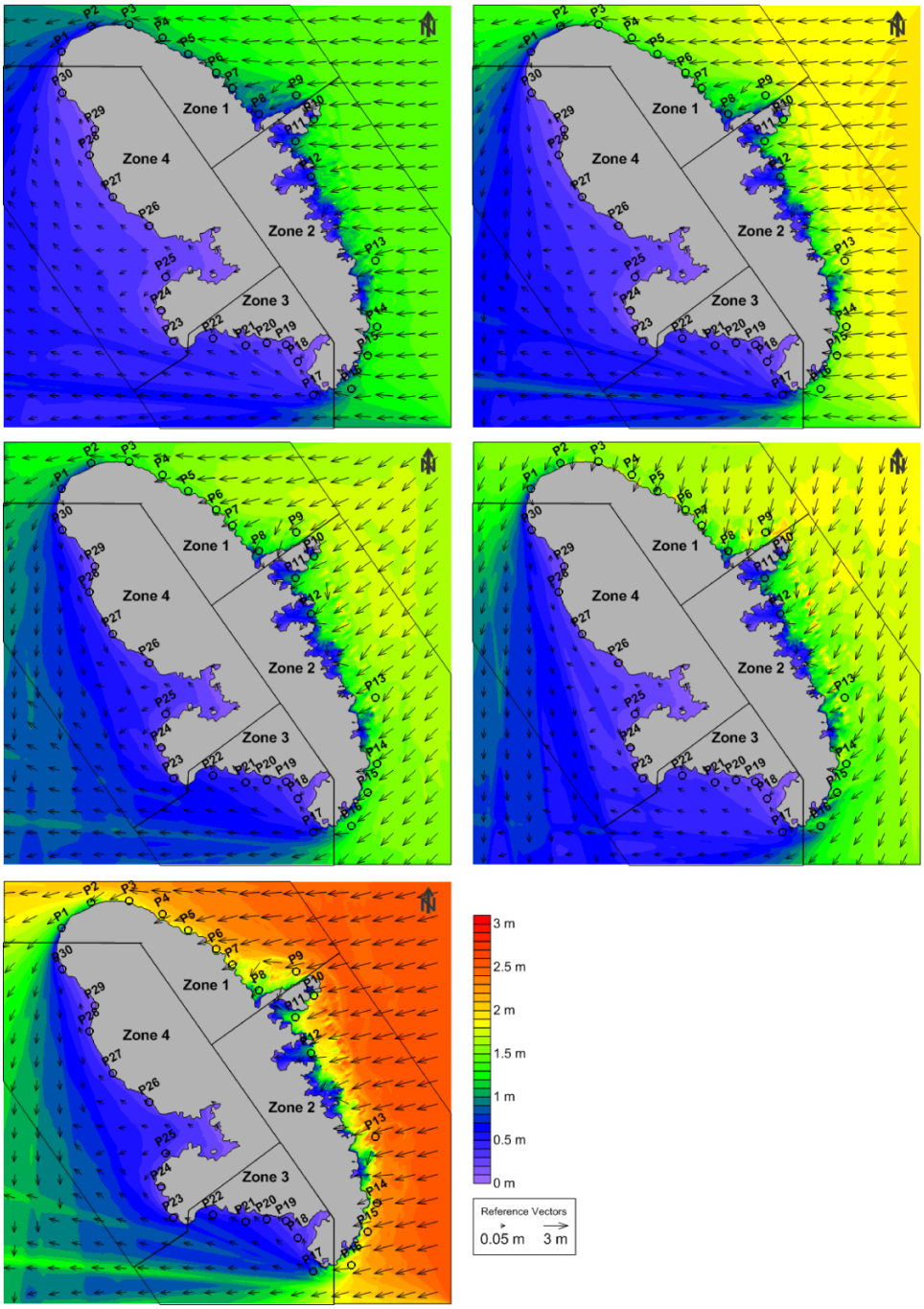


Illustration 25 : Caractéristiques des vagues (Hauteur Hs et direction) obtenues pour les 5 classes de vagues/vents déterminées

En première analyse, on observe à l'échelle de l'île de la Martinique une différence très nette des conditions de vague sur la façade Est (exposée aux vagues) et la façade Ouest (protégée des vagues, dites sous le vent). Alors que sur la façade Est les vagues proviennent du large, sur la façade Ouest les vagues convergent après avoir contournées l'île par le Nord et le Sud. La hauteur des vagues ainsi que leurs périodes sont donc considérablement réduites (Hs < 0,5 m ; Tp de 2 à 4 s) et leurs directions sont plus variables et dépendantes des conditions de vent locales.

Au regard des résultats précédents, la côte martiniquaise a été découpée en 4 zones identifiées sur l'Illustration 26, homogènes en terme d'exposition aux vague et de morphologie côtière (cf. Illustration 1). La zone 4 délimite l'emprise où les conditions de vent local (non pris en compte ici) conditionnent fortement la direction de provenance des vagues à la côte (cf. l'analyse de sensibilité ci-dessous).

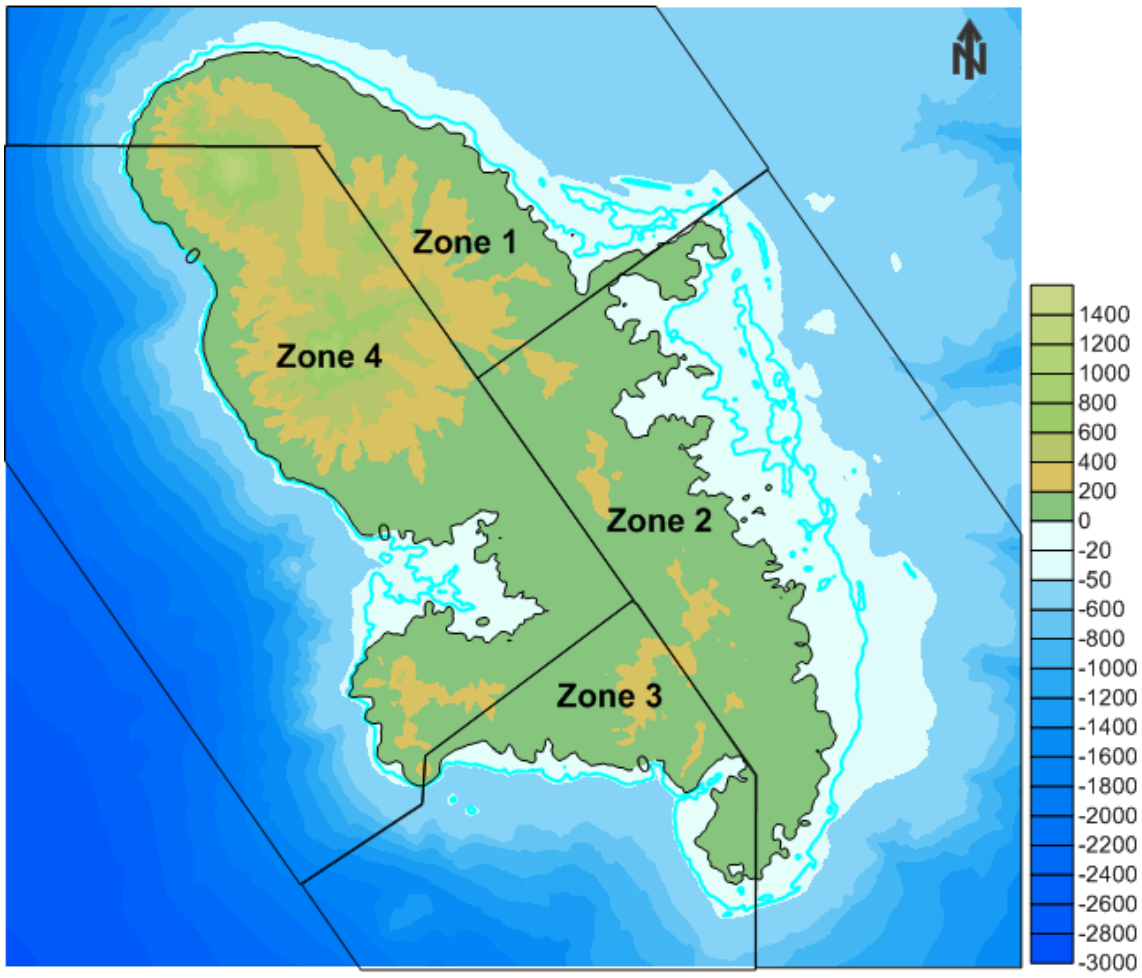


Illustration 26 : Zones où les conditions de vague à la côte sont relativement homogènes

4.3.3. Évaluation de l'influence du vent sur les conditions de vagues à la côte

Rappelons que les conditions de vent intégrées à la modélisation sont issues de la base de données CFSR (cf. § 4.2.3). Cette base de données ne permet pas de tenir compte de vents générés localement (issus des brises thermiques, d'effets topographiques..).

Afin de déterminer l'influence du vent sur les conditions de vagues obtenues à la côte par modélisation, plusieurs tests de sensibilité ont été réalisés. Les tests ont consisté à balayer les vents possibles à l'échelle du domaine d'étude (vitesse et direction) d'après les données de vent CFSR pour le point 194 représentatif de la situation au large à l'Est de l'île (cf. Illustration 21 et Illustration 22).

Ces tests montrent que dans les zones 1, 2 et 3, la variabilité des conditions du vent (vitesse et direction) n'a pas d'influence sur les conditions de vagues. En revanche, dans la zone 4, les tests montrent que les conditions de vent modifient peu la hauteur et la période des vagues mais conditionnent fortement la direction de provenance des vagues (cf. Illustration 27). En effet, la côte Caraïbes, abritée de la direction des houles dominantes est exposée à des vagues de faible énergie (hauteur et période), est plus facilement influençables par les vents locaux.

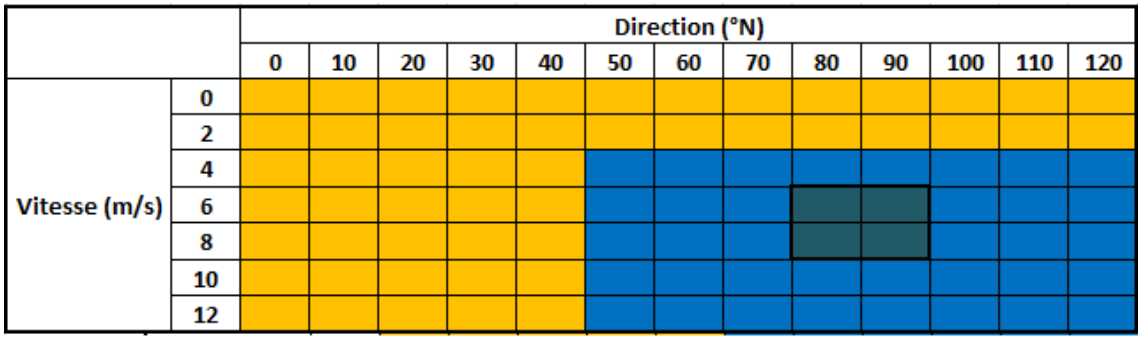


Illustration 27 : Influence des paramètres de vent (direction et vitesse possible à l'échelle du domaine d'étude) sur les conditions de vagues à la côte dans la zone 4 : En orange, la provenance des vagues est globalement Nord-Ouest ; en bleu, elle est globalement Sud/Sud-Est. La zone grisée correspond à la situation où le vent local a les mêmes caractéristiques que le vent modélisé

Les tests montrent que la direction de provenance des vagues dans la zone 4 peut s'inverser selon les caractéristiques de vent (intensité et direction) introduites lors de la modélisation. Dans le détail, on constate que :

- Lorsque les vents sont quasi nuls (vitesse inférieure ou égale à 2 m/s) ou de provenance comprise entre 0 et 40° Nord, les vagues à la côte proviennent globalement du Nord-Ouest ;
- Lorsque les vents ont une vitesse supérieure à 2 m/s et de directions comprises entre 40° et 120°N, les vagues proviennent globalement du Sud/Sud-Est ;
- En chaque point donné, il existe donc deux directions opposées possibles,

L'Illustration 28 présente par exemple les directions possibles des vagues à la côte au point P30 (commune du Prêcheur), balayant toutes les situations possibles de vent au large (cf. Illustration 25).

Dans la zone 4 (côte Caraïbes), la direction de provenance des vagues à la côte est donc déterminée par les caractéristiques du vent (à l'échelle du domaine d'étude et/ou par des vents issus d'effets locaux (orographiques, brises thermiques… etc). Cette situation est différente des zones 1, 2 et 3, pour lesquels les facteurs déterminants sont les conditions de vagues au large et où les variations de vent joue un rôle mineur. Pour la zone 4, les résultats du modèle permettent de caractériser les valeurs de hauteur et de période. En revanche pour les directions de provenance des vagues, les deux secteurs directionnels possibles seront représentés.

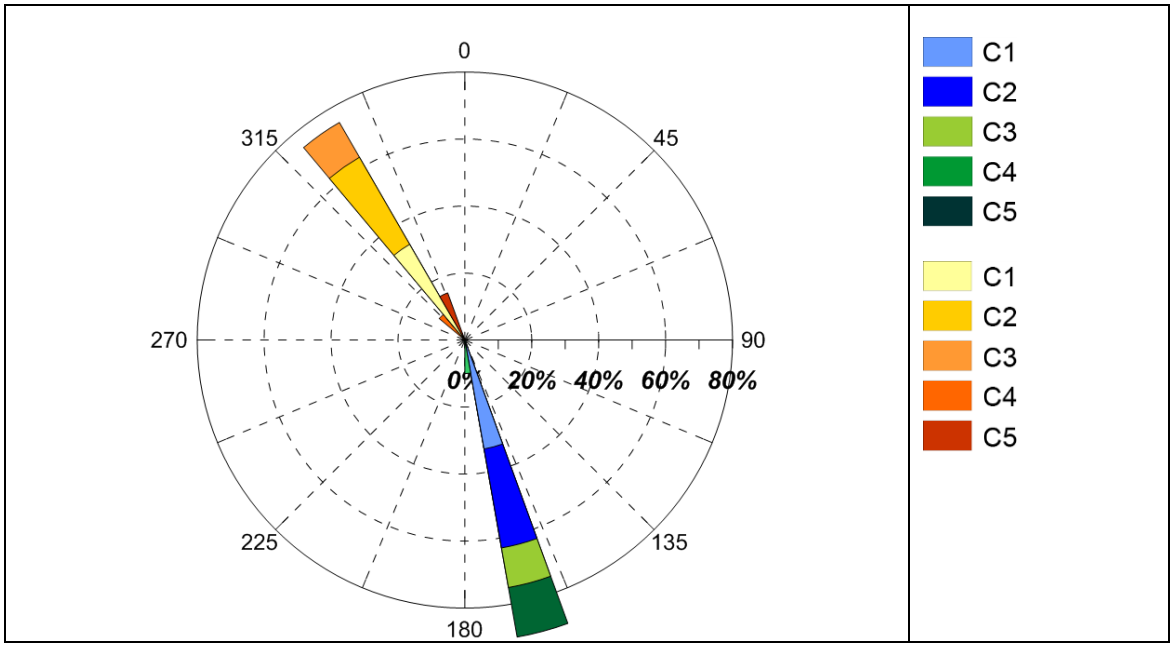


Illustration 28 : Les directions possibles des vagues à la côte au point P30 (commune du Prêcheur), balayant toutes les situations possibles de vent au large. En bleu/vert les directions pour des vents de direction de provenance 40° à 120°, en jaune/orange les directions pour des vents de provenance 0 à 40°. Les quartiers correspondent au pourcentage d'occurrence de chaque classe de vague.

4.4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS LE LONG DU LITTORAL

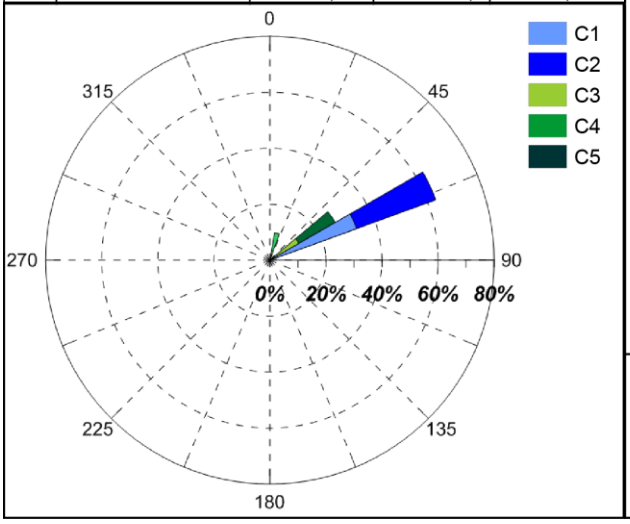
Les conditions de vagues à la côte (sur l'isobathe 20 m plus précisément) ont donc été déterminées en 30 points (numérotés de P1 à P30), répartis le long du littoral.

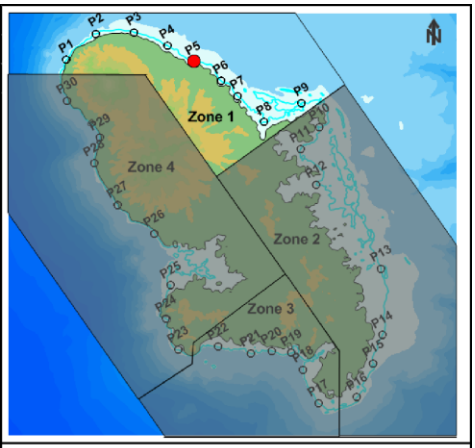
En chaque point, les résultats sont présentés par un graphique du type de l'Illustration 29. Pour chaque point sont données la direction et la fréquence d'occurrence de chaque classe d'une part (à gauche du graphique) ainsi que les caractéristiques des vagues en ce point (en bas à droite du graphique).

La zone 4 (correspondant à la côte Caraïbes) dont la particularité a été mise en évidence précédemment, donne lieu à des graphiques spécifiques, de type de l'Illustration 30, mettant en évidence la forte sensibilité des conditions de vagues aux conditions de vent. Les caractéristiques des vagues et leurs directions sont représentées pour les deux situations de vent caractéristiques : en bleu/vert pour des directions de provenance du vent comprises entre 40 et 120°, en jaune/orange pour des directions de provenance du vent comprises entre 0 et 40°.

L'Illustration 31 synthétise les conditions de vagues caractéristiques le long du littoral. Des précisions pour chacun de ces points, sont données dans l'Annexe 1.

Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P5	Gde Anse	709669,767	1641672,3	-20,0

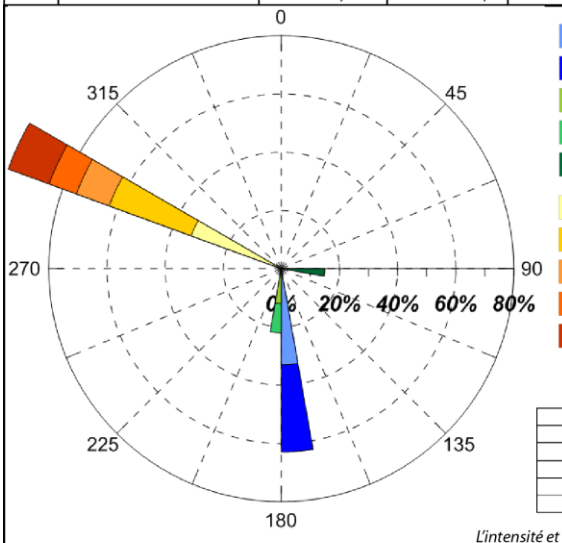




	P5				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	65	24,4
C2	30	1,3	8,4	65	24,0
C3	12	1,3	10,2	55	33,0
C4	10	1,4	13,6	15	27,7
C5	15	1,9	9,2	55	25,4

Illustration 29 : Exemple des conditions de vagues caractéristiques au point P5 sur la côte Atlantique

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P24	Anse d'Arlet	705748,233	1604150,7	-20,2



	P24							
	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.1	1.6	175	35.9	0.1	3.2	295	16.3
C2	0.1	1.0	175	45.8	0.1	3.5	295	15.1
C3	0.2	1.2	185	51.6	0.2	3.9	295	53.4
C4	0.1	13.6	185	37.9	0.1	13.6	295	23.6
C5	0.2	1.3	95	43.4	0.2	3.9	295	53.5

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Illustration 30 : Exemple des conditions de vagues caractéristiques au point P24 sur la côte Caraibes

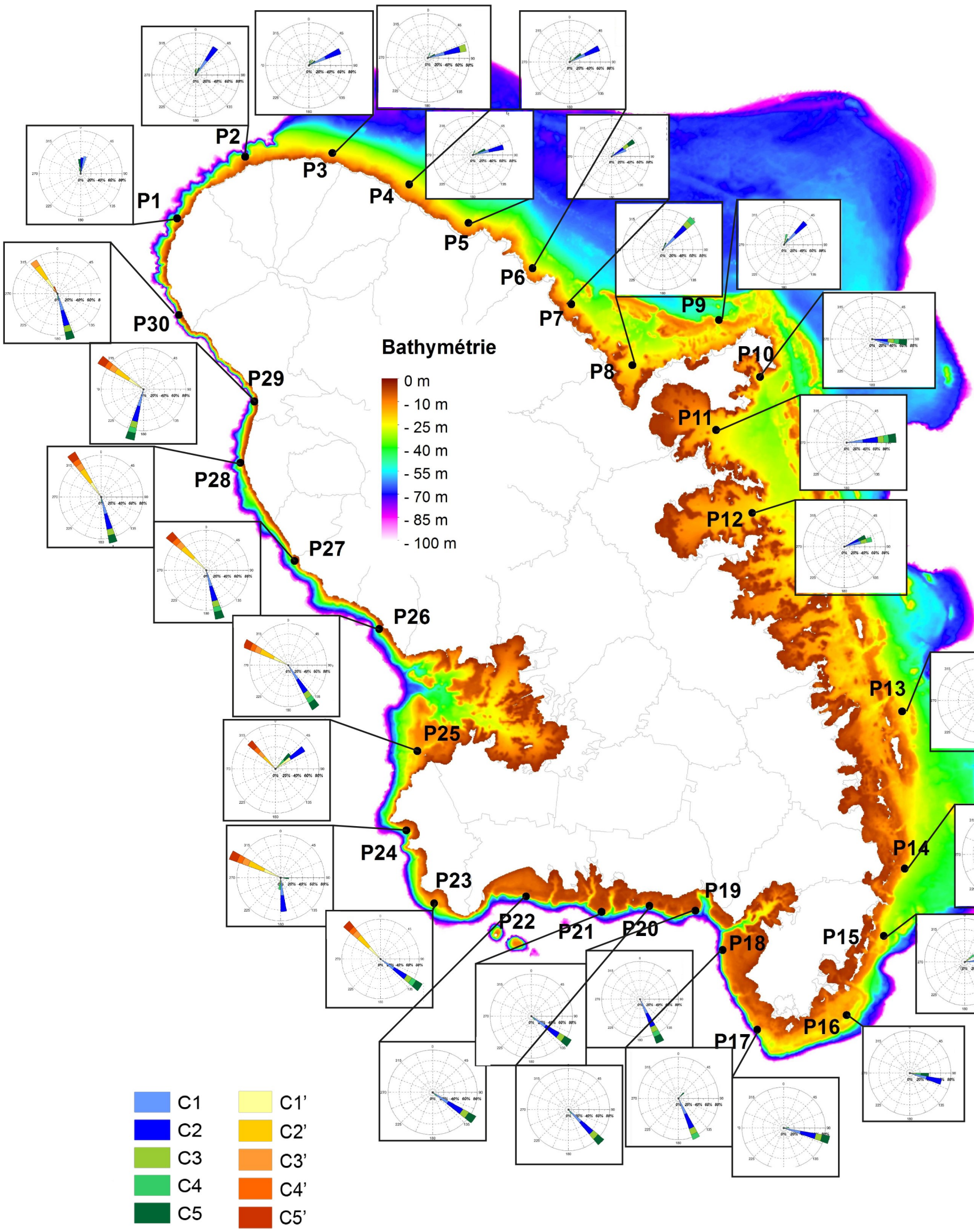


Illustration 31 : Conditions de vagues caractéristiques à proximité des côtes martiniquaises (sur l'isobathe 20 m)

5. Caractérisation des cellules sédimentaires

Le fonctionnement hydro-sédimentaire des plages sableuses dépend de nombreux facteurs tels que l'exposition à la houle, le stock sédimentaire, les transits littoraux sableux et leurs interruptions.

La Martinique est une côte majoritairement rocheuse dans laquelle se découpent des petites baies sableuses. On peut distinguer un comportement hydro-sédimentaire global dépendant de l'orientation générale de la côte et des houles dominantes et un comportement hydro-sédimentaire local dépendant des caractéristiques de chacune de baies (indentation, orientation de l'entrée par rapport à la houle locale, …).

Le présent chapitre consiste à décrire de manière qualitative, la dynamique sédimentaire de ces compartiments. La direction de la dérive littorale puis les unités sédimentaires ont été précisées le long du linéaire côtier à partir des observations de terrain et des données de houle présentées dans le chapitre précédent.

5.1. DÉLIMITATION DES COMPARTIMENTS HYDRO-SÉDIMENTAIRES

Le littoral martiniquais peut se décrire par une succession de compartiments hydrosédimentaires pour lesquelles les facteurs hydrodynamiques et sédimentaires sont globalement identiques, sans préjuger de la dynamique des différentes plages de ce compartiment.

Le comportement dominant du compartiment est lié à l'orientation générale de la côte et à son exposition à la houle. La définition de ces compartiments permet d'évaluer les transits sédimentaires dominants et d'évaluer les échanges possibles entre deux plages du compartiment ou d'une côte rocheuse vers u*n*e plage.

Dans cette étude, les données utilisées pour définir ces compartiments sont :

- Les conditions de houle dominantes simulées (cf. chapitre 1) ;
- L'orientation du trait de côte ;
- Les caractéristiques de l'avant-côte : présence de barrières récifales ou récifs frangeants à l'aide du levé ©Litto 3D.

La direction de la dérive littorale a été appréciée par expertise à partir de l'incidence de la houle, de la morphologie côtière et des spécificités bathymétriques (hauts-fonds, ilets, baie..), susceptibles de modifier largement la direction de la houle. Pour chaque compartiment, la composante longitudinale de la puissance de la houle est évaluée afin de déterminer la prédominance d'un transit littoral ou le caractère hautement alternatif de celui-ci (dans les cas où la houle dominante est quasi-frontale, entrainant une dérive littorale dans un sens ou dans l'autre au cours de l'année).

Les grands compartiments hydrosédimentaires ainsi délimités ainsi que la direction dominante de la dérive sont présentées sur la carte ci-dessous (Illustration 32).

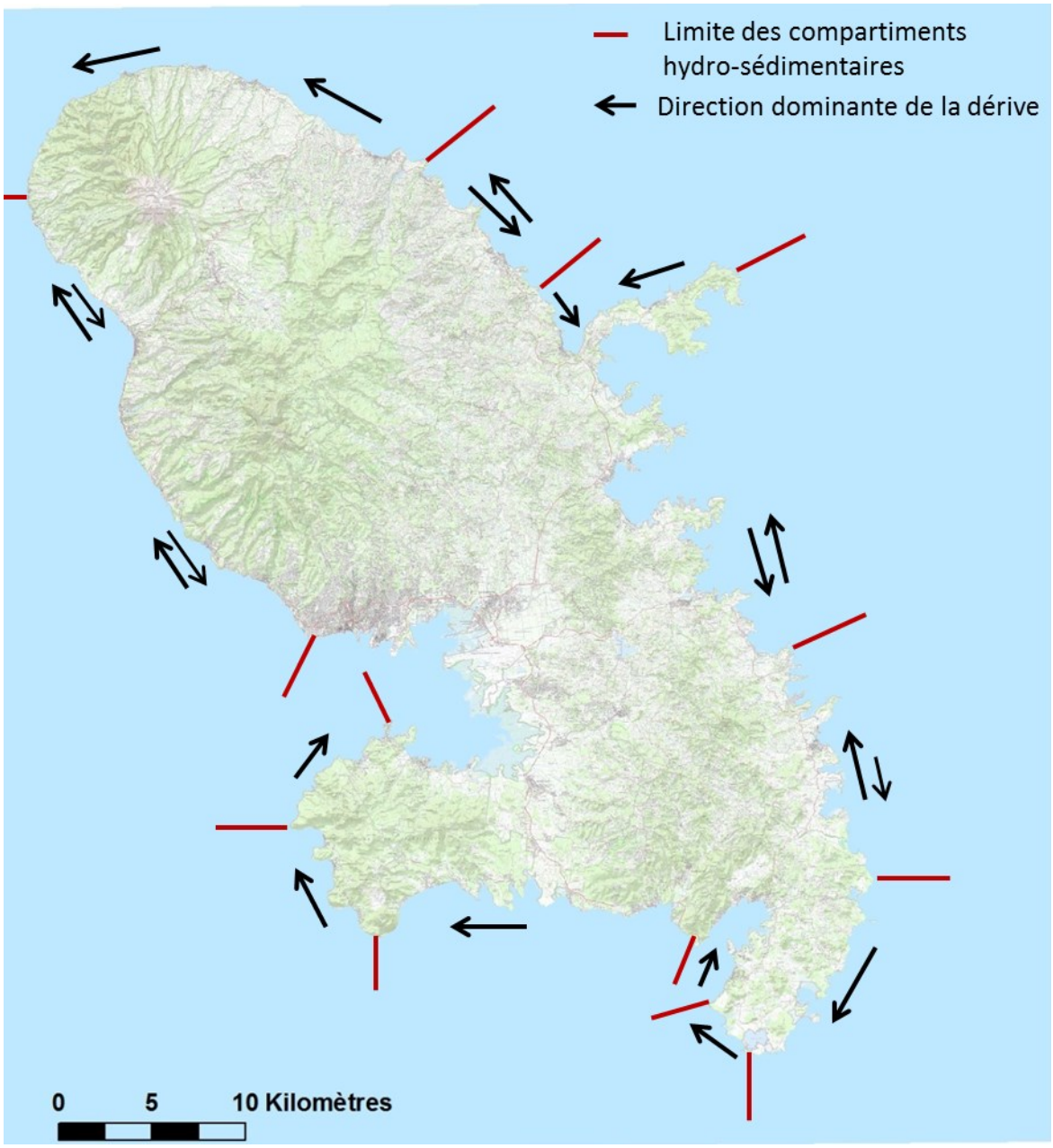


Illustration 32 : Grands compartiments hydrosédimentaires homogènes en terme de direction de transfert sédimentaire

5.2. DÉFINITION DES CELLULES HYDRO-SÉDIMENTAIRES

Chaque compartiment est composé de plusieurs cellules hydro-sédimentaires *stricto sensu.* La caractérisation de ces cellules repose sur l'analyse des conditions hydrodynamiques au large et à la côte, sur l'évaluation des transports sédimentaires résultant de la dérive littorale dominante et sur l'évaluation de la connectivité, c'est-à-dire la possibilité d'échanges sédimentaires, entre des plages adjacentes.

5.2.1. Détermination des limites des cellules sédimentaires

Les limites entre cellules peuvent être constituées d'obstacles naturels (changements d'orientation de la côte, caps rocheux, embouchures de rivière, …) ou anthropiques (ouvrages maritimes existants, épis, remblais..), qui bloquent ou modifient les transits sableux sous l'action de la dérive littorale.

Les limites ont été dans un premier temps repérées sur photographies aériennes : pointe rocheuse entre deux plages, embouchure, aménagement séparant deux plages adjacentes. Ce sont ensuite les observations de terrain, le sens prédominant de la dérive littorale et l'analyse des évolutions passées qui permettent de déterminer le caractère perméable ou semi-perméable de chaque limite (cf. Illustration 33). Les marqueurs géomorphologiques importants sont les flèches sableuses, les piégeages en amont-transit d'un ouvrage ou d'un cap rocheux ou le contournement de ces obstacles par des bancs sableux.

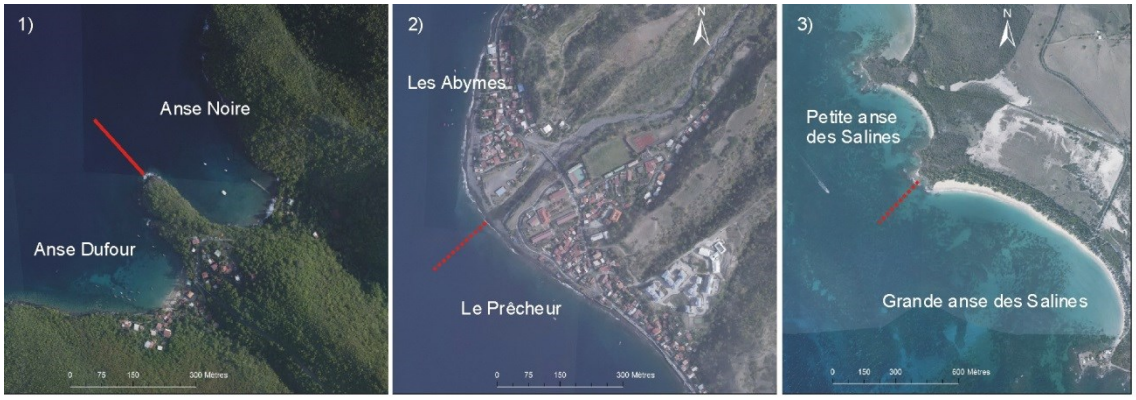


Illustration 33 : Différents types de limites observées : 1 – limite imperméable (côte rocheuse très avancée entre deux baies) ; 2 – Limite semi-perméable (Embouchure de la rivière du Prêcheur où le transfert sableux d'une côte à l'autre est observé) ; 3 – Limite semi-perméable (côte rocheuse partiellement et ponctuellement contournée par les bancs de sable sur l'avant-côte).

5.2.2. Caractérisation du fonctionnement hydro-sédimentaire de chacune des cellules

Une fois les limites potentielles déterminées, il est nécessaire d'estimer le fonctionnement hydro-sédimentaire de la cellule pour analyser sa sensibilité à l'érosion mais également pour évaluer la connectivité hydro-sédimentaire avec les plages adjacentes, qui pourraient, le cas échéant, faire partie d'une même cellule. Le fonctionnement hydrosédimentaire de chacune des

plages a donc été défini, essentiellement par expertise de terrain et analyse des photographies-aériennes.

En effet, l'analyse de l'évolution de la position de la ligne de rivage au cours du temps permet généralement de mettre en évidence le mode de fonctionnement hydro-sédimentaire (cf. l'exemple sur la plage de Madiana présenté en Illustration 8).

Évaluation de la dérive littorale résultante

Les conditions de houle à proximité de la côte (données au § 4.4) et l'orientation de la côte permettent de préciser l'incidence des vagues à la côte et en conséquence le sens de la dérive littorale générée. L'expertise terrain vient compléter les résultats des modélisations pour fournir des éléments supplémentaires sur la provenance dominante des vagues, en particulier pour les plages de la côte Caraïbes (zone 4) et pour celles où la morphologie de l'avant côte est particulière. En effet, sur les deltas sous-marins à l'embouchure des fleuves, la direction de propagation des houles est modifiée par des phénomènes de réfraction sur les fonds, à tels point que des inversions locales du transit sédimentaire se constatent parfois dans ces secteurs. De même la réfraction sur les hauts fonds, au niveau des barres sous-marines, plus ou moins rectilignes, entraine généralement une réorientation des directions des vagues qui impactent la côte de manière plus frontales. Ceci tend à diminuer l'intensité de la dérive littorale.

On note ainsi, pour les conditions hydrodynamiques du jour de la visite de site, le sens de la dérive, le piégeage éventuel de sédiment en amont-transit d'ouvrage. Pour exemple, les Illustration 34 et Illustration 35 présentent le schéma conceptuel de la dynamique de la plage du bourg des Anses d'Arlet tiré de la visite de terrain de novembre 2014.

Illustration 34 : Photographies de la plage d'Anse d'Arlet lors de la visite du 6 novembre 2014 (en haut, de gauche à droite : photographie depuis le sud de la plage vers le nord ; photographie depuis le ponton central vers le nord ; schéma du profil de plage au nord et au sud ; en bas : panoramique de la plage depuis la jetée centrale).

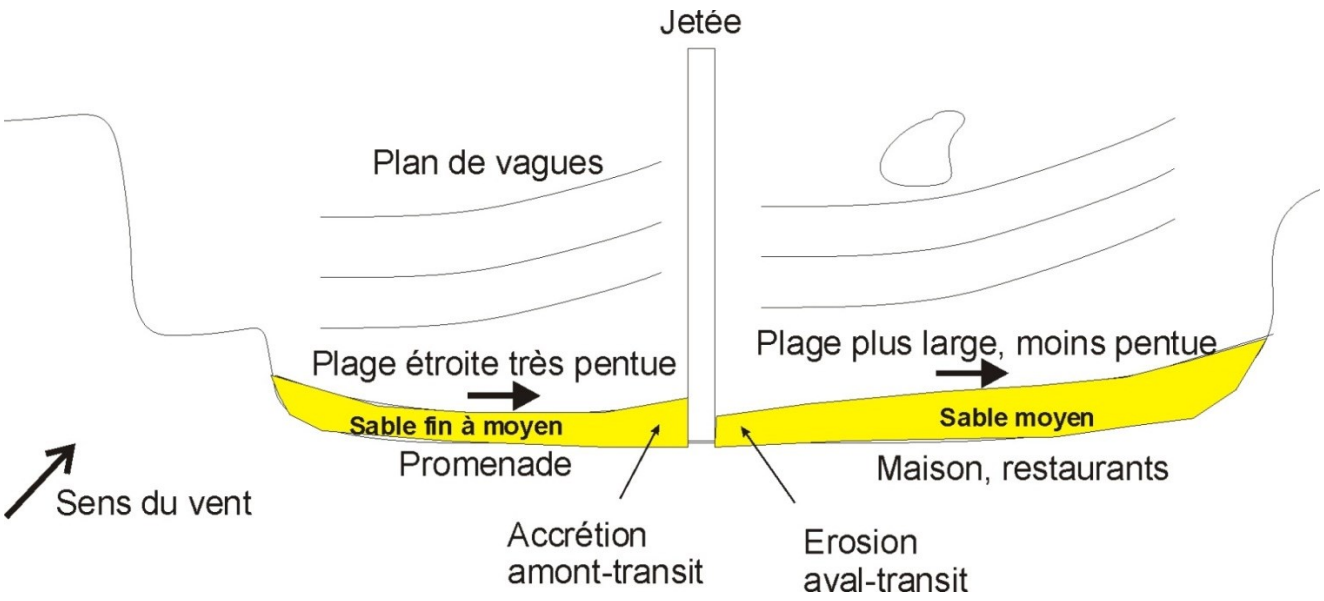


Illustration 35 : Schéma conceptuel de la dynamique de la plage d'Anse d'Arlet lors de la visite de terrain du 6 novembre 2014

Ainsi, l'Illustration 36 présente l'angle d'incidence dominante des vagues devant chaque anse sableuse (soit juste avant le déferlement), c'est-à-dire l'angle d'attaque dominant des vagues d'après les conditions de houle, l'orientation de la côte et tenant compte d'éventuels effets locaux. Cette angle d'incidence est la plupart du temps faible (> 25°). Il s'accentue pour certaines portions du littorale particulières comme la côte Caraïbes, en raison du contournement de l'ile par les houles, et dans certaines plages de poches en raison principalement de leur orientation par rapport au régime de vagues dominant.

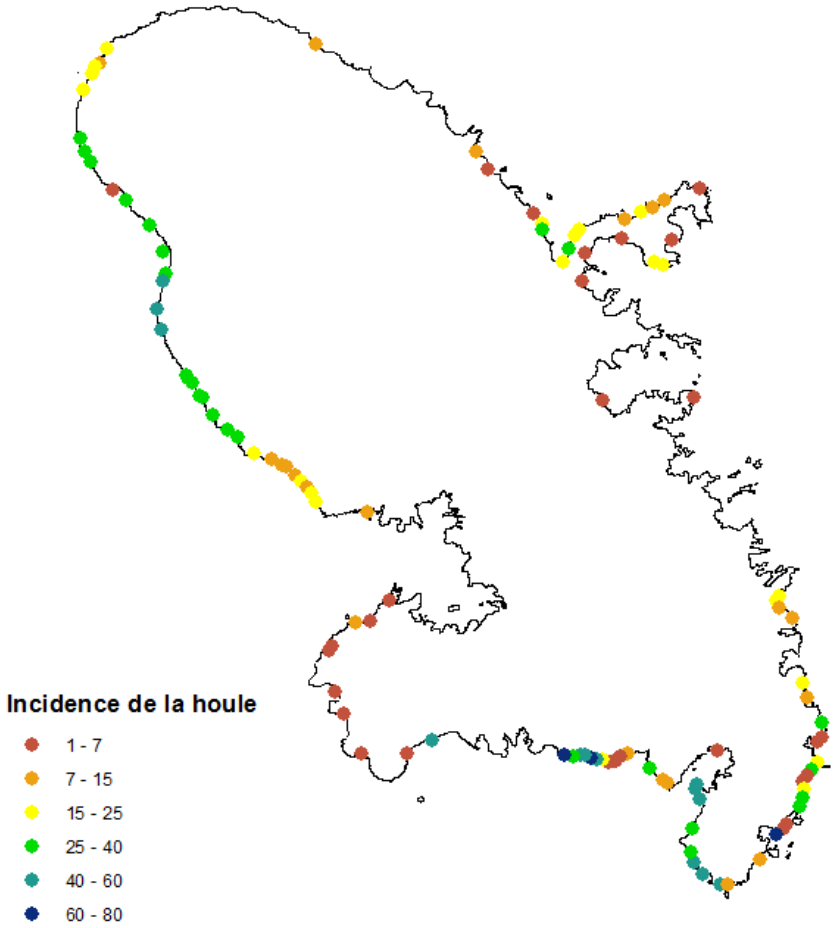


Illustration 36 : Evaluation de l'angle d'incidence dominante (en degrés) devant chaque anse sableuse

Pour chacune des plages, la puissance longitudinale de la houle a été estimée grâce à la formule [1] en tenant compte de la répartition temporelle des différentes classes de vagues (cf. Illustration 37).

$$P = \frac{1}{8}\rho g H^2 C \qquad [1]$$

Où P est la puissance (N/m²), H, la hauteur de vague (m), ρ la densité de l'eau de mer (Kg/m^3),

g la constante gravitationnelle (Nm²/Kg²), C la vitesse de groupe des vagues (m/s) et α_b l'angle d'incidence au déferlement (°).

La fréquence de chacune des classes sur une année (basée sur l'analyse des 23 ans de simulation) permet d'estimer l'alternance des transits sédimentaires et leur résultante sur chacun des sites. L'Illustration 37 présente les puissances obtenues au niveau de chaque plage. Les classes présentées sont les suivantes :

- Puissance très faible : 6 P < 600 N/m² ;
- Puissance faible : 600 < P < 3000 N/m² ;
- Puissance modérée : 3000 <P< 10000 N/m² ;

- Puissance forte : 10000 <P< 20000 N/m² ;
- Puissance très forte : P > 20000 N/m².

La puissance des houles est la plus forte au sud-est de l'île, entre Cap Chevalier et Macabou, lié à la forte exposition de cette côte et à la proximité de barrière récifale. Sur la côte nord atlantique, la puissance est atténuée par la largeur du plateau continental. Entre la pointe de la Caravelle et Macabou, la puissance est inférieure en raison de la forte dissipation de l'énergie des vagues en amont du point de mesure. Comme attendu, la cote Caraïbes et la côte Sud, sont particulièrement protégées.

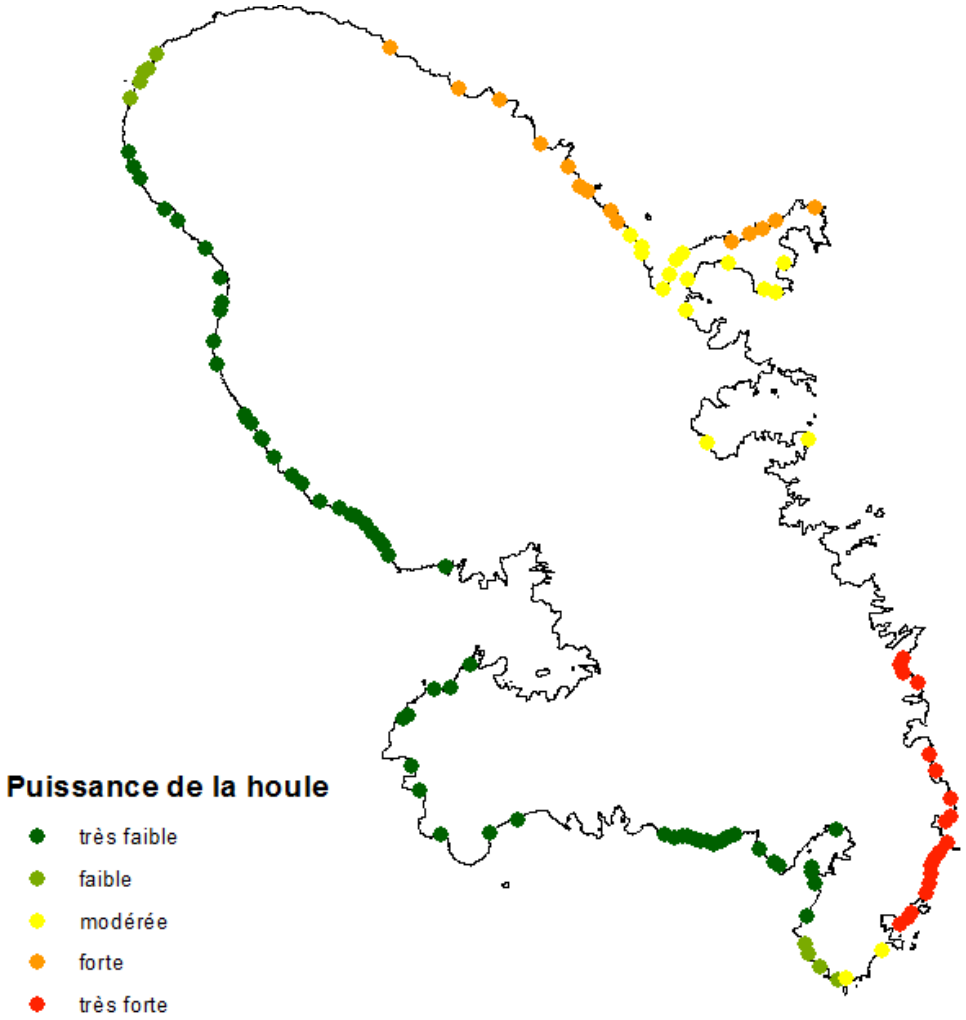


Illustration 37 : Evaluation de la puissance moyenne de la houle devant chaque anse sableuse.

Évaluation des transports transverses

Les transports sédimentaires transverses (dits cross-shore) sont observés principalement lors des tempêtes. Les courants de retour sont alors plus puissants et entrainent le sédiment vers le large. Ce mécanisme, qui est en lien avec le processus d'oscillation évoqué au chapitre 3.1, n'est pas toujours en relation avec l'évolution à long-terme d'un site. Lors des événements les plus extrêmes, le sédiment peut toutefois être transporté à profondeur importante, ne permettant pas la reconstruction naturelle post-tempête.

Cette dynamique transverse peut également être observée dans les baies où les courants liés à la houle s'organisent en cellules de circulation, générant des courants vers le large à intervalles plus ou moins réguliers. Ce sont les courants d'arrachement ou « *rip current* ». L'observation de ces structures sur le terrain permet de caractériser les sites sur lesquels les transferts sédimentaires cross-shore sont significatifs (cf. Illustration 38).

Les endroits où les investigations de terrain ont confirmé un transport cross-shore significatif, ont été indiqués sur les cartes finales.

Illustration 38 : Exemple de transport transverse mis en évidence par les panaches que forment les courants d'arrachements (rip Current), Petite Anse des Salines

5.2.3. Résultats

Le catalogue de carte présentant les cellules sédimentaires sur les 57 km de côtes sableuses est présenté en Annexe 2. Un exemple sur la presqu'ile de Sainte Anne est donné sur l'Illustration 39 ci-dessous.

Ces cartes réalisées à des échelles entre 1/25°000 et 1/35 000, présentent les indications suivantes :

- Les limites de cellules et les limites de sous-cellules, s'il en existe ;
- Le sens de la dérive littorale dominante ;
- Les endroits où le transport cross-shore est significatif d'après les investigations de terrain. Cette information n'est pas exhaustive.

Finalement, 92 cellules sédimentaires ont été délimitées le long du littoral pour 117 plages identifiées. La plupart des plages fonctionne donc de manières indépendantes les unes des autres.

La côte Atlantique et la Caravelle sont essentiellement constituées de petites cellules indépendantes, dont les plus grandes atteignent 1,5 km de longueur (Plage de Grand Anse au Lorrain par exemple).

Les secteurs les plus complexes où les interconnexions entre plages adjacentes sont étendues, sont essentiellement situés sur la presqu'ile de Sainte Anne (cf. Illustration 39).

Les cellules les plus longues sont situées sur la côte Caraïbes, entre la commune de Schœlcher et Le Prêcheur, puisque ces côtes, jeunes, sont peu échancrées.

Les plus grandes cellules sont :

- La cellule de Saint Pierre (3.9 km environ) ;
- La cellule de la plage du Diamant (3.2 km environ) ;
- La cellule des Salines (2.8 km environ) ;
- La cellule du Carbet (2.4 km environ) ;
- La cellule de Sainte Philomène (2.2 km environ) ;
- La cellule de Cap Chevalier (2.0 km environ) ;
- La cellule de Grand Macabou (2.0 km environ).

Illustration 39 : Exemple des cellules hydro-sédimentaires identifiées sur la presqu'île de Sainte Anne

6. Préconisations de gestion des côtes sableuses

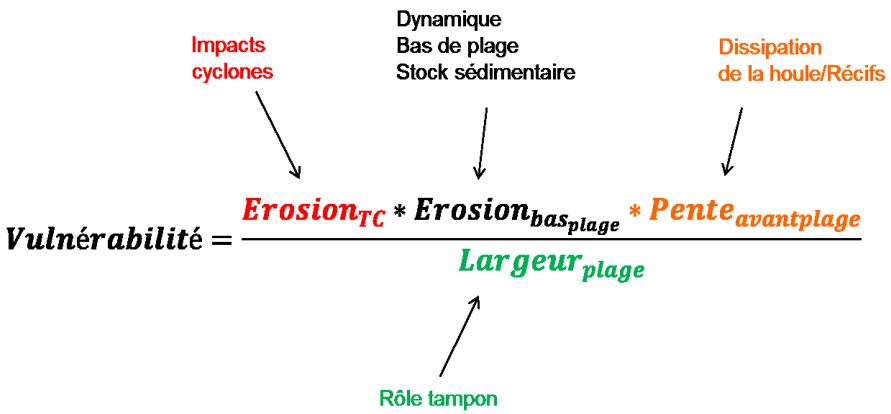
6.1. PRÉCONISATION DE GESTION À L'ÉCHELLE DES CELLULES SÉDIMENTAIRES

Toute gestion des stocks sédimentaires doit être élaborée à l'échelle des cellules sédimentaires identifiées dans le chapitre précédent. Ces cellules constituent donc l'emprise latérale minimale des études d'impacts, pour tout aménagement sur le littoral.

6.2. UN INDICATEUR COMME OUTIL D'AIDE AU CHOIX DE LA STRATÉGIE

Plusieurs critères caractérisent la vulnérabilité d'une plage à l'érosion, comme son exposition, sa largeur, son indentation, la pente de l'avant-côte, la présence de barrière récifale. L'évolution passée est aussi un critère important qui permet par exemple d'évaluer la sensibilité d'un site aux événements extrêmes (tempêtes, cyclones) puisque la végétation de haut de plage est sensible aux vents violents lors des épisodes cycloniques. L'évolution historique de l'interface terre-mer fournit également une autre information, sur la dynamique de la plage et du stock sédimentaire.

Un indicateur a donc été conçu pour hiérarchiser la vulnérabilité côtière des plages sableuses à l'érosion et servir ainsi d'aide à la gestion du littoral, vis à vis de la protection à la fois des enjeux de haut de plage et des enjeux sur la plage. Il est défini par la formule ci-dessous. Cet indicateur tient compte à la fois des conditions morphologiques actuelles (largeur et bathymétrie de l'avant plage) et des constats de mobilité à long terme du haut et du bas de plage ; il intègre implicitement la vulnérabilité aux cyclones et la vulnérabilité aux variations saisonnières. Les différents paramètres utilisés sont normalisés.



Cet indicateur de vulnérabilité a été apprécié sur chacune des plages sableuses, à partir des différents indicateurs physiques évalués par ailleurs. La carte en Illustration 40 présente les résultats obtenus. Les plages les plus vulnérables se situent sur la côte sud. Certaines plages fortement exposées au recul et à l'érosion d'après les constats historiques (cf. Illustration 10) ne sont pas pour autant vulnérables, notamment lié à la largeur de la plage qui augmente la résilience.

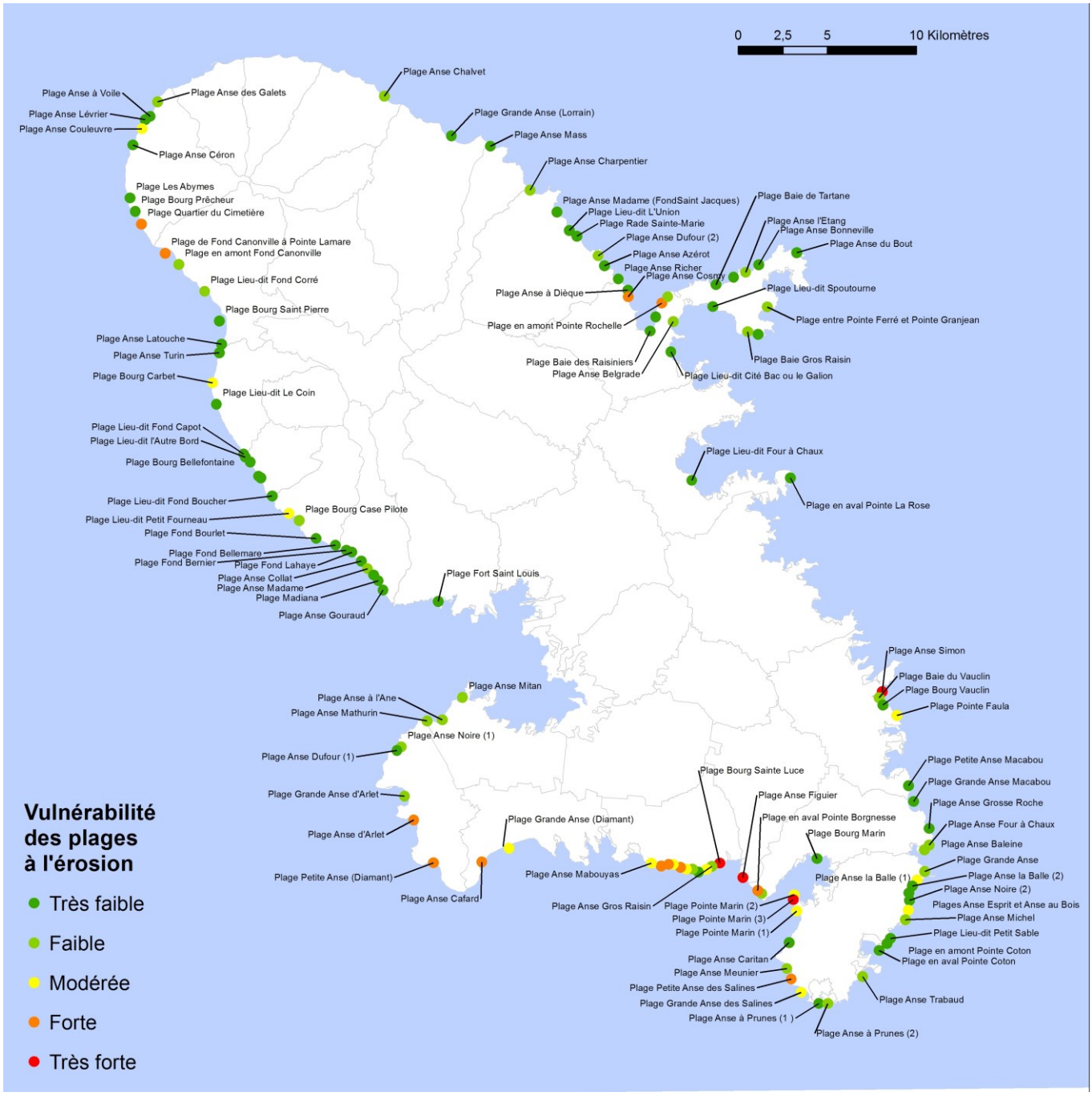


Illustration 40 : Indicateur de vulnérabilité proposé par le BRGM

6.3. SOLUTIONS TECHNIQUES POUR LUTTER CONTRE L'ÉROSION

L'ensemble des solutions techniques existantes pour lutter contre l''érosion ont été balayées et accompagné d'un avis sur leur applicabilité en Martinique, de manière à donner un premier critère d'appréciation. Rappelons que chaque site à protéger a des particularités à prendre en compte et que généralement, la solution optimale est une combinaison de plusieurs techniques.

Soulignons la multiplicité des usages sur les plages, comme la préservation de la biodiversité (faune et flore), le tourisme … comme autant de critère de choix dans les solutions techniques adaptées.

6.3.1. Dispositifs atténuateurs de houle (en mer)

Ces dispositifs sont à privilégier pour les cellules sédimentaires où la puissance de la houle est importante (on se référera pour cela à l'Illustration 37) c'est-à-dire celles où la houle joue un rôle non négligeable dans l'érosion de la plage et notamment dans les secteurs sensibles au cross shore (cf. indication sur les cartes en Annexe 2). Ces dispositifs peuvent également être utilisés dans les secteurs où l'amortissement des vagues sur l'avant-côte est limité en raison d'une forte pente et de l'absence de récif.

Des dispositifs artificiels dans la zone de déferlement

Des structures métalliques, en béton ou même en géotextile peuvent être submergées dans des profondeurs relativement faibles afin de déclencher le déferlement de la houle loin de la plage et de favoriser la dissipation de l'énergie de la houle pour atténuer les impacts à la côte.

Ce rôle d'atténuation des houles peut induire des phénomènes de réfraction, concentrant l'énergie sur certains secteurs du littoral. Seuls les récifs faiblement immergés sont à même de dissiper suffisamment l'énergie des vagues pour limiter les phénomènes érosifs sur la plage.

Les retours d'expérience sur ces systèmes restent peu nombreux. Un tel système d'atténuateur est expérimenté sur le littoral du Lido de Sète dans l'Hérault (Balouin et Colombet, 2014). Si le dispositif a montré des effets bénéfiques sur la protection, voire l'avancée, de la plage, la durabilité et l'efficacité de l'ouvrage sur le plus long-terme reste à vérifier. En Martinique, il existe un site expérimental installé à l'Anse Figuier depuis 3 ans (cf. photo de l'Illustration 41). Le suivi de cet ouvrage est particulièrement important pour vérifier l'applicabilité de ces systèmes dans les Antilles où les houles cycloniques particulièrement puissantes peuvent déstabiliser la construction.

Les récifs artificiels mis en place dans un but de restauration du milieu (repeuplement halieutique ou benthique par exemple), ne peuvent jouer le rôle d'atténuateur de houles que s'ils sont suffisamment étendus et localisés à faible profondeur.

Illustration 41 : Le géotextile installé à anse Figuier, à une dizaine de mètre du rivage. Source : http://www.sous-les-cocotiers.com/

Algues synthétiques et herbiers

La restauration des herbiers est une solution possible, qui vise, au-delà de la reconstitution d'un éco-système, à atténuer les houles qui arrivent à la côte.

L'atténuation s'effectue à la fois par une augmentation de la rugosité du fond qui freine les vagues mais également par la présence de banquettes (dépôt de feuilles sur les plages) qui vont temporairement protéger le trait de côte. Toutefois, il existe peu de retour sur ces techniques et les dépôts de sargasses sur les plages de Martinique provoquent des nuisances qui rendent peu attractive cette solution.

Qu'il s'agisse d'ouvrage de protection ou d'expérimentation, il reste préférable de tenter de conserver les herbiers existants plutôt que de songer à implanter des algues synthétiques.

Pieux hydraulique

Les pieux hydrauliques sont des pieux en bois espacés de 50 cm à 1 m et placés parallèlement ou perpendiculairement au rivage, de manière à atténuer l'énergie des vagues ou les courants longitudinaux. Ils demeurent peu adaptés aux environnements à faible hydrodynamisme (marée, vague) car ils seraient surtout sollicités pendant les événements fortement énergétiques lorsque la végétation est trop importante pour permettre le dépôt de sédiment sur la plage émergée.

6.3.2. Un transfert sédimentaire pour compenser ou prévenir un déséquilibre

Ces dispositifs sont adaptés pour accompagner et réduire le phénomène d'érosion quelles que soient les caractéristiques des cellules sédimentaires, de manière à compenser ou prévenir un

déséquilibre. Ils doivent particulièrement prendre en compte le fonctionnement hydro-sédimentaire global et notamment la direction de la dérive littorale.

L'alimentation artificielle des plages en sédiments (rechargement de plages)

Cette méthode a pour objectif de compenser le déséquilibre du stock sédimentaire, qu'il soit d'origine naturelle ou liée à une action humaine. Le but est d'alimenter les plages en matériaux (sables, galets..).

Le rechargement de plage n'a pas pour but de stopper le phénomène d'érosion mais de l'accompagner et d'en limiter les impacts (De la Torre et al., 2014).

Le rechargement de plage reste l'une des techniques les moins contraignantes/néfastes pour l'environnement (excepté pendant la période des travaux). Les études menées sur les littoraux charentais et vendéens montrent que les rechargements de plages permettent de gérer durablement l'érosion côtière à condition de raisonner et d'anticiper les transferts sédimentaires à l'échelle de chaque cellule. La durabilité du dispositif consiste également à s'assurer de ne pas entrainer un déficit sédimentaire sur les lieux de prélèvements, qui peuvent être en dehors de la cellule sédimentaire. Dans ce contexte, la mise en place d'un « Plan de gestion des sédiments » permet d'identifier les ressources et les besoins potentiels en respectant les transits en action, les modalités de rechargement et les écosystèmes marins (cf guide de la gestion de l'érosion du littoral de la Réunion).

Ce rechargement doit toutefois être précédé :

- d'une étude technique pour évaluer la compatibilité granulométrique et chimique du sable prélevé avec les sédiments de l'endroit à recharger ;
- d'une demande à la Police de l'Eau (dossier loi sur l'Eau) et d'une étude d'impact du rechargement pour évaluer les effets d'un apport, même local sur le reste du littoral et notamment la faune et la flore présente (notamment herbier, coraux, qui peuvent être affectés par l'augmentation de la turbidité lors des travaux). L'étude d'impact doit s'intéresser à la cellule sédimentaire dans sa globalité.

Le « by-passing » ou le rétablissement du transit littoral

Le « by passing » est le transfert artificiel de sédiment leur permettant de franchir un obstacle naturel (cap rocheux, embouchure d'un cours d'eau, ..) ou anthropique (jetée, épi..) (cf. Illustration 42). Il peut être hydraulique (avec l'installation d'un système de succion) ou mécanique (acheminement du sables par camions ou dragages).

Les coûts peuvent être relativement importants, ce dispositif est adapté aux zones de forte dérive littorale boquées par un aménagement.

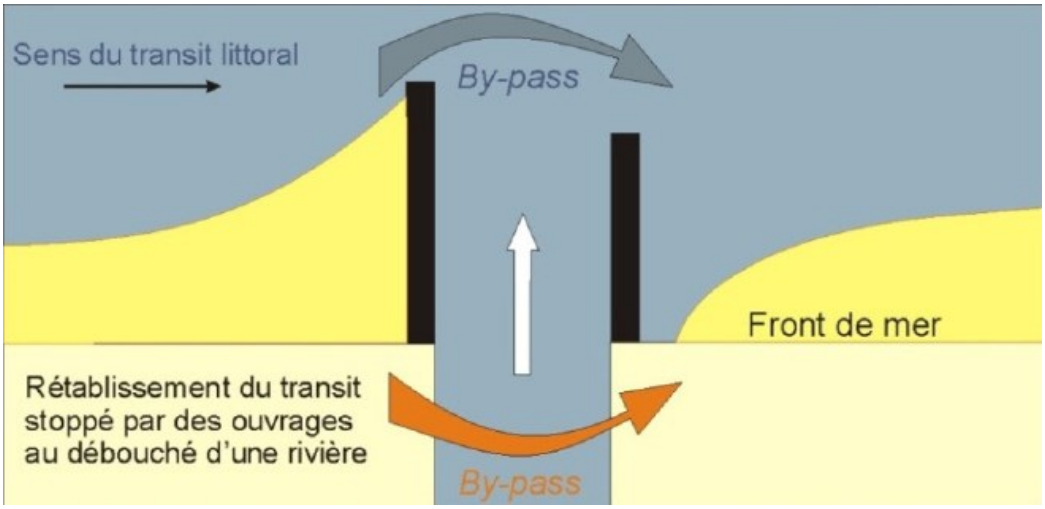


Illustration 42 : Système de by-pass (Balouin et al., 2012)

Reprofilage de plage

Le reprofilage de plage a pour objectif de limiter les impacts des tempêtes ou des houles cycloniques. On déplace le sable sur la plage de manière à favoriser le déferlement loin des enjeux exposés. Il est également utilisé pour atténuer la pénétration des eaux en cas de submersion.

Ce reprofilage doit être bien dimensionné pour éviter d'accentuer la propagation de vagues dans les terres. Il peut se suffire à lui-même (efficacité limitée) mais il est préférable de l'accompagner de dispositifs complémentaires (rechargement, replantation).

6.3.3. La protection de la plage en général

Les géotextiles

Ces structures, dites géotubes, sont constituées de tubes en polyester remplis de sable par injection hydraulique. Ce matériau est utilisé pour la réalisation d'ouvrages longitudinaux ou transversaux tels que décrits précédemment. Ces structures peuvent être installées en bas de plage ou en haut de plage.

En bas de plage, l'utilisation de ces ouvrages pour la fixation du trait de côte et la modification du transit entraine les mêmes inconvénients que les ouvrages en enrochements (érosion en aval ou sur les zones adjacentes). Par ailleurs, ces ouvrages sont relativement fragiles, ils peuvent être percés par des débris et ne semblent donc pas convenir à des environnements très exposés. Leur constitution et leur visibilité sur la plage les expose de plus à des actes de vandalisme.

L'application est à proscrire pour les installations transversales à meme la plage car elles bloquent le transit sédimentaire, de la même manière qu'un épi en enrochement.

Les installations enfouies en haut de plage peuvent être adaptées en accompagnement de dispositifs de restauration complémentaire (reprofilage, plantations, brise-vent..).

Le système de drainage de plage

Le drainage de plage a pour objectif d'abaisser le toit de la nappe aquifère présente sous la plage et ainsi favoriser l'infiltration de la nappe de retrait du jet de rive. L'eau redescendant sur la plage s'infiltre, perdant de son énergie et favorisant ainsi le dépôt du sédiment charrié.

Le système de drainage est constitué de drains horizontaux installés en profondeur et placés parallèlement au trait de côte (cf. Illustration 43). Ces drains sont connectés à une station de pompage qui recueille et évacue l'eau vers la mer ou vers de station de recyclage. Ce système vise à piéger le sédiment présent sur place mais ne résolue pas le déficit sédimentaire (Balouin et al., 2012).

Ce dispositif fonctionne quand les nappes d'eau ou le jet de rive sont responsables de l'érosion. Or, en Martinique, la largeur du jet de rive est souvent limitée (de un à quelques mètres), en raison de la forme du profil de plage limitant l'intérêt du dispositif. Par ailleurs, l'installation du système nécessite une perméabilité suffisante du sédiment et de ce fait, reste peu adapté, aux plages martiniquaises, peu perméables.

Il est enfin positionné en bordure de plage et donc adapté à des environnements peu dynamiques, où la mobilité du trait de côte est limitée, réduisant le risque d'érosion et d'exposition du drain, ce qui n'est pas forcément le cas dans un secteur affecté par les cyclones.

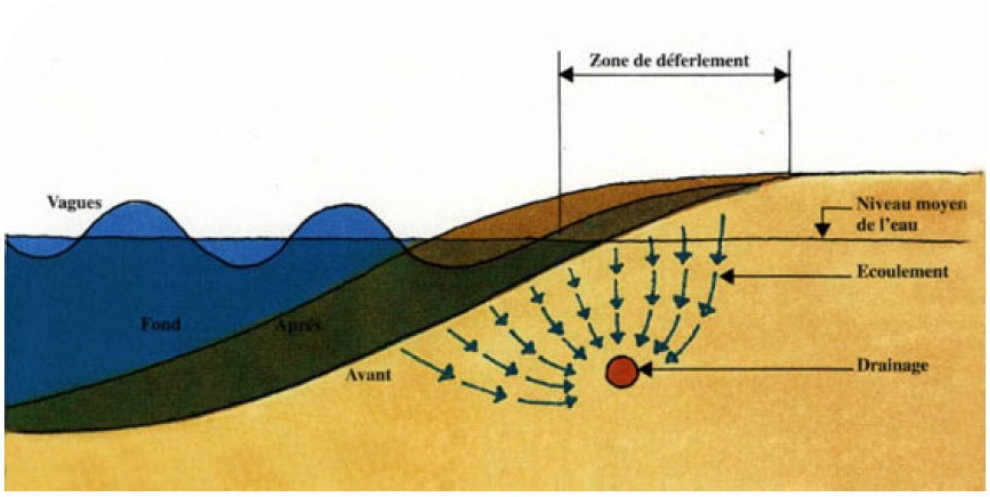


Illustration 43 : Principe d'un drainage de plage (@Ecoplage)

Biofixation

Cette technique vise à renforcer, par un processus physico-chimique, la cohésion du sable et de l'eau pour favoriser l'apparition d'un bio-film qui va limiter l'érosion des grains par l'hydrodynamisme. Cette technique, qui tend à modifier la texture de la plage, n'a jamais été mise en œuvre sur le littoral national et il existe très peu de retour d'expérience sur son efficacité.

6.3.4. La protection du stock de haut de plage en particulier

Comme expliqué dans le § 3.1.2, les plages martiniquaises fonctionnent selon des dynamiques saisonnières de basculement (le long de la plage) ou d'oscillation (perpendiculairement à la plage), qui permettent d'assurer une certaine stabilité à long terme. Les bermes sur le haut de plage participent à ce mécanisme en stockant le sable pendant la phase de ré-engraissement des plages. De manière à ce que les phénomènes d'oscillation saisonnière puissent se faire, il est impératif de conserver un espace de liberté en haut de plage (De la Torre, 2008). Sans cet espace, on accentue le risque de disparition de la plage, voire des enjeux de haut de plage.

Quand la largeur de la plage le permet (cf. indicateur en Illustration 6), la protection du stock de haut de plage peut être améliorée par différentes techniques,: plantations végétales, couverture de débris végétaux, canalisation de la fréquentation. Il s'agit de mesures de protection durable qui augmentent la résilience de la plage et constituent également une protection contre les attaques des vagues tout en préservant le caractère naturel du littoral.

Evoquons à la marge le principe des rideaux brise-vent qui visent à lutter contre l'érosion éolienne qui n'est pas le facteur d'érosion principal en Martinique.

La revégétalisation des plages

Cette technique douce est très adaptée au littoral martiniquais. En Martinique, l'ONF a une forte expérience dans cette pratique qu'elle utilise essentiellement pour restaurer la qualité écologique des milieux et notamment pour préserver la biodiversité (aire de ponte des tortues marines).

Les espèces à planter doivent être adaptés au littoral martiniquais et respecter l'organisation transversale naturelles. En effet, deux strates de végétation colonisent les plages martiniquaises (cf. Illustration 44). Une végétation rampante comme les patates Bod Lanmè, appelée végétation pionnière (Sastre and Breuil, 2007), dont l'important réseau racinaire fixe efficacement le sable des plages (De la Torre, 2012). Au-delà de promouvoir la revégétalisation de ce type d'espèce, il est nécessaire de proscrire leur arrachage.

Derrière sur l'arrière plage se trouve la végétation dite « pérenne » ou « forêt littorale » stricto sensu qui comprend des espères variées comme le raisiniers, le mancenillier, le catalpa, le galba, le poirier pays, l'oseille de bord de mer ou le cocotier (Cayol. et al., 2008).

Illustration 44 : Exemple des deux strates de végétation : Patate Bod-lanmè et cocotier. Plage de Grand Macabou.

La couverture de débris-végétaux

La couverture de la plage par des débris-végétaux (algues, herbes..) est également un moyen de protection efficace. De manière générale, lors des campagnes de nettoyage entreprises par les communes, il est conseillé de ne retirer que les macro-déchets d'origine humaine et de laisser les déchets verts qui contribuent à l'équilibre de la plage et la régénération de la végétation littorale (De la Torre, 2012).

Cependant, le dépôt des sargasses sur les plages martiniquaises a entrainé des contraintes sanitaires rappelant qu'il n'est pas toujours envisageable de conserver ces débris-végétaux.

De manière générale, le nettoyage des plages (crise des sargasses, enjeu touristique..) doit être encadré de manière à conduire à une pratique raisonnée. Le ramassage mécanisé, bien qu'il reste peu répandu en Martinique, mériterait des consignes strictes pour limiter le départ de sables. Citons l'existence du guide pour le nettoyage raisonné des plages, édité par le Conservatoire du Littoral et Rivages de France en 2011.

La canalisation de la fréquentation

Pour les plages fréquentées, le piétinement anthropique est un facteur accentuant l'érosion en freinant le développement de la végétation. Des enclos de régénération, comme ceux mis en place par l'ONF (400 m^2 maximum d'après l'ONF) favorisent la reprise de la végétation en la protégeant pendant quelques années. Léger, ponctuel et peu coûteux, ce dispositif prôné par l'ONF, permet de protéger temporairement des zones tout en maintenant différents usages, notamment touristiques et écologiques (circulation des tortues..).

6.3.5. Gestion des embouchures

La gestion des embouchures vise soit à rétablir un transit littoral interrompu ou à restituer au littoral un apport sédimentaire fluviatile ou marin, piégé dans l'embouchure. L'ouverture mécanisée des embouchures reste un moyen simple pour rétablir une connexion hydraulique.

Toutefois, ces interventions en zone d'embouchure doivent prendre en compte des critères de qualité des eaux et de qualité des sédiments extraits. En effet, les marigots, présents sur de nombreuses embouchures, sont souvent caractérisés par une mauvaise qualité des eaux stagnantes.

Dans le cas où l'ouverture d'une embouchure s'avère nécessaire pour restaurer les connexions hydraulique avec la mer et éviter les débordements lors des crues, il est préconisé d'utiliser des moyens légers et de favoriser le rechargement des plages adjacentes avec le sédiment extrait (sous réserve d'une bonne qualité de ces sédiments).

6.3.6. Synthèse sur les solutions techniques et leur applicabilité

Les Illustration 45 et Illustration 46 résument les différentes solutions techniques présentées précédemment et l'évaluation de leur applicabilité sur le littoral martiniquais.

Dispositif	Efficacité en Martinique	Avis
DISPOSITIF EN MER OU EN PIED DE PLAGE		
Algues artificielles	Faible	Il existe peu de retour sur ces techniques. Il est préférable de tenter de conserver les herbiers existants
Pieux hydrauliques	Faible	Peu adaptés aux environnements à faible hydrodynamisme (marée, vagues)
Récifs artificiels (atténuateur de la houle)	Modéré	La pérennité des récifs en Géotubes est incertaine du fait de la déstabilisation potentielle du dispositif face aux houles cycloniques
Système de drainage	Faible	Peu adapté aux environnements à granulométrie fine et aux environnements à faible hydrodynamisme (marée, vagues) car la zone de jet de rive où l'infiltration s'opère est très réduite
DISPOSITIF SUR LA PLAGE		
By-passing - **Mécanique** - **Hydraulique**	Fort	Adapté aux zones de forte dérive littorale bloquée par un aménagement
Rechargement artificiel en sédiment	Fort	Procédé très employé, efficace dans la mesure où le sédiment réinjecté dans la cellule hydrosédimentaire a les même caractéristiques que celui en place
Conteneurs géotextiles transversaux et/ou longitudinaux	Faible	L'application est à proscrire pour les installations transversales ou longitudinales à même la plage car elles bloquent le transit sédimentaire et se détériorent rapidement
Nettoyage raisonné	Fort	Le nettoyage des plages mérite d'être encadré de manière à conduire une pratique raisonnée, adaptée à la fréquentation et au type de ramassage (manuel et/ou mécanisé)

Illustration 45 : Solution technique de lutte contre l'érosion et évaluation de leur applicabilité.

Dispositif	Efficacité en Martinique	Avis
DISPOSITIF SUR LA PLAGE		
Reprofilage	Modéré	Peut se suffire à lui-même (efficacité limitée) mais il est préférable de l'accompagner de dispositifs complémentaires (rechargement, replantation,...)
Couverture de débris végétaux	Modéré	Adapté mais dans les faits relativement peu applicable vis-à-vis d'autres enjeux (exemple des dépôts de sargasses)
Biofixation	Faible	Pas de retour d'expérience, rien n'indique que le renforcement de la cohésion du sable et de l'eau favorise la sédimentation
PROTECTION DE HAUT DE PLAGE		
Conteneurs géotextiles (Enfouis en haut de plage)	Modéré	Les installations de conteneurs enfouis en haut de plage peuvent être adaptées, en accompagnement de dispositifs de restauration complémentaires (reprofilage, plantations...).
Canalisation de la fréquentation (enclos, ganivelle..)	Fort	Adapté pour limiter l'effet du piétinement et pour limiter l'érosion éolienne. Pratiqué par l'ONF pour favoriser la régénération
Plantation	Fort	Très adapté au littoral martiniquais et déjà largement pratiqué par l'ONF et les communes
GESTION DES EMBOUCHURES		
Ouverture mécanisée	Fort	Moyen simple pour rétablir une connexion hydraulique mais doit prendre en compte des critères de qualité des eaux et de qualité des sédiments extraits.

Illustration 46 : Solution technique de lutte contre l'érosion et évaluation de leur applicabilité (suite)

7. Conclusion

Cette étude a conduit à produire plusieurs types de résultats qui améliore la connaissance de la dynamique littorale à l'échelle de l'île, permettant d'avoir une vue d'ensemble de l'exposition du littoral martiniquais et de comparer spatialement son exposition et sa vulnérabilité à l'érosion.

Sur les 57 km de côtes sableuses, un total de 92 cellules sédimentaires indépendantes ont été identifiées régissant les 117 plages sableuses martiniquaises. Les cellules les plus étendues (3.9 km de longueur maximum) sont situées sur la côte Caraïbes, entre la commune de Schœlcher et du Prêcheur ce qui correspond à une côte peu découpée, expliquée par un volcanisme récent. Toute gestion doit être élaborée à l'échelle des cellules sédimentaires. Ces délimitations constituent notamment l'emprise latérale minimale des études d'impacts, pour tout aménagement sur le littoral.

Par ailleurs, sont désormais disponibles :

- Un atlas de 30 climats de vagues, le long du littoral, proche de la côte ;

- Une description des 117 plages martiniquaises à l'aide de plusieurs paramètres quantitatifs caractéristiques des plages sableuses et de leur vulnérabilité à l'érosion ;

- Un indicateur permettant de hiérarchiser les plages selon leur vulnérabilité à l'érosion, tenant compte à la fois des conditions morphologiques actuelles (largeur et bathymétrie de l'avant côte) et des constats de mobilité à long terme du haut et du bas de plage. Cet indicateur constitue donc un outil d'aide à la décision pour le choix de la stratégie de gestion du trait de côte tel que défini par le MEDDE (2013) : laissé faire, relocalisation des enjeux ou maintien des enjeux. Au-delà de cet indicateur de vulnérabilité, l'autre critère à prendre en compte reste la valeur des enjeux ;

- Une liste des solutions techniques pour lutter contre l'érosion déclinable au littoral martiniquais.

Sur ce dernier point, il ressort que le rechargement de plages reste l'une des techniques douces les plus efficaces pour lutter contre l'érosion. Elle nécessite cependant de s'assurer de ne pas entrainer un déficit sédimentaire sur les lieux de prélèvements, qui peuvent être en dehors de la cellule sédimentaire. Dans ce contexte, la mise en place d'un « Plan de gestion des sédiments » basée sur les cellules sédimentaires identifiées dans la présente étude, permet d'anticiper ces transferts sédimentaires globalement en identifiant les ressources, en anticipant les transits et les modalités de rechargement et en respectant les écosystèmes marins.

8. Bibliographie

Balouin, Y., Belon, R., Merour, A. and Riotte, C. (2014). Evolution of corsican pocket beaches. Journal of Coastal Research, SI 70 : 096-101.

Balouin, Y. et Colombet, Y. (2014). Dynamique à haute fréquence d'une barre d'avant-côte sous influence d'un atténuateur de vagues : suivi vidéo du Lido de Sète. Résumé pour les 24è-mes Réunions des Sciences de la Terre, Pau, Oct. 2014.

Barras A.V. (2008) - Inventaire des impacts de la houle cyclonique OMAR (16 octobre 2008) sur la côte caraïbe de la Martinique – Compte rendu du 18/10/2008.

Barras A.V., Oliveros C., Joseph B., Marimoutou C. (2008) - Inventaire et caractérisation des impacts de la houle sur le littoral de la Martinique au passage de l'ouragan Dean (17 août 2007) - Rapport BRGM/RP-55954-FR.

Battistini (1978). Les récifs coralliens de la Martinique. Comparaison avec ceux du sud-ouest de l'Océan Indien. *Cahiers ORSTOM.Série Océanographie*, 1978, 16 (2), p. 157-177.

Bosser K., J.-C. Flageollet, F. Levoy (2000). Evolution morphodynamique d'une plage soumise à des épisodes de renforcement des alizés en Martinique, Géomorphologie : relief, processus, environnement, Vol.6, N°2.

Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J. Geoph. Research, C4, 104, 7649–7666.

Bowman, D., Guillen, J., Lopez, L. and Pellegrino, V. (2009). Planview geometry and morphological characteristics of pocket beaches on the catalan coast (Spain). Geomorphology, 108:191-199.

Cayol. C., Maillard J.F., Dubief L. (2008). Vers la réhabilitation des sites de nidification des tortues marines en Martinique – Revue Faune sauvage n°281, pp 40-47.

Cooper N.J. and Ponte N.I. (2006). Appraisal and evolution of +the littoral sediment cell concept in applied coastal management: experiences from England and Wales. Ocean and Coastal management 49 (2006), 498-510.

De la Torre Y. (2008). Livret pédagogie « Gestion de l'érosion du littoral de Mayotte. Rapport final. Rapport BRGM/RP-56366-FR.30 p.

De La Torre, Y., Belon, R., Balouin, Y. et Stepanian, A. (2014). Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral de Corse. Rapport BRGM RP-63034-FR, 59 p.

Durand F. (1996). Hydrodynamisme sédimentaire sur le plateau insulaire de la Martinique. Thèse universitaire.

Guide. Gestion de l'érosion du littoral de la Réunion. Coédition BRGM, Région Réunion et DEAL.

Guide méthodologique. Le nettoyage raisonné des plages (2011). Edité par le Conservatoire du littoral et Rivages de France. Soutenu par Veolia Environnement

Hsu, J.R.C., Silvester, R. and Xia, Y.M. (1989). Generalities on static equilibrium bays. Coastal Engineering, 12:353-369.

Le Cozannet, G., Lecacheux, S., Delvallee, E., Desramaut, N., Oliveros, C., and Pedreros, R. (2011). Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay, Journal of Climate, 24, 641-652, 10.1175/2010JCLI3589.1,.

Lecacheux S., Pedreros R., Le Cozannet G., Thiebot J., De La Torre Y., and Bulteau T. (2012). A method to characterize the different extreme waves for islands exposed to various wave regimes: a case study devoted to Reunion Island, Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, 10.5194/nhess-12-2425-2012,.

Legrand H. (2009). Base de données cartographiques des fonds marins côtiers de la Martinique : Biocénoses benthiques - Observatoire du Milieu Marin Martiniquais (OMMM).

Le Roy M., Nachbaur A., Nicolae Lerma A., Balouin Y, Idier D., Pedreros R. (2014). Etude hydro-sédimentaire du littoral de Schœlcher (Martinique). Rapport final. BRGM/RP-63529-FR, p 129, 98 illustrations, 7 annexes

Nachbaur A., Paulineau M., Le Roy M. (2014). Évolution multidécennale (1951-2010) et décennale (2004 – 2010) du trait de côte de la Martinique. Rapport final. BRGM/RP-63238-FR, p 98, 67 illustrations, 2 annexes

MEEDTL, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logements (2010). La gestion du trait de côte, Edition Quae, 290 p.

Poisson B. et Pedreros R. (2007). Tsunamis : étude de cas au niveau de la côte antillaise française - Modélisation numérique. BRGM/RP-55761-FR, 111 p., 73 fig., 24 tabl.

Revert E. (1949). La Martinique, Étude géographique et humaine. Paris : Nouvelles Éditions latines, 1949, 559 pp. Collection : Bibliothèque de l'Union française.

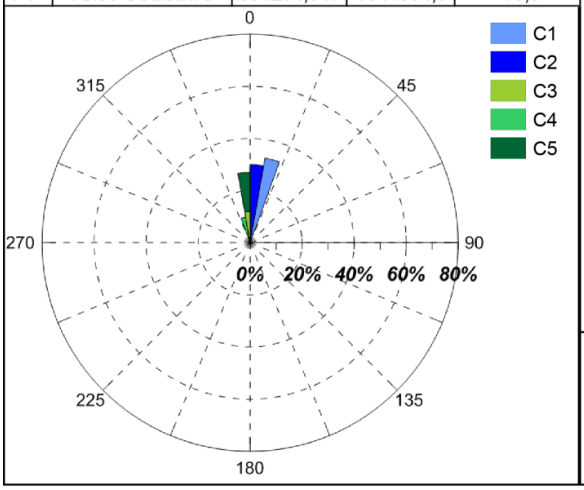
Short, A.D., and Masselink, G. (1999). Embayed and structurally controlled beaches. Marine Geology, 346:153-164.

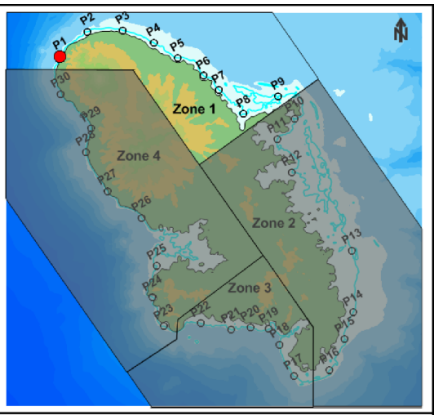
Sastre, C. and Breuil, A. (2007). Plantes, milieux et paysages des Antilles françaises. Ecologie, biologie, dentification, protection et usages. Biotope, Mèze (Coll. Parthénope). 672 p.

Annexe 1

Conditions de vagues à la côte le long du littoral

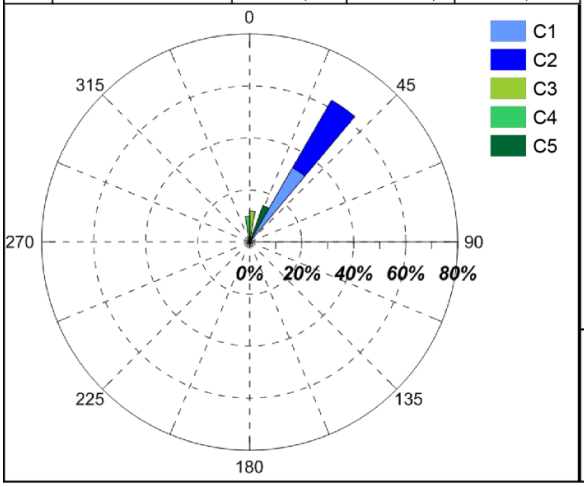
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P1	Anse Couleuvre	691264,917	1641964,6	-19,8

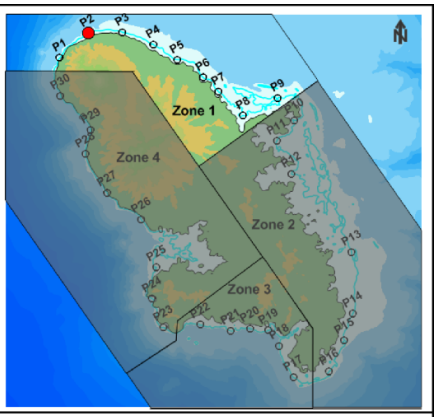




	P1				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,4	7,6	15	23,4
C2	30	0,5	8,4	5	19,9
C3	12	0,7	10,2	355	26,4
C4	10	0,8	13,6	345	19,8
C5	15	0,8	9,2	355	19,9

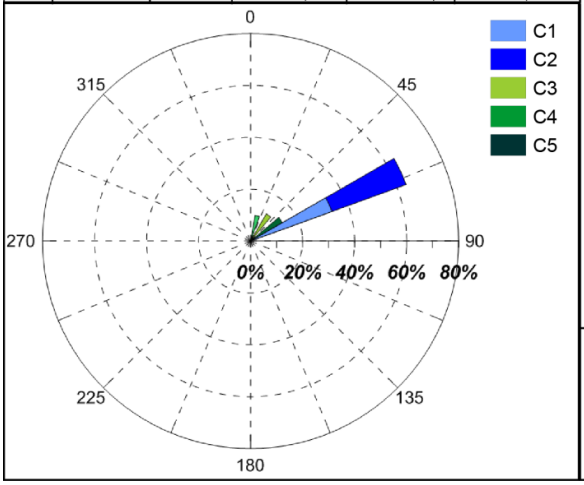
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P2	Grande rivière	695572,069	1645782,3	-20,0

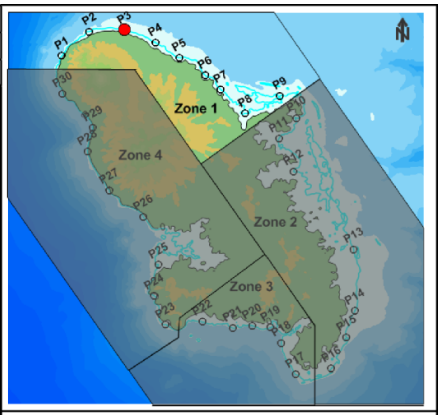




	P2				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,7	8,4	35	24,3
C2	30	1,0	8,4	35	23,2
C3	12	1,0	10,2	5	35,4
C4	10	1,1	13,6	355	25,9
C5	15	1,4	9,2	25	24,9

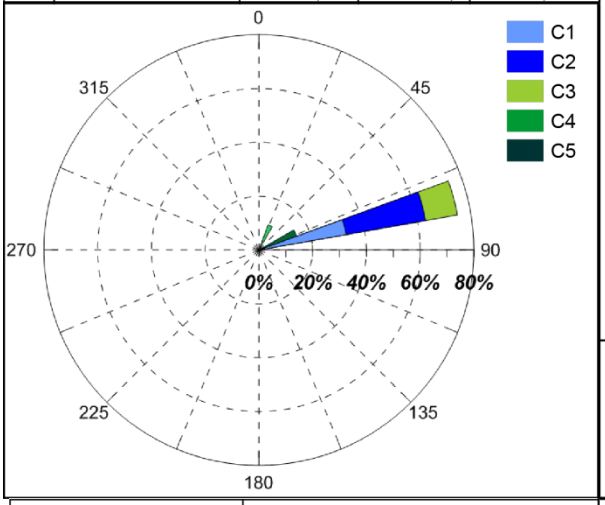
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P3	Basse pointe	701068,031	1645993,2	-20,1

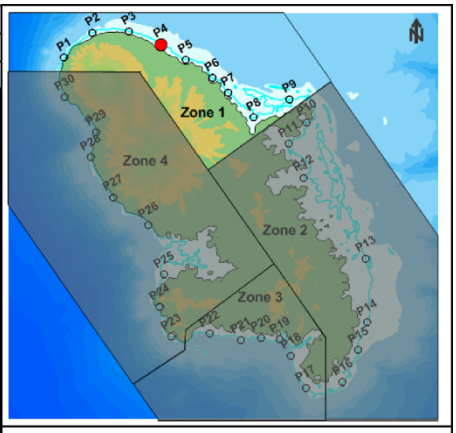




	P3				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	65	26,3
C2	30	1,3	8,4	65	26,2
C3	12	1,3	10,2	35	37,8
C4	10	1,5	13,6	15	29,6
C5	15	1,9	9,2	55	27,5

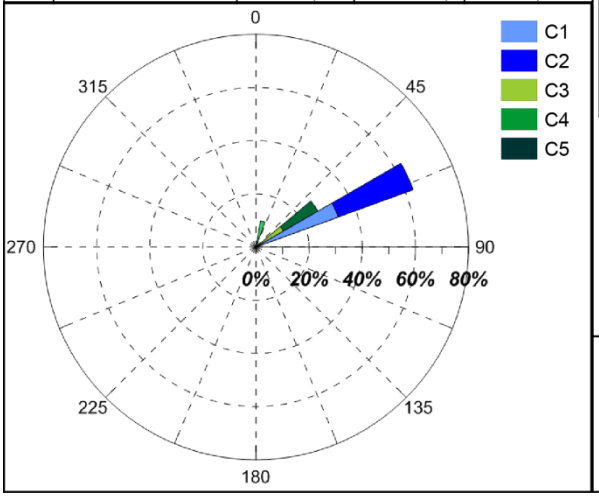
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P4	Nord	705924,285	1644063,2	-20,0

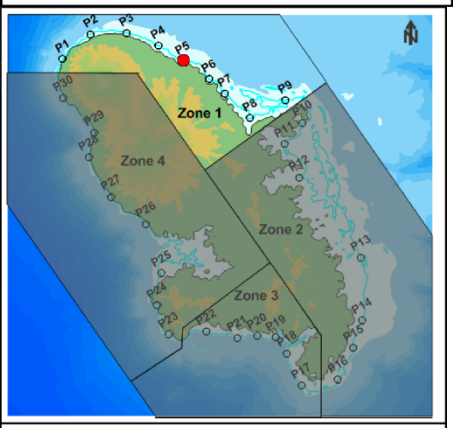




	P4				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,1	8,4	75	26,5
C2	30	1,4	8,4	75	26,6
C3	12	1,4	10,2	75	38,5
C4	10	1,6	13,6	25	30,4
C5	15	2,0	9,2	65	27,9

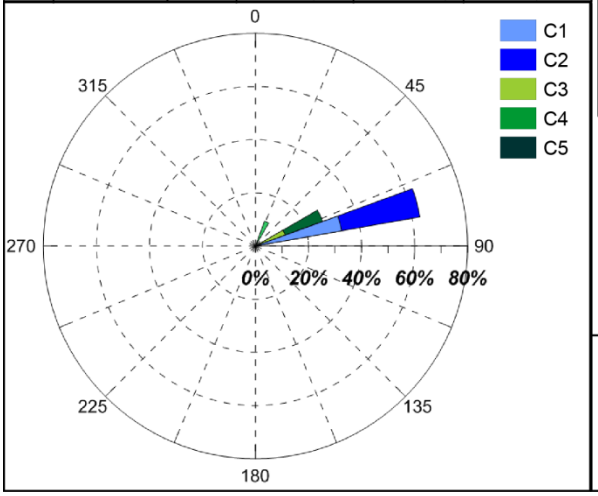
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P5	Gde Anse	709669,767	1641672,3	-20,0

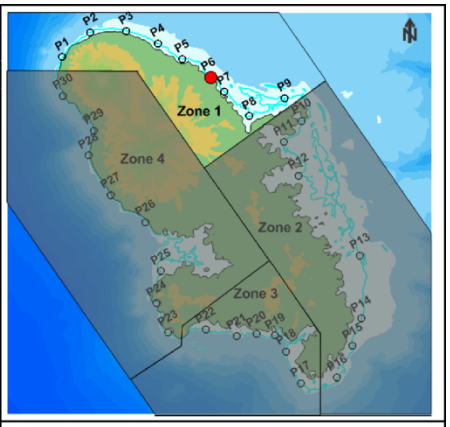




	P5				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	65	24,4
C2	30	1,3	8,4	65	24,0
C3	12	1,3	10,2	55	33,0
C4	10	1,4	13,6	15	27,7
C5	15	1,9	9,2	55	25,4

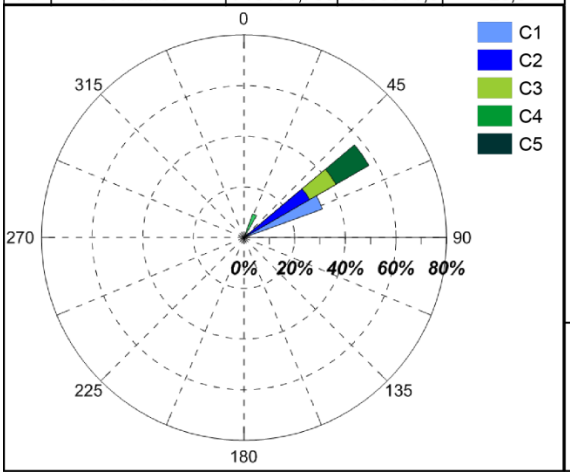
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P6	Anse Charpentier	713726,057	1638888,7	-20,0

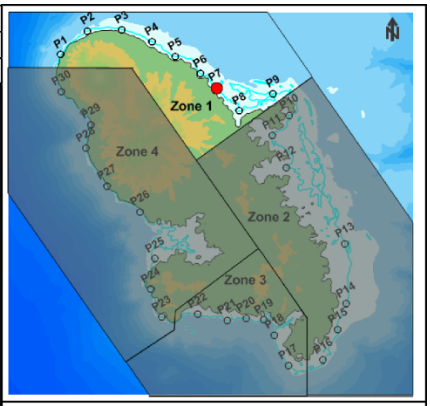




	P6				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,1	8,4	75	24,2
C2	30	1,4	8,4	75	24,2
C3	12	1,4	10,2	65	29,8
C4	10	1,5	13,6	25	26,0
C5	15	2,0	9,2	65	25,2

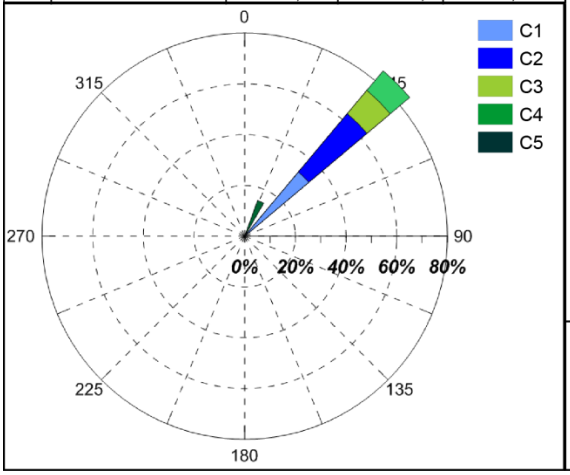
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P7	St Marie	716181,756	1636671,5	-20,0

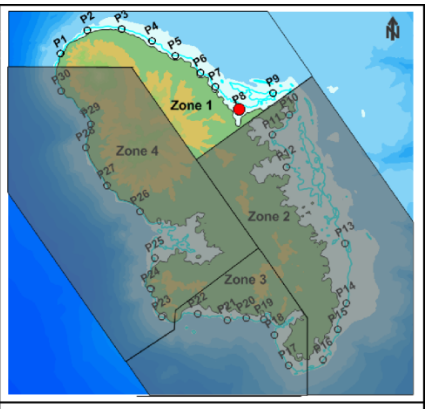




	P7				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	65	25,5
C2	30	1,3	8,4	55	24,3
C3	12	1,4	10,2	55	29,9
C4	10	1,6	13,6	25	26,1
C5	15	1,9	9,2	55	25,0

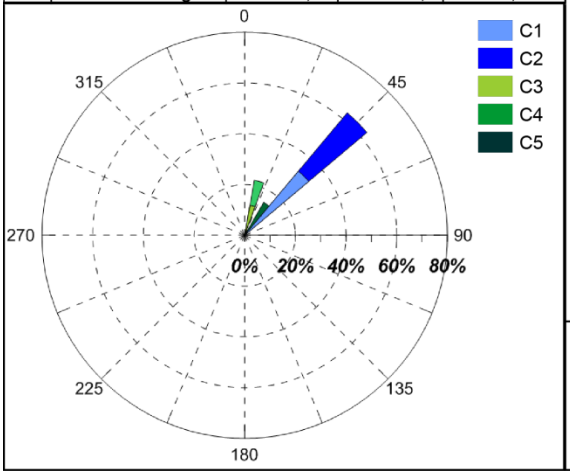
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P8	Trinité	720029,828	1632883,8	-20,0

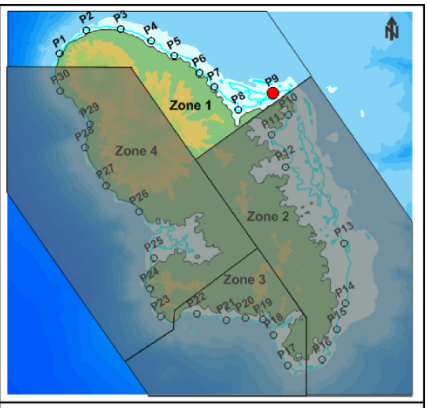




	P8				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,8	8,4	45	24,1
C2	30	1,0	8,4	45	23,0
C3	12	1,1	10,2	45	27,8
C4	10	1,1	13,6	15	25,1
C5	15	1,4	9,2	25	23,9

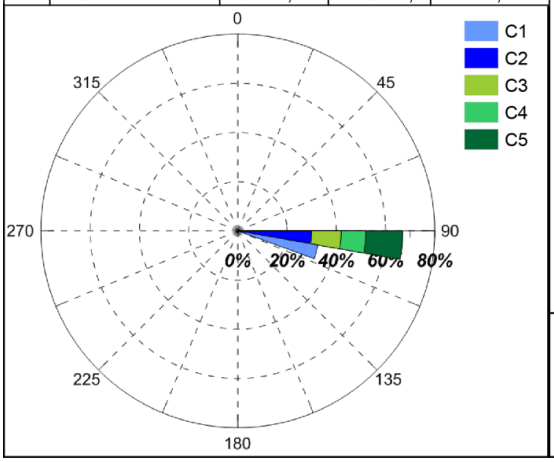
Zone 1		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P9	Anse l'étang	725487,4	1635682,5	-19,9

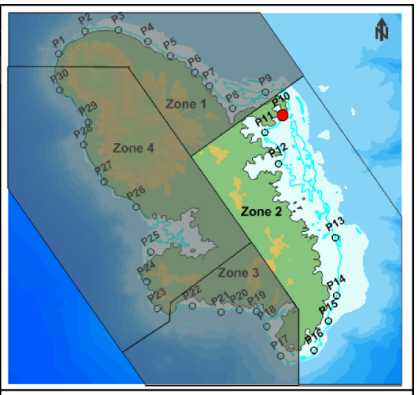




	P9				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,1	8,4	45	31,8
C2	30	1,4	8,4	45	31,9
C3	12	1,5	10,2	15	41,2
C4	10	1,6	13,6	15	46,4
C5	15	2,0	9,2	35	35,1

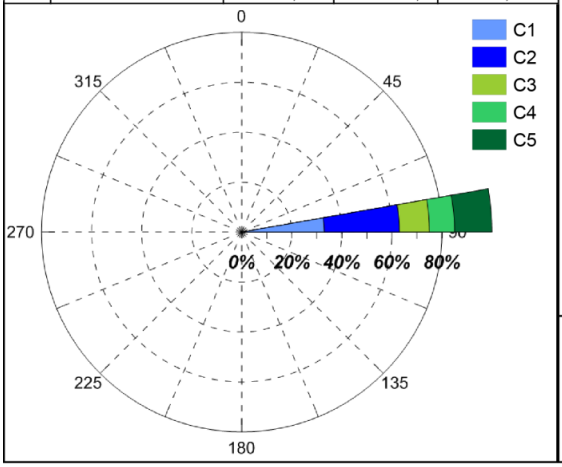
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P10	Baie du trésor	728086,718	1632161,3	-19,7

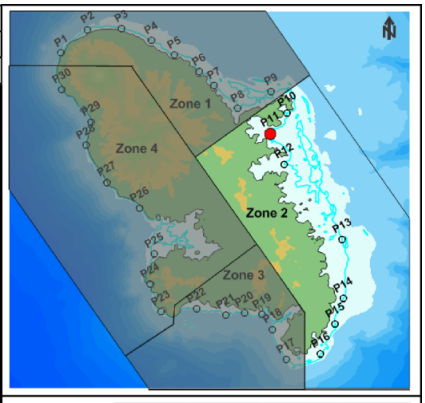




	P10				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	105	24,3
C2	30	1,3	8,4	95	23,0
C3	12	1,0	10,2	95	25,8
C4	10	0,9	13,6	95	26,3
C5	15	1,6	9,2	95	22,9

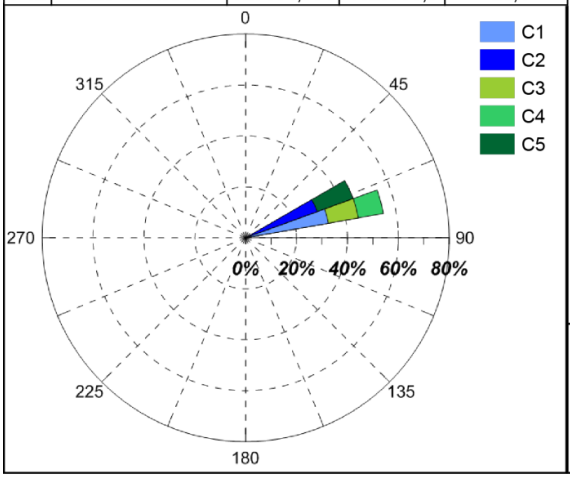
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P11	Baie du Gallion	725307,251	1628892,3	-20,0

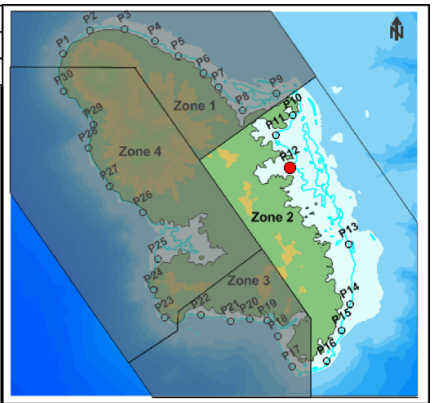




	P11				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	85	20,6
C2	30	1,2	8,4	85	19,4
C3	12	1,1	10,2	85	21,2
C4	10	1,0	13,6	85	20,1
C5	15	1,6	9,2	85	18,9

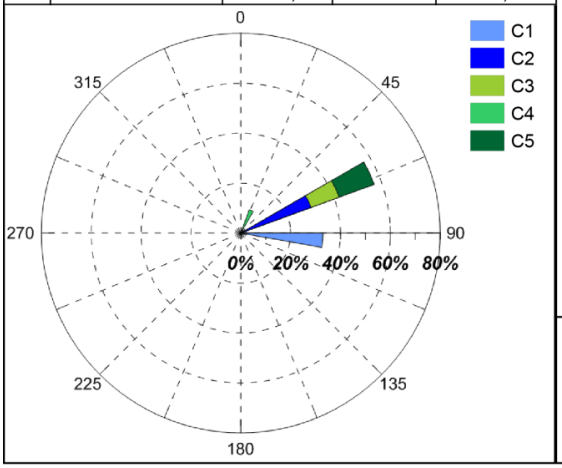
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P12	Baie du Robert	727591,954	1623755,5	-20,1

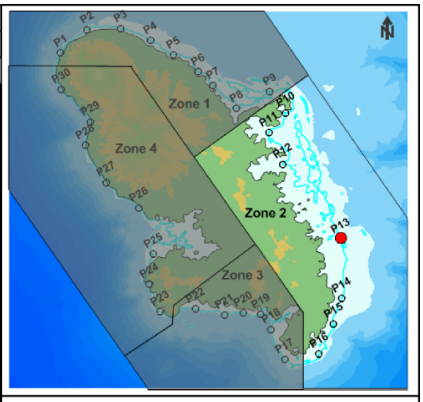




	P12				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,8	8,4	75	23,2
C2	30	1,0	8,4	65	20,6
C3	12	1,0	10,2	75	23,5
C4	10	0,9	13,6	75	22,7
C5	15	1,3	9,2	65	20,1

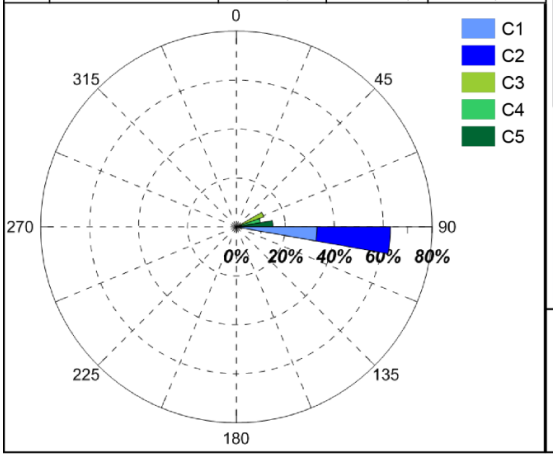
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P13	Anse du Vauclin	737061,852	1611497	-20,0

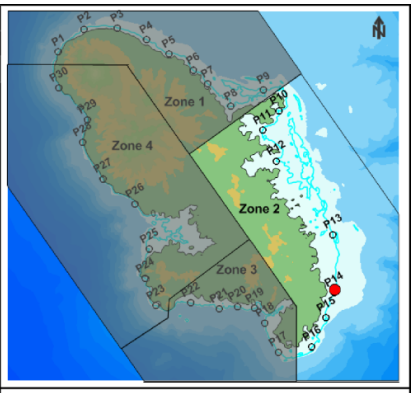




	P13				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,4	8,4	95	36,3
C2	30	1,8	8,4	65	35,9
C3	12	1,6	10,2	65	35,5
C4	10	1,4	13,6	25	35,8
C5	15	2,4	9,2	65	34,7

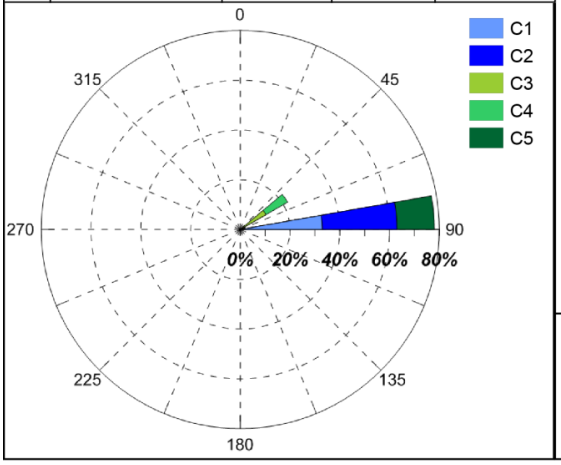
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P14	Anse Four à Chaux	737226,525	1601797,8	-20,0

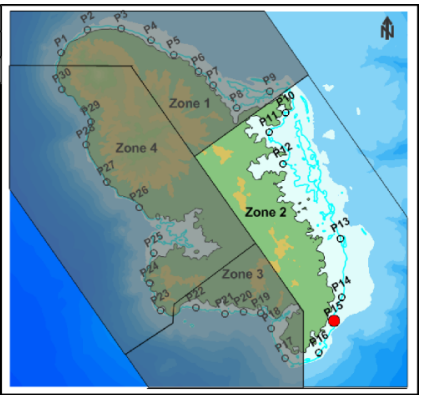




	P14				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,2	8,4	95	28,6
C2	30	1,6	8,4	95	28,0
C3	12	1,4	10,2	65	29,0
C4	10	1,3	13,6	75	27,1
C5	15	2,1	9,2	85	27,5

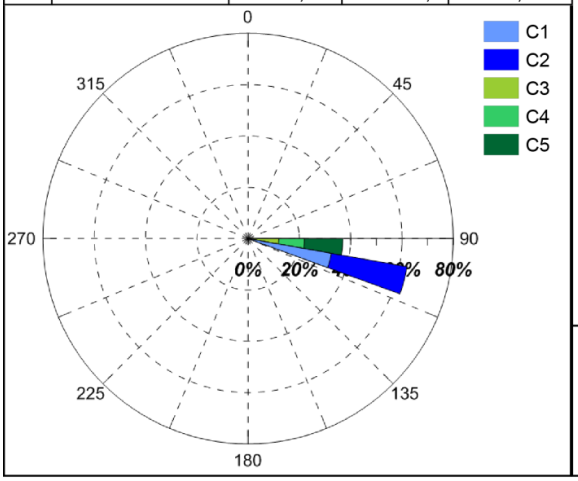
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P15	Anse La balle	735915,663	1597630,5	-20,2

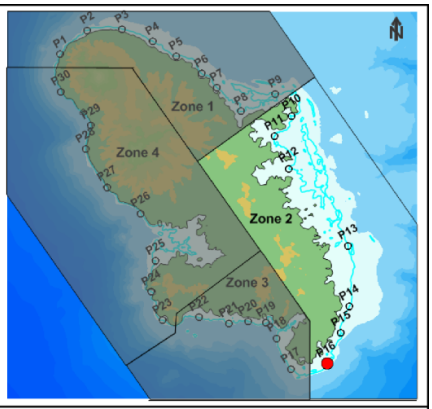




	P15				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,2	8,4	85	27,4
C2	30	1,6	8,4	85	26,7
C3	12	1,4	10,2	55	28,0
C4	10	1,3	13,6	55	26,1
C5	15	2,1	9,2	85	26,4

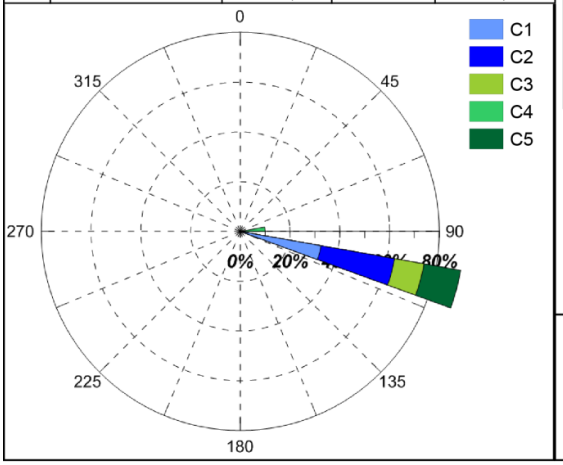
Zone 2		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P16	Anse Trabaud	733552,155	1592738,6	-20,0

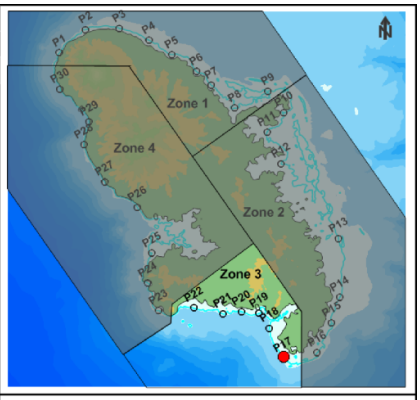




	P16				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	1,0	8,4	105	22,9
C2	30	1,3	8,4	105	21,1
C3	12	1,2	10,2	85	26,2
C4	10	1,0	13,6	85	27,4
C5	15	1,8	9,2	85	21,6

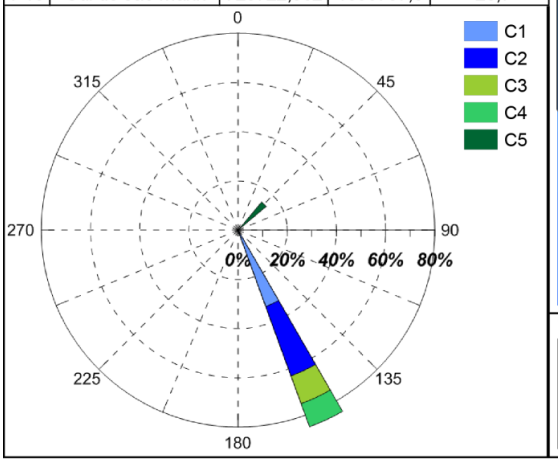
Zone 3		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P17	Anse des Salines	727913,078	1591830	-20,0

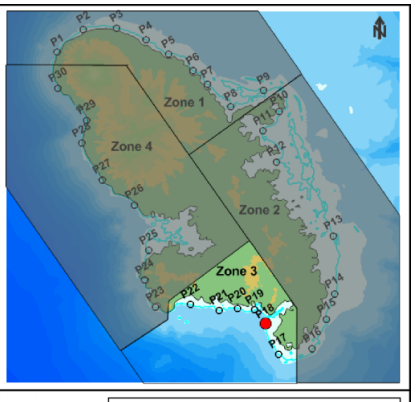




	P17				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,5	8,4	105	28,9
C2	30	0,6	8,4	105	28,1
C3	12	0,7	10,2	105	32,3
C4	10	0,5	12,3	85	36,8
C5	15	0,8	9,2	105	31,1

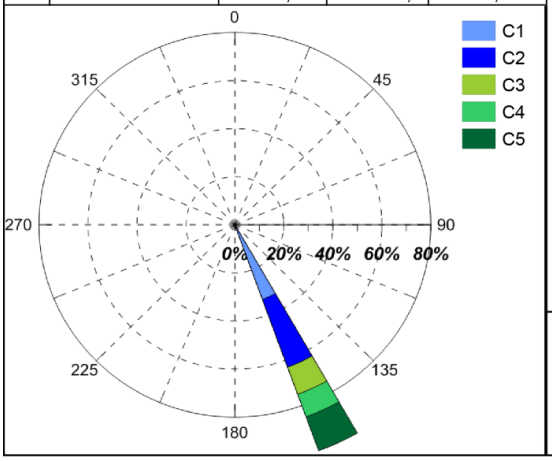
Zone 3		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P18	Cul de sac marin	725722,562	1596757,5	-20,7

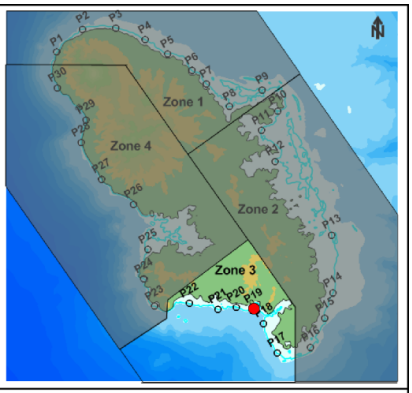




	P18				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,2	1,8	155	45,3
C2	30	0,2	1,8	155	45,2
C3	12	0,3	2,0	155	45,1
C4	10	0,2	1,8	155	45,8
C5	15	0,4	2,2	45	44,4

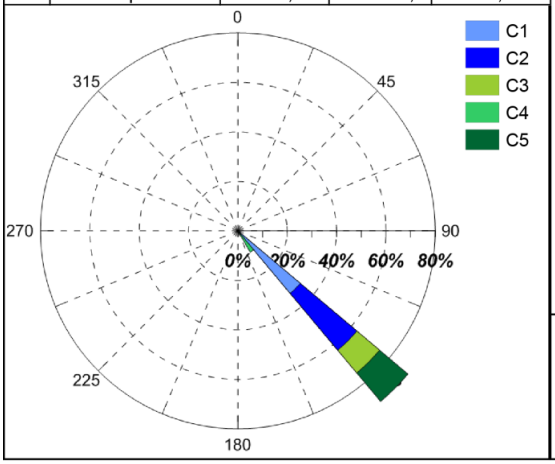
Zone 3		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P19	Trou au diable	724010,907	1599189,1	-20,4

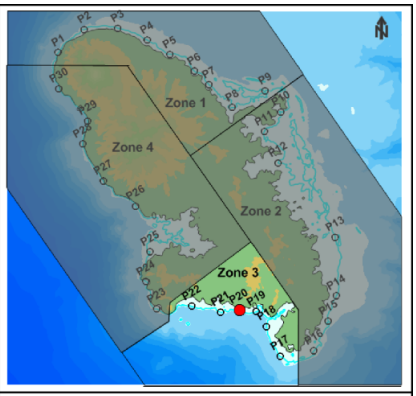




	P19				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,2	2,2	155	34,2
C2	30	0,2	2,2	155	35,4
C3	12	0,3	2,4	155	35,6
C4	10	0,2	2,0	155	32,5
C5	15	0,3	2,4	155	37,2

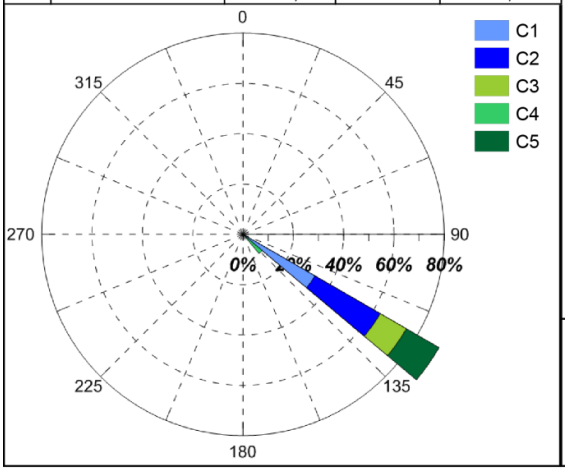
Zone 3		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P20	Anse Corp de Garde	721101,769	1599489,4	-20,2

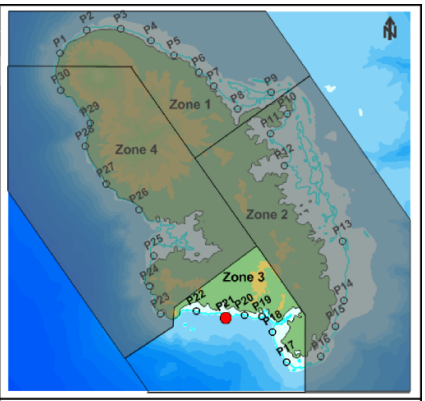




	P20				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,3	2,4	135	28,1
C2	30	0,3	2,4	135	28,3
C3	12	0,4	2,9	135	27,2
C4	10	0,3	2,6	145	28,6
C5	15	0,4	2,9	135	27,4

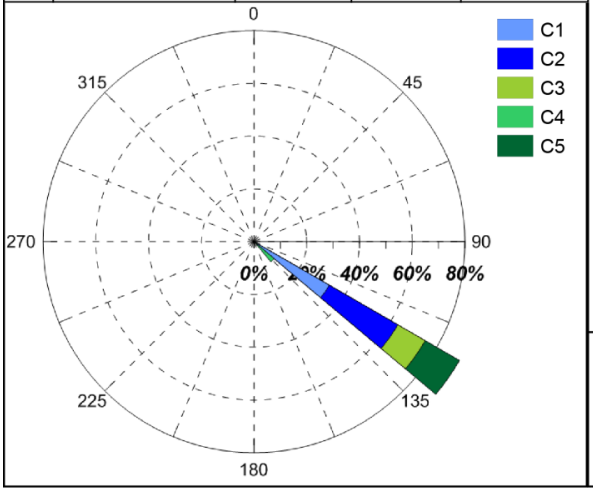
Zone 3		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P21	Anse trois Rivière	718067,507	1599114	-20,1

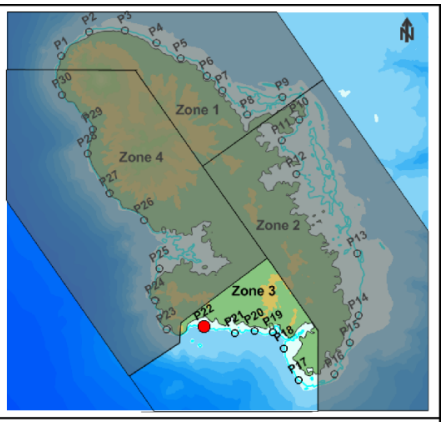




	P21				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,4	2,6	125	27,4
C2	30	0,4	2,6	125	27,1
C3	12	0,5	3,2	125	26,7
C4	10	0,4	2,9	135	27,9
C5	15	0,6	3,2	125	26,9

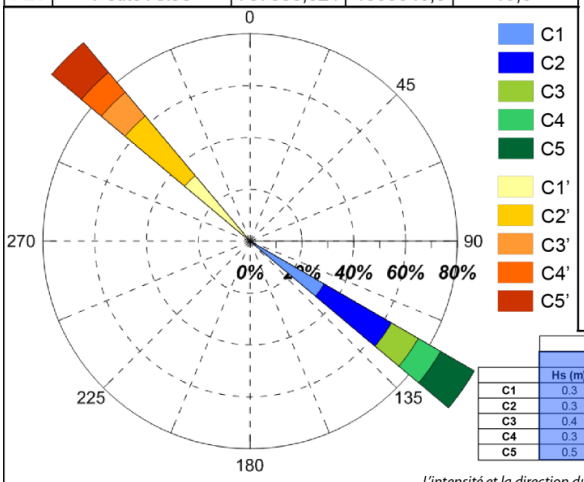
Zone 3		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P22	Anse du diamant	713313,018	1600071,6	-20,0

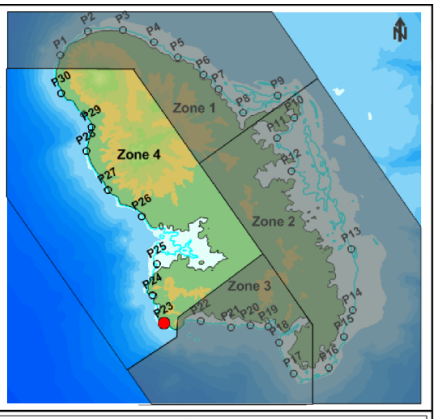




	P22				
	Occ (%)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	34	0,4	2,9	125	23,3
C2	30	0,4	2,9	125	23,3
C3	12	0,5	3,2	125	22,6
C4	10	0,4	2,9	135	23,9
C5	15	0,6	3,5	125	22,8

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P23	Petite Anse	707500,921	1599646,8	19,8

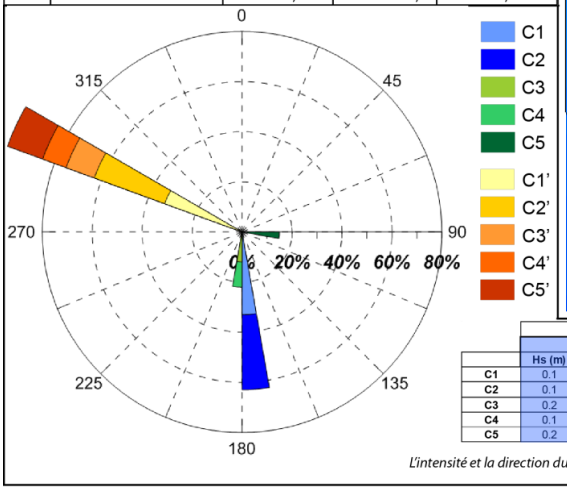


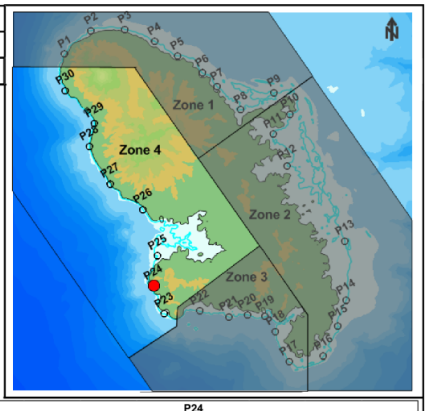


	P23							
	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.3	3.2	125	17.9	0.2	3.5	315	56.2
C2	0.3	3.5	125	19.1	0.2	3.5	315	56.5
C3	0.4	3.9	125	25.8	0.3	3.9	315	52.5
C4	0.3	3.5	125	27.4	0.2	3.2	315	69.8
C5	0.5	3.9	125	22.5	0.3	4.3	315	54.5

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P24	Anse d'Arlet	705748,233	1604150,7	-20,2

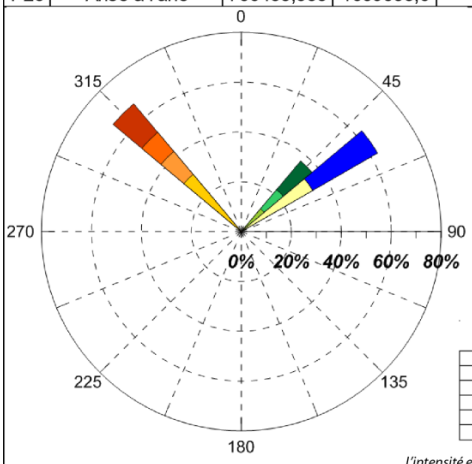


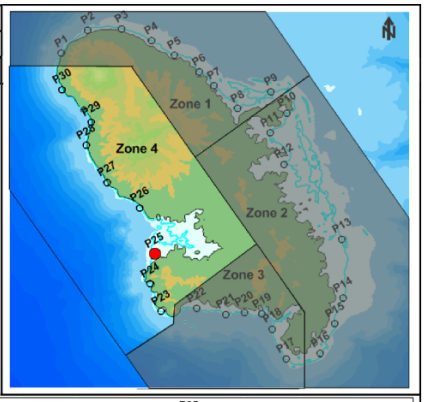


	P24							
	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.1	1.6	175	35.9	0.1	3.2	295	16.3
C2	0.1	1.0	175	45.8	0.1	3.5	295	15.1
C3	0.2	1.2	185	51.6	0.2	3.9	295	53.4
C4	0.1	13.6	185	37.9	0.1	13.6	295	23.6
C5	0.2	1.3	95	43.4	0.2	3.9	295	53.5

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P25	Anse à l'ane	706433,533	1609053,6	-19,9

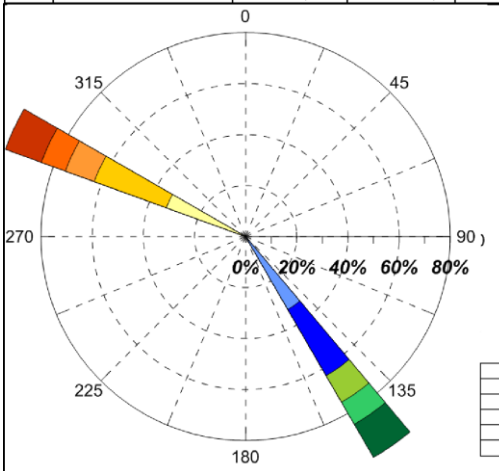


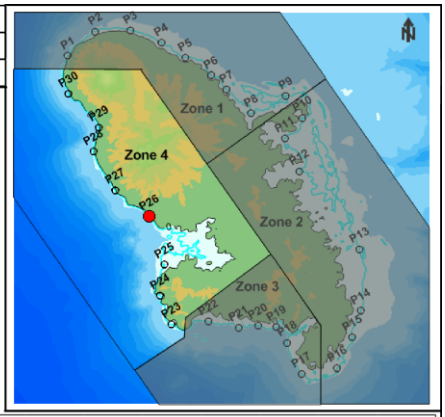


P25	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.2	2.0	55	26.0	0.3	2.0	55	40.5
C2	0.3	2.0	55	26.2	0.3	2.0	315	42.1
C3	0.3	2.4	45	28.9	0.5	2.4	315	44.2
C4	0.3	2.0	45	33.4	0.3	2.2	315	44.8
C5	0.4	2.4	45	26.1	0.5	2.6	315	43.1

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P26	Shoelcher	704040,311	1616598,5	-19,9

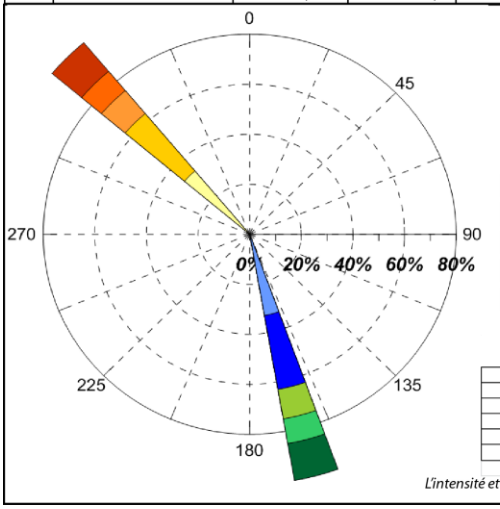


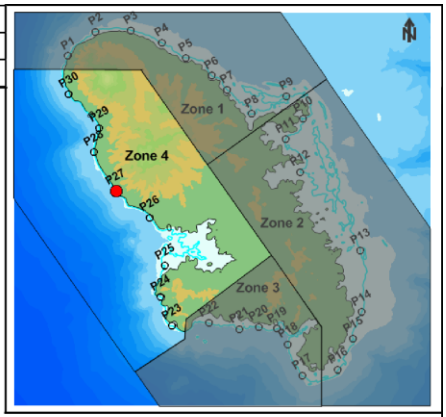


P26	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.2	2.6	145	19.1	0.1	2.9	295	26.1
C2	0.2	2.6	145	19.6	0.1	2.9	295	25.1
C3	0.2	2.9	145	23.1	0.2	3.5	295	31.3
C4	0.2	2.6	145	24.0	0.1	3.2	295	30.5
C5	0.2	2.9	145	23.7	0.2	3.5	295	35.4

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P27	Belle fontaine	698681,646	1620801,7	-19,8

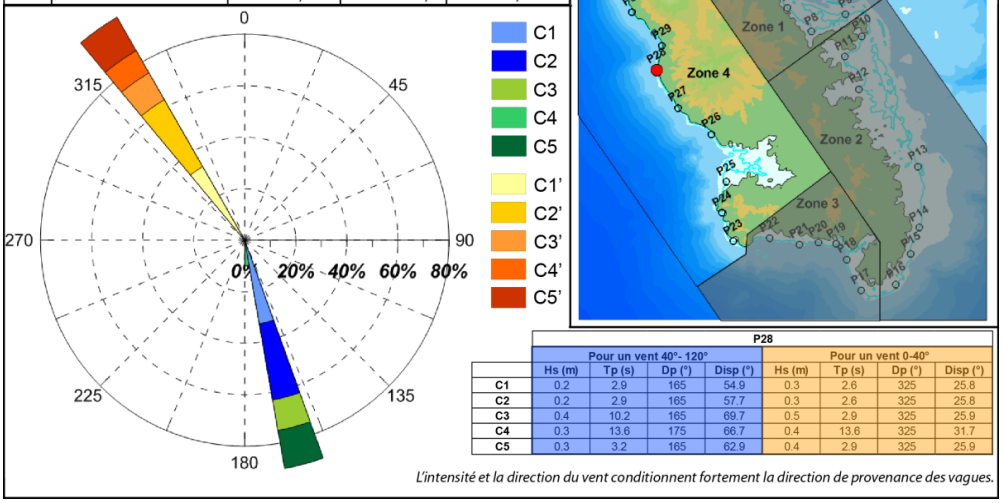


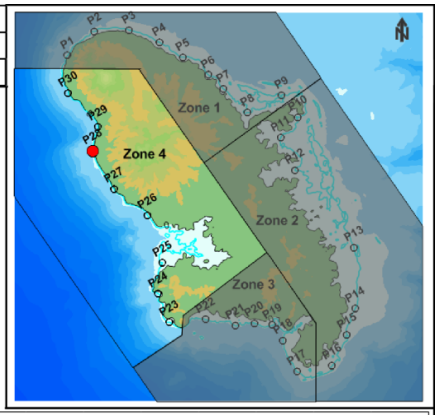


P27	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.2	2.6	165	16.3	0.2	2.9	315	14.5
C2	0.2	2.6	165	17.3	0.2	2.9	315	14.5
C3	0.2	3.2	165	26.3	0.3	3.5	315	15.6
C4	0.2	2.9	165	34.0	0.2	2.9	315	24.4
C5	0.2	3.2	165	23.0	0.3	3.5	315	18.1

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P28	Le Carbet	695253,891	1626854,8	-19,8



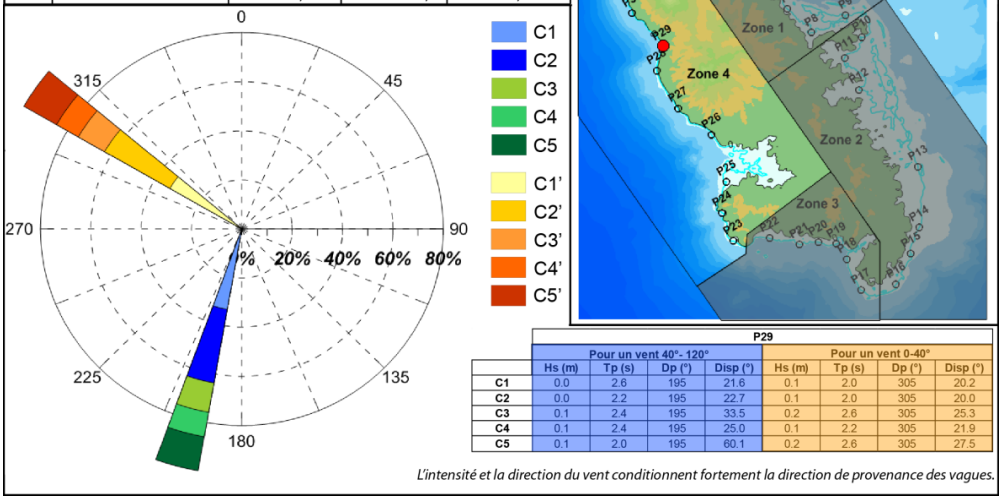


P28

	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.2	2.9	165	54.9	0.3	2.6	325	25.8
C2	0.2	2.9	165	57.7	0.3	2.6	325	25.8
C3	0.4	10.2	165	69.7	0.5	2.9	325	25.9
C4	0.3	13.6	175	66.7	0.4	13.6	325	31.7
C5	0.3	3.2	165	62.9	0.4	2.9	325	25.9

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P29	St Pierre	696145,735	1630649,9	-19,5

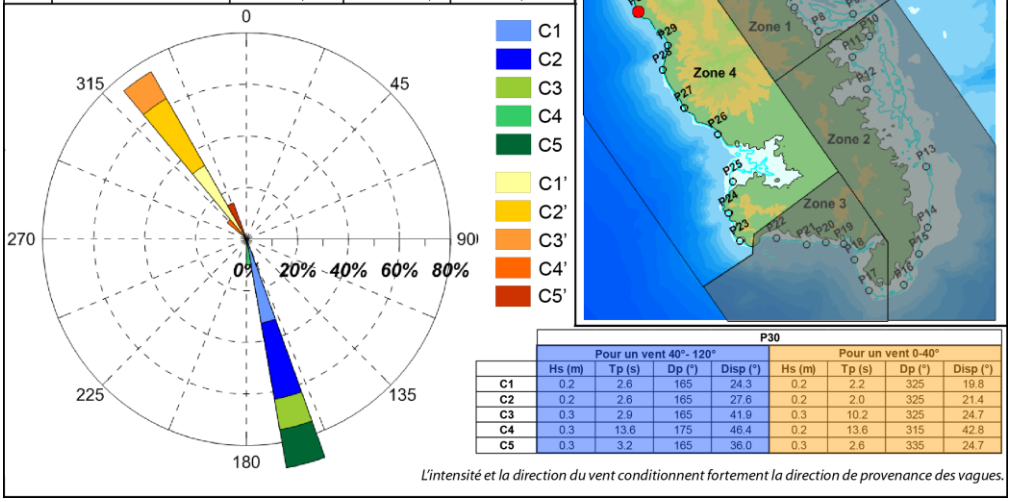


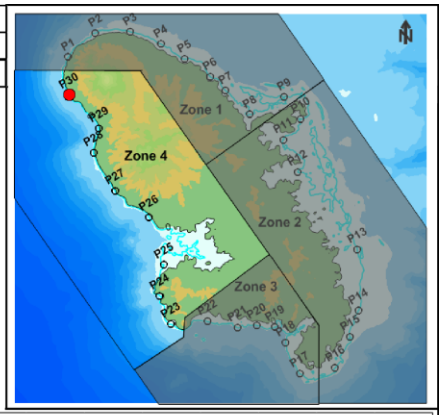
P29

	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.0	2.6	195	21.6	0.1	2.0	305	20.2
C2	0.0	2.2	195	22.7	0.1	2.0	305	20.0
C3	0.1	2.4	195	33.5	0.2	2.6	305	25.3
C4	0.1	2.4	195	25.0	0.1	2.2	305	21.9
C5	0.1	2.0	195	60.1	0.2	2.6	305	27.5

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

Zone 4		Localisation (UTM20)		
Identifiant		Lat	Long	Profondeur
P30	Le Précheur	691406,489	1636035,1	-20,0





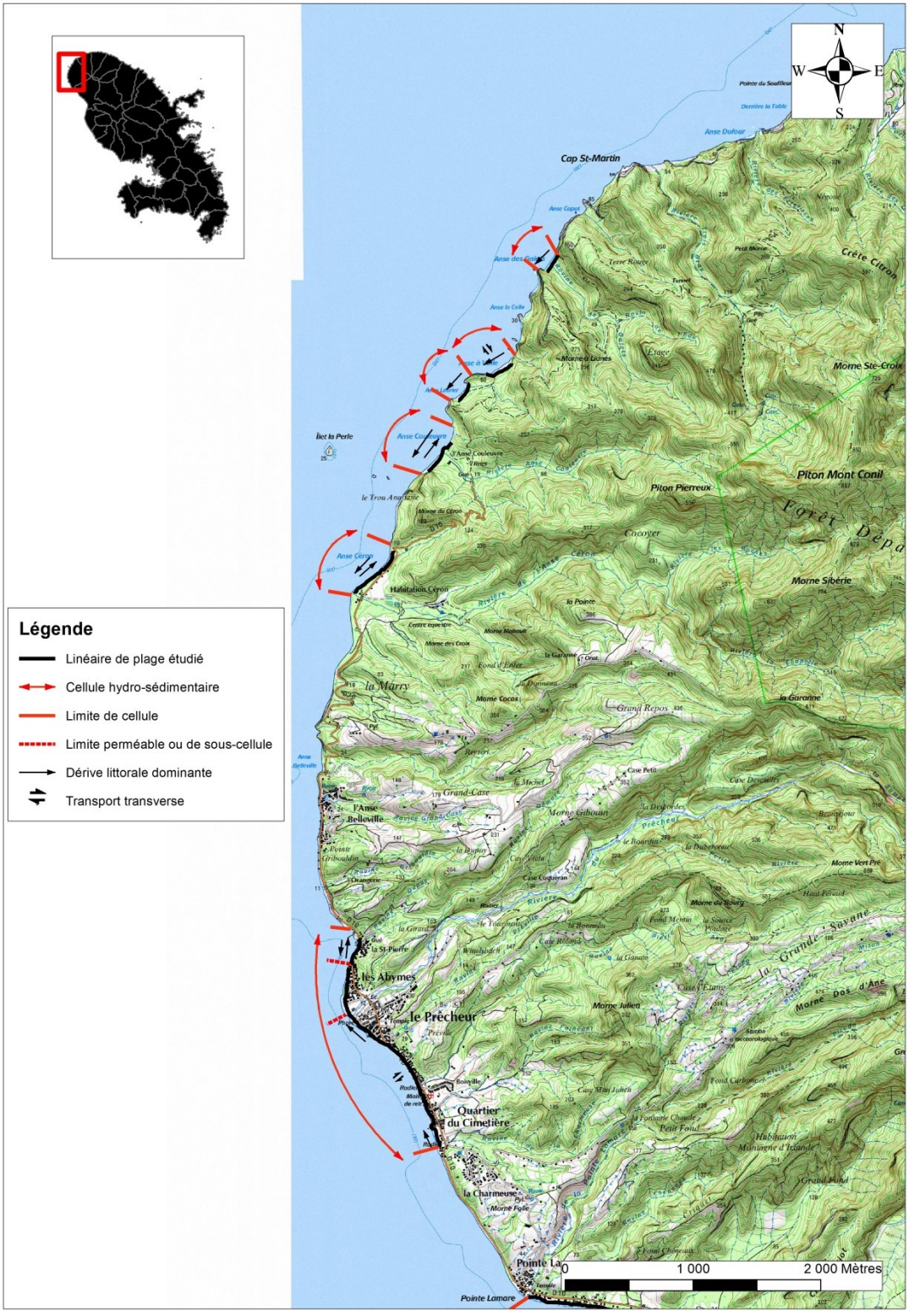
P30

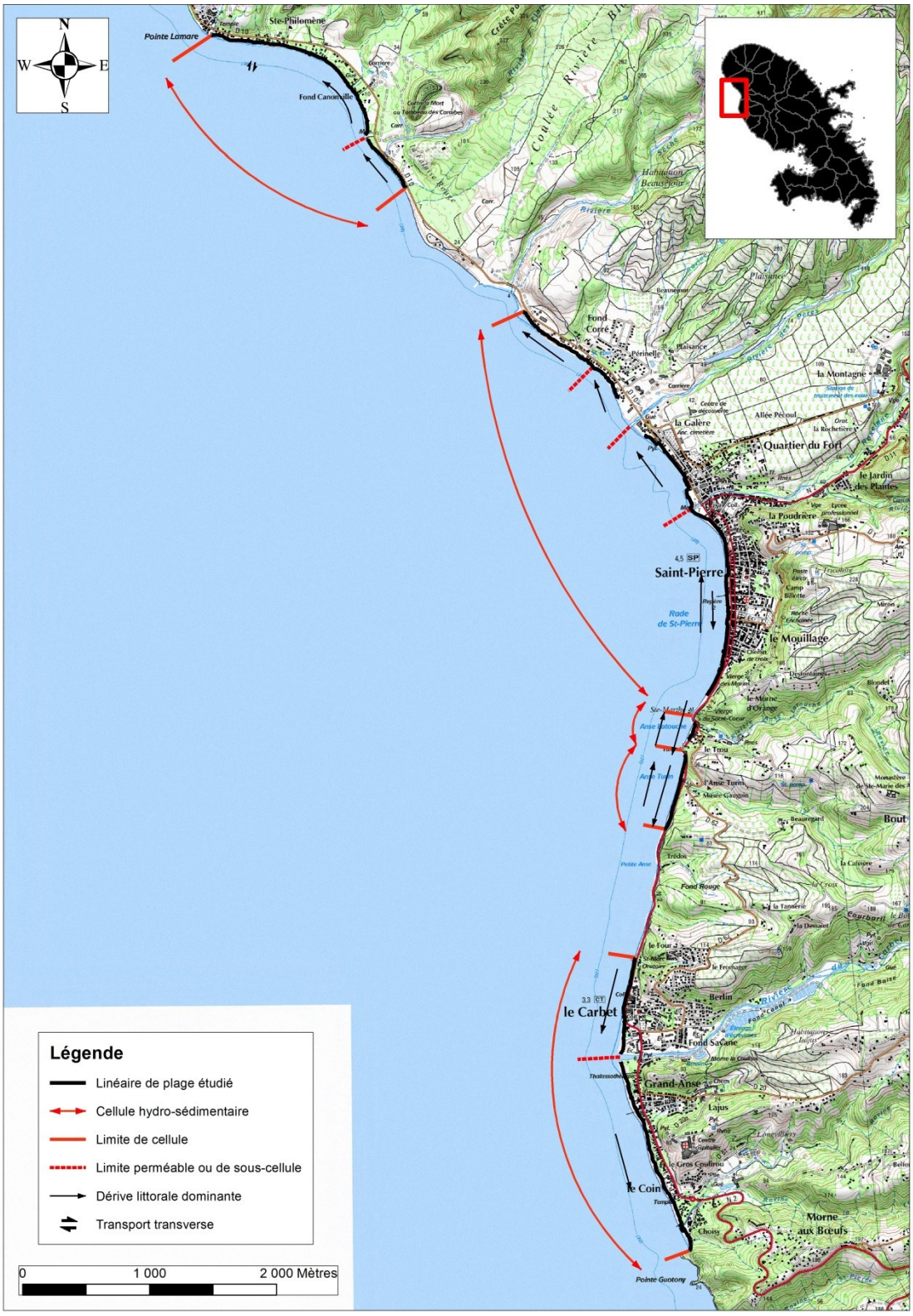
	Pour un vent 40°- 120°				Pour un vent 0-40°			
	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dp (°)	Disp (°)
C1	0.2	2.6	165	24.3	0.2	2.2	325	19.8
C2	0.2	2.6	165	27.6	0.2	2.0	325	21.4
C3	0.3	2.9	165	41.9	0.3	10.2	325	24.7
C4	0.3	13.6	175	46.4	0.2	13.6	315	42.8
C5	0.3	3.2	165	36.0	0.3	2.6	335	24.7

L'intensité et la direction du vent conditionnent fortement la direction de provenance des vagues.

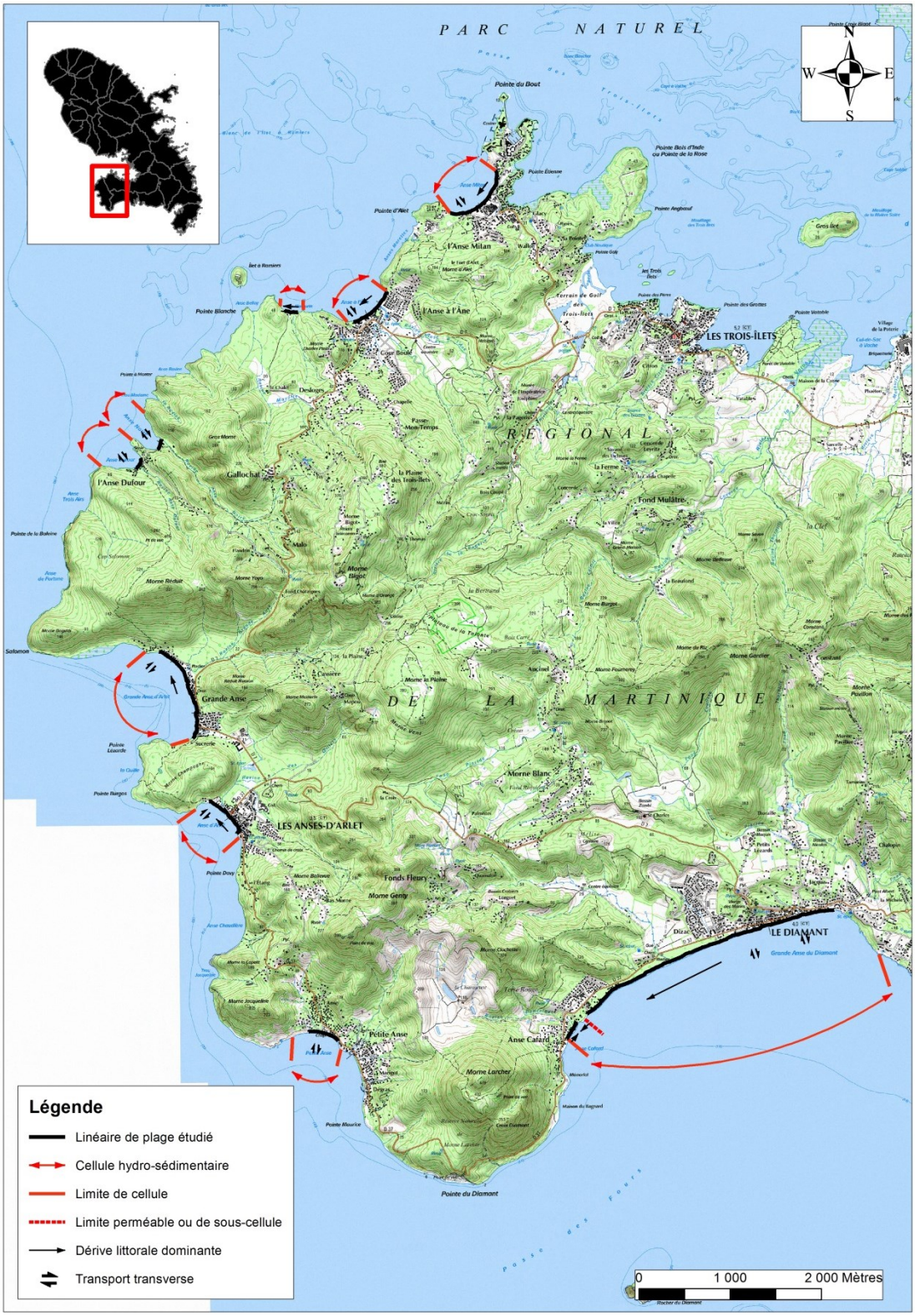
Annexe 2

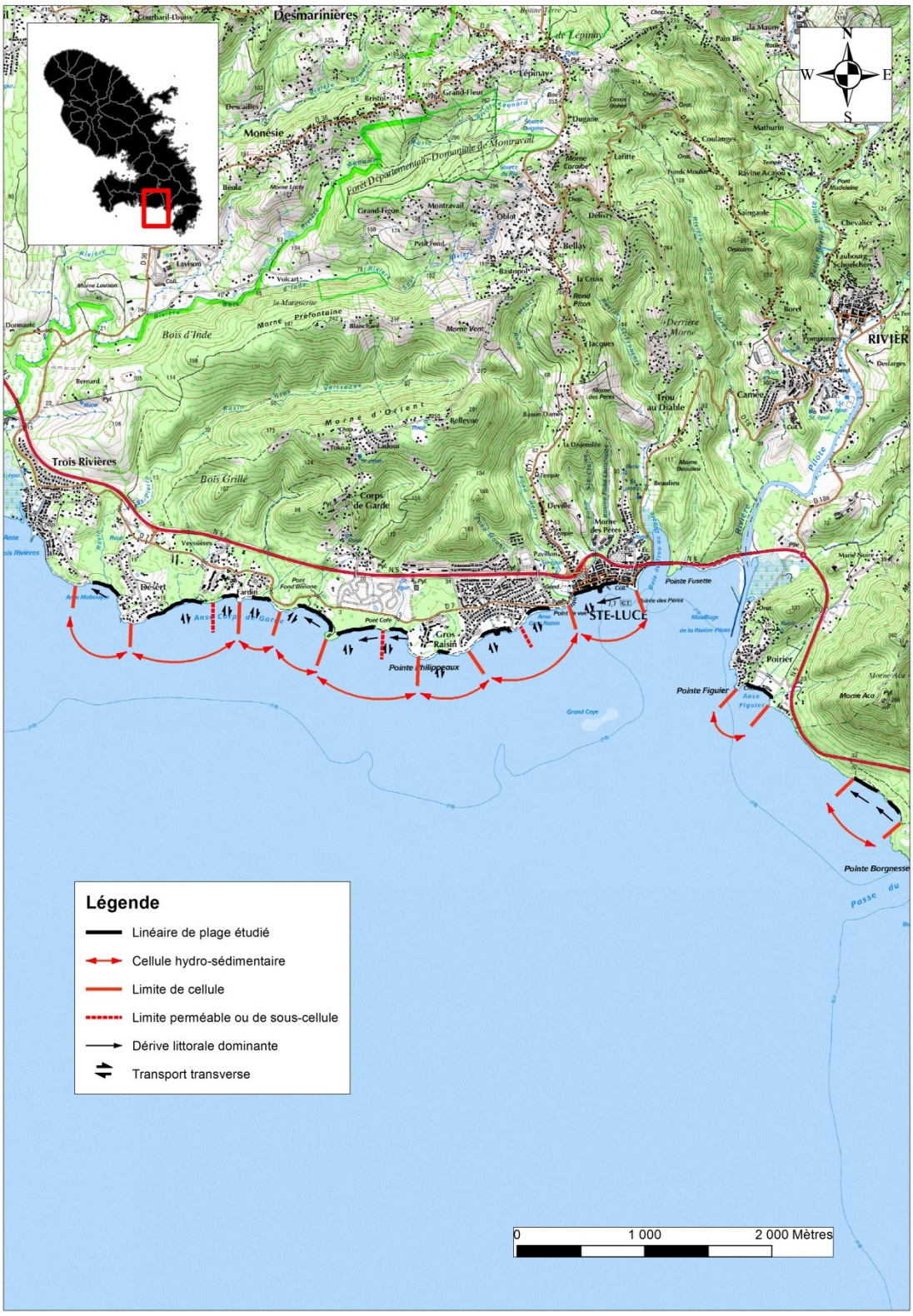
Cellules hydro-sédimentaires du littoral Martiniquais


Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
N
W
E
S
0
1 000
2 000 Mètres
Cap St-Martin
Anse Dufour
Anse Coupe
Anse des Salines
Anse la Celle
Anse Couleuvre
Anse Céron
Ilet la Perle
le Trou Anaconde
Habitation Céron
Morne Sibérie
Piton Pierreux
Piton Mont Conil
Morne Ste-Croix
Crête Citron
la Marry
Grand Repos
la Garonne
Grand-Case
l'Anse Belleville
les Abymes
le Prêcheur
Quartier du Cimetière
la Charmeuse
Pointe Lamare

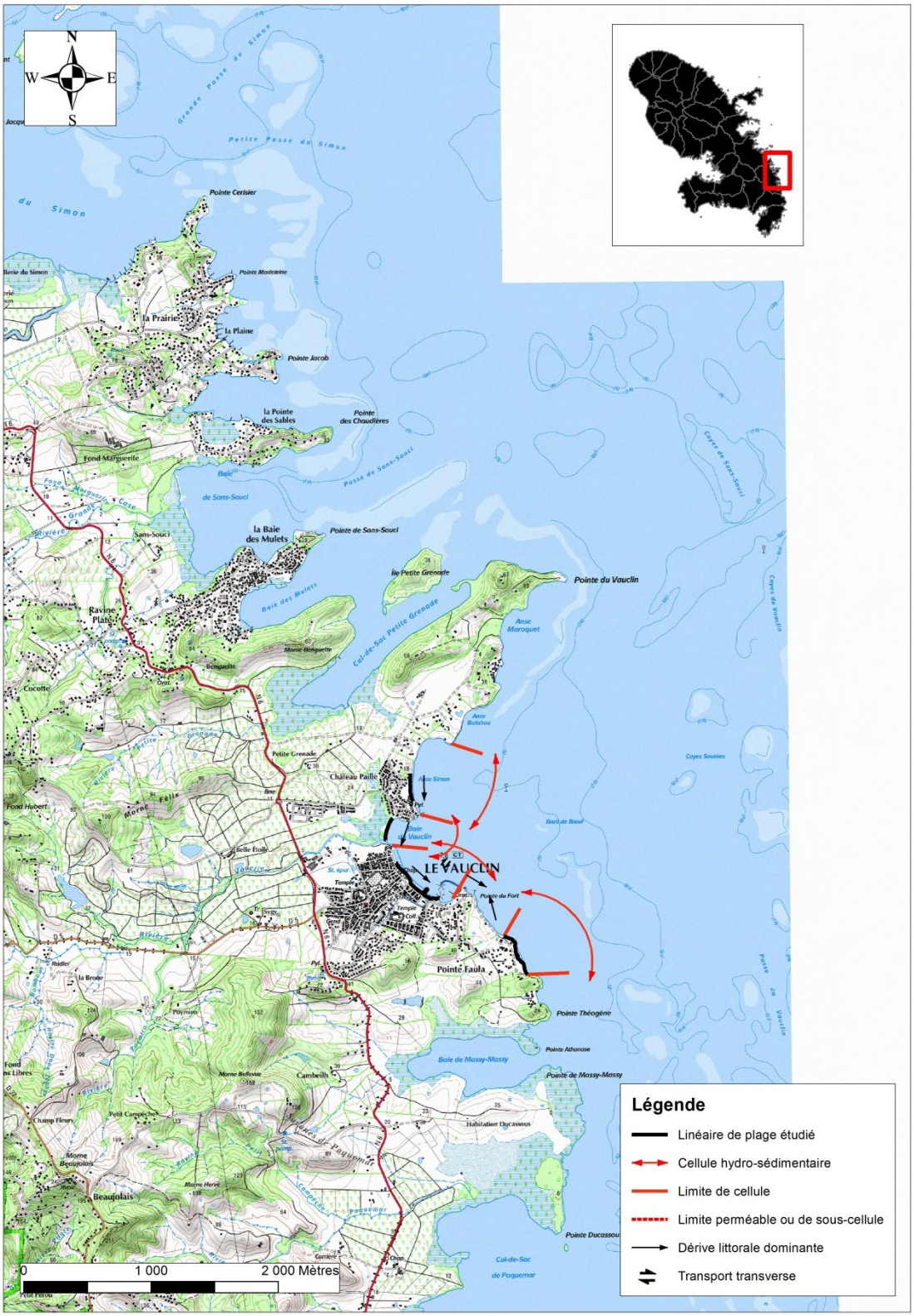

N
W
E
S
Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres
Pointe Lamare
Ste-Philomène
Fond Canonville
Fond Corré
Saint-Pierre
Rade de St-Pierre
le Mouillage
le Carbet
Grand-Anse
Pointe Guotony
Quartier du Fort
la Montagne
Bout

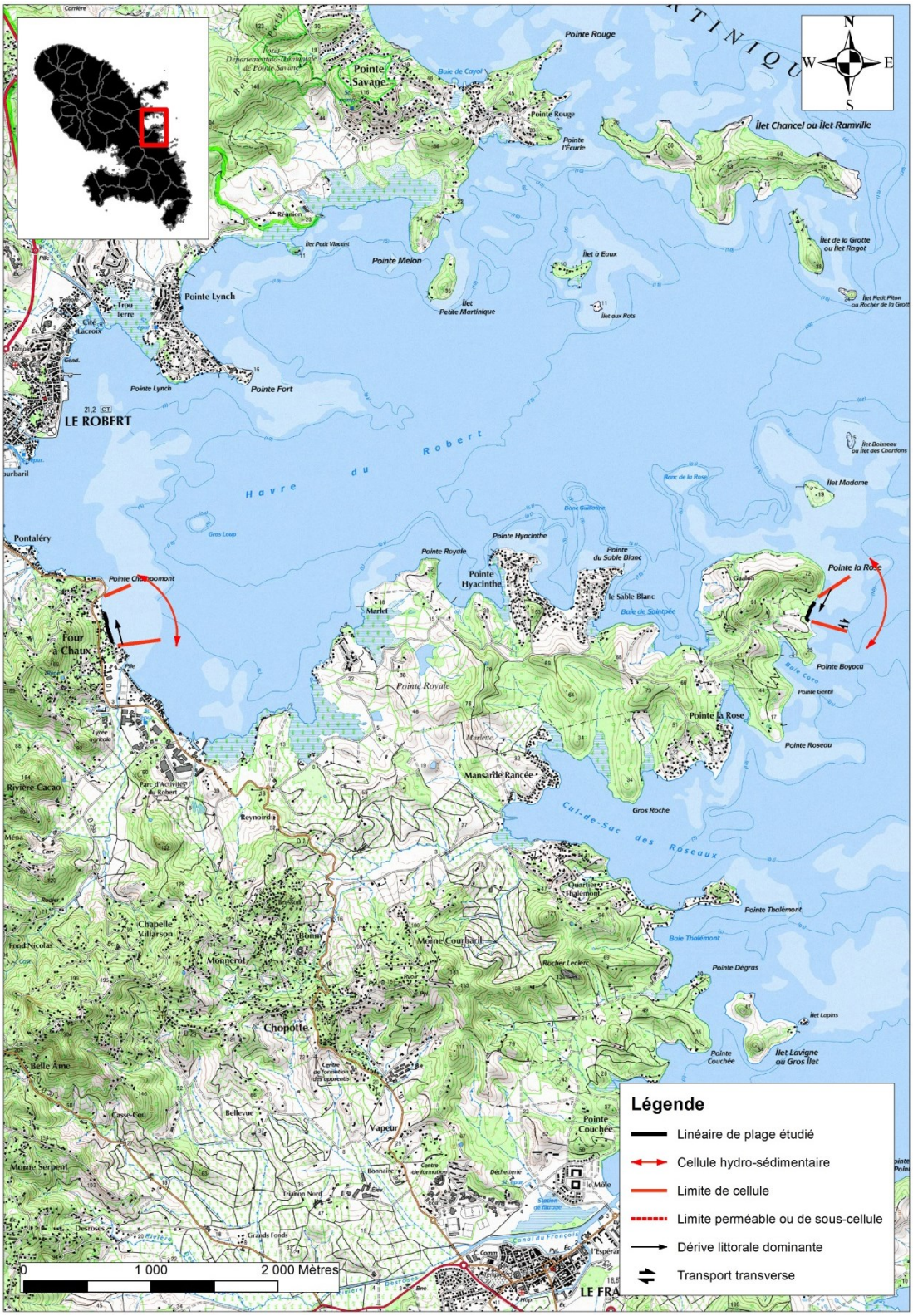
N
W
E
S
Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres

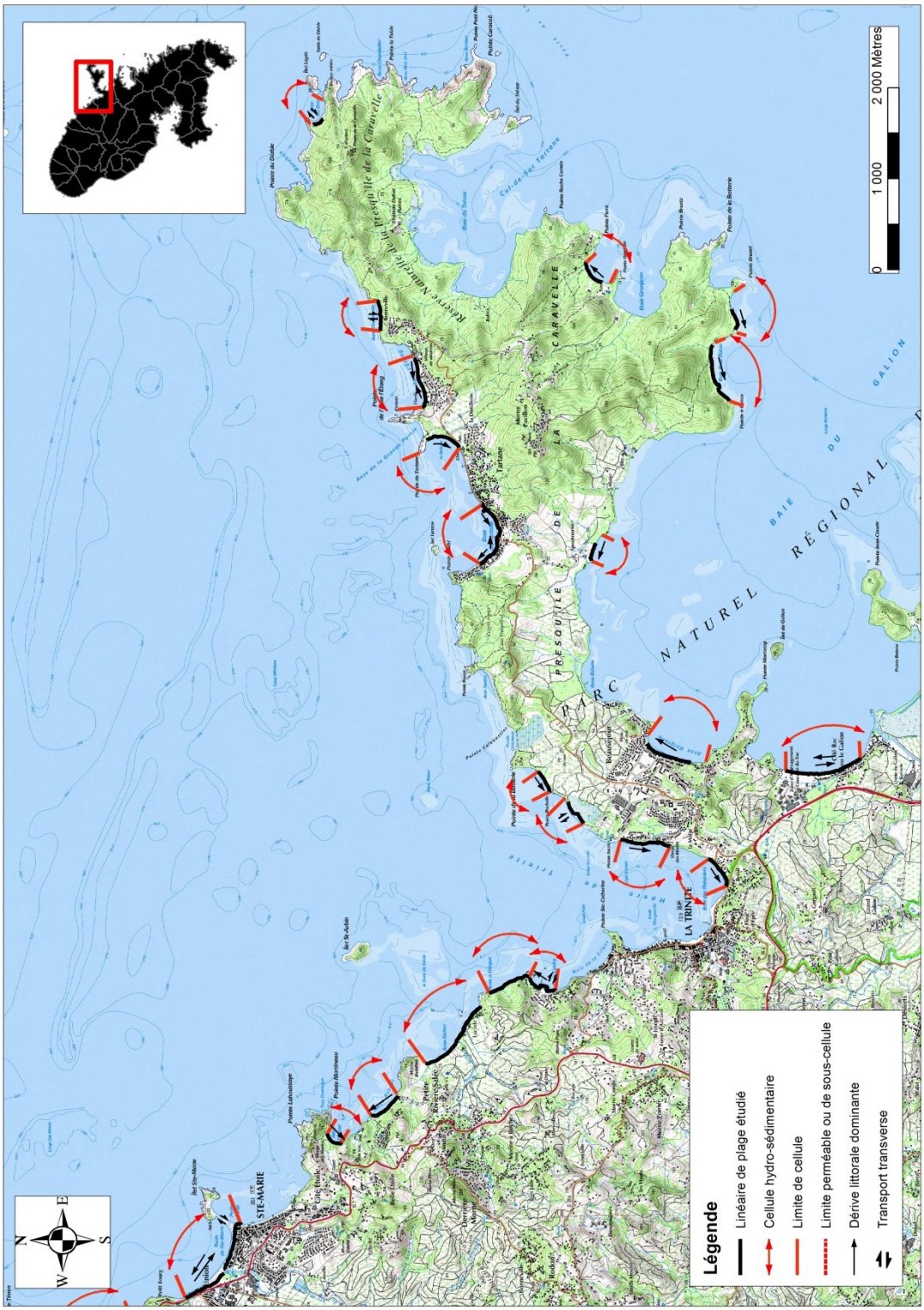

PARC NATUREL
RÉGIONAL
DE LA MARTINIQUE
N
W
E
S
Pointe du Bout
Pointe d'Arlet
l'Anse Milan
l'Anse à l'Âne
LES TROIS-ÎLETS
l'Anse Dufour
Gallochat
Fond Mulâtre
Grande Anse
LES ANSES-D'ARLET
Morne Blanc
Fonds Fleury
LE DIAMANT
Petite Anse
Anse Cafard
Morne Larcher
Pointe du Diamant
Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres

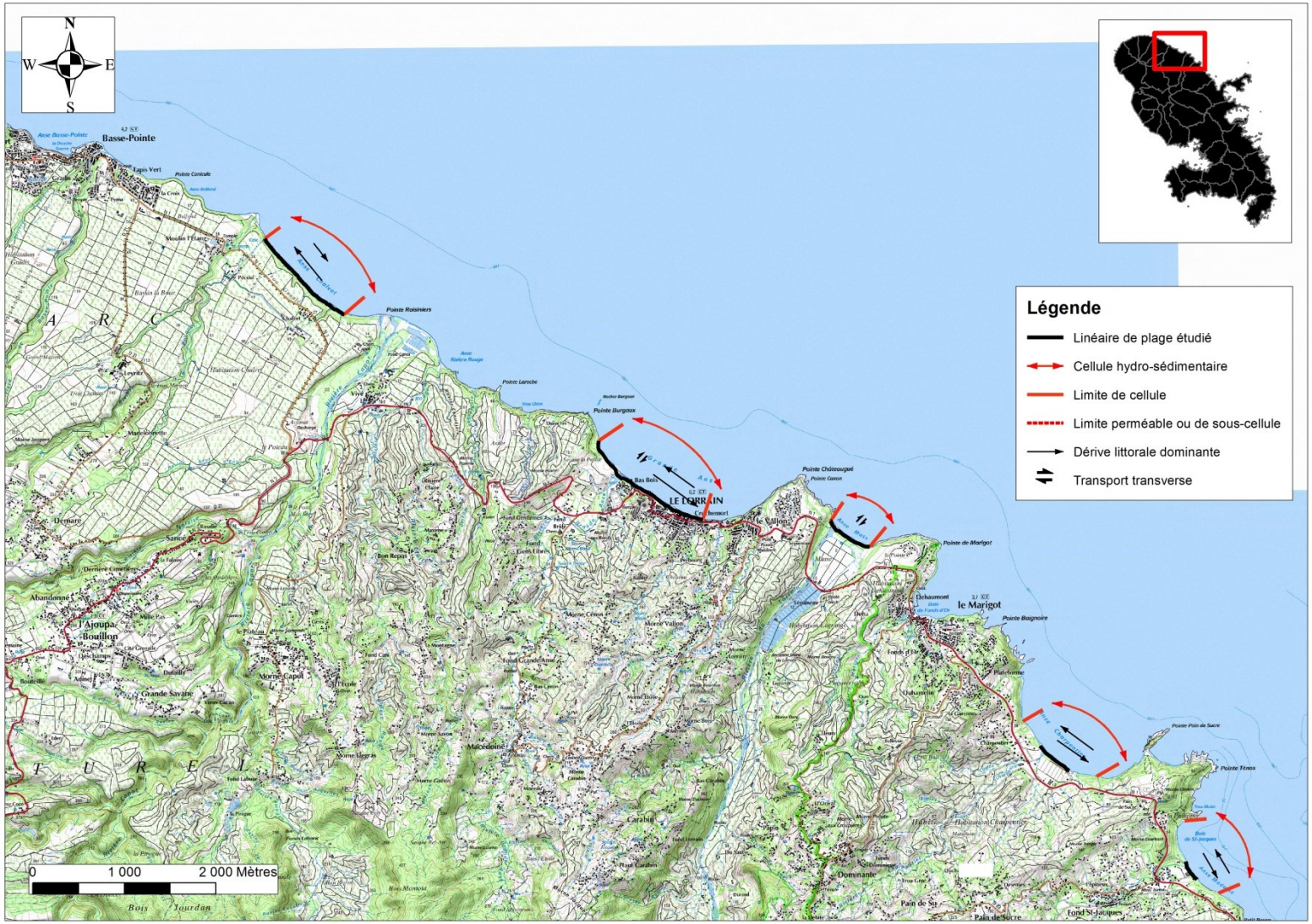

Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres
N
S
W
E
Desmarinières
Monésie
Trois Rivières
Bois d'Inde
Bois Grillé
Corps de Garde
Désert
Jardin
Gros Raisin
Pointe Philippeaux
STE-LUCE
Pointe Fusette
Pointe Figuier
Pointe Borgnesse
RIVIER
Trou au Diable
Poirier
Morne Aca
Grand Caye
Passe du

N
W
E
S
LA TRINITE
LE MARIN
STE-ANNE
Domaine du Grand Macabou
Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres


N
W
E
S
Pointe Cerisier
Pointe Madeleine
la Prairie
la Plaine
Pointe Jacob
la Pointe des Sables
Pointe des Chaudières
Fond Marguerite
Baie de Sans-Souci
Pointe de Sans-Souci
la Baie des Mulets
Sans-Souci
Ravine Plate
Cocotte
Monte Benguette
Benguette
Ile Petite Grenade
Pointe du Vauclin
Anse Maroquet
Cul-de-Sac Petite Grenade
Petite Grenade
Château Paille
Fond Hubert
Morne Felix
Belle Etoile
LE VAUCLIN
Pointe du Fort
Pointe Faula
la Broue
Poyemin
Pointe Théogène
Pointe Adhanase
Baie de Massy-Massy
Pointe de Massy-Massy
Morne Bellevue
Cambeilh
Habitation Ducassous
Petit Campêche
Champ Fleuri
Morne Beaujolais
Beaujolais
Morne Hervé
Pointe Ducassou
Cul-de-Sac de Paquemar
0
1 000
2 000 Mètres
Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse


Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres
N
S
W
E
LE ROBERT
LE FRA
Pointe Rouge
Pointe Savane
Pointe Lynch
Pointe Fort
Pointe Melon
Pontaléry
Pointe Hyacinthe
Pointe Royale
Pointe la Rose
Pointe Boyoca
Pointe Thalémont
Pointe Dégras
Pointe Couchée
Mansarde Rancée
Gros Roche
Chopotte
Monnerot
Chapelle Villarson
Rivière Cacao
Belle Âme
Monte Serpent
Vapeur
Îlet Chancel ou Îlet Ramville
Îlet Petite Martinique
Îlet Madame
Îlet Lavigne ou Gros Îlet
Havre du Robert
Cul-de-Sac des Roseaux


Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres
N
E
S
W
PARC NATUREL RÉGIONAL
PRESQU'ILE DE LA CARAVELLE
Réserve Naturelle de la Presqu'île de la Caravelle
BAIE DU GALION
Cap de Sar Tortone
Baie de Tartane
Tartane
Pointe du Diable
Pointe Pinel
Pointe Caracoli
Pointe de la Batterie
Pointe Borgnesse
Pointe Jean-Claude
Pointe Cassarot
Pointe Sainte-Catherine
Pointe Marin
Pointe Lahoussaye
Pointe Marchand
Pointe Martineau
Pointe Rivière Salée
Pointe Rodrigue
Pointe Morne Rouge
Pointe Borgnesse
Pointe Bruzat
Pointe Faula
Pointe Roche Corsse
Pointe Fond Rose
Pointe Morne Rouge
Pointe Jean-Claude
Pointe Marin
Pointe Cassarot
Pointe Sainte-Catherine
Pointe Lahoussaye


N
W
E
S
Légende
Linéaire de plage étudié
Cellule hydro-sédimentaire
Limite de cellule
Limite perméable ou de sous-cellule
Dérive littorale dominante
Transport transverse
0
1 000
2 000 Mètres
Basse-Pointe
Pointe Roisiniers
Pointe Larroche
Pointe Burgaux
Pointe Châteaugué
Pointe Gamon
LE LORRAIN
le Callone
Pointe de Marigot
le Marigot
Pointe Baignoire
Pointe Poin de Sucre
Pointe Ténos
Bouillon
Macédoine
Carabin
Dominante
Pain de Sucre
Fond St-Jacques
A R C
T U R E L

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - **www.brgm.fr**

Direction régionale de Martinique
4 lot. Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 – Fort de France
Tél. : 05 96 71 17 70