



DEPARTEMENT DE LA REUNION
Commune de Petite Ile

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX

« *Submersion marine et recul du trait de côte* »

NOTE DE PRESENTATION

Février 2024

***Consultation des personnes
publiques associées***



**PRÉFET
DE LA RÉGION
RÉUNION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement général sur les limites d'étude du document PPR

Les débats soulevés pendant et après les enquêtes publiques sur les premiers PPR réalisés à La Réunion ont amené à rédiger cet avertissement général mettant l'accent particulièrement sur les limites d'étude des documents.

Le terme de « risques naturels » communément employé dans des contextes très variés, est largement popularisé par les médias. Ce terme est pourtant souvent utilisé de manière impropre, et cela peut constituer une source de confusion. Il convient donc de préciser tout d'abord que le risque résulte de la conjonction de l'aléa (phénomène de mouvements de terrain, inondations, submersion, érosion, ou autre) et de la vulnérabilité (présence d'enjeux).

Le présent **Plan de Prévention des Risques Littoraux** prend en compte le risque « submersion marine » et le risque « recul du trait de côte » pour lesquels l'état des connaissances était suffisant pour pouvoir formuler des prescriptions réglementaires détaillées.

Ce document a été établi dans une logique de prévention (et non d'exposition) en s'appuyant sur les connaissances disponibles. Ainsi, le PPRL a été dressé au regard des risques recensés dans les études antérieures à son établissement. Le classement réglementaire rouge/bleu ne tient pas compte dans sa cartographie des travaux de protection à venir.

A partir des données existantes sur le plan cartographique, des zonages réglementaires avec les interdictions et les prescriptions correspondantes ont été établis afin de constituer la servitude d'utilité publique.

Le présent PPRL a vocation dans l'avenir à évoluer en fonction notamment d'une plus grande connaissance des phénomènes naturels et des travaux de protection qui seraient réalisés dans les secteurs exposés. Il constitue une première étape répondant à des enjeux de prévention.

Sommaire

1. Introduction	10
1.1 Organisation de la gestion des risques.....	10
1.2 Prévention des risques naturels	10
1.3 Plan de prevention des risques (PPR) naturels	12
1.4 Catastrophes naturelles majeures à La Réunion	12
2. Présentation du PPR	15
2.1 Contexte réglementaire du PPR.....	15
2.2 Procédure réglementaire	16
2.2.1. Secteurs géographiques concernés	16
2.2.2. État des démarches menées.....	16
2.3 Assurances et infractions au PPR.....	18
2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur.....	18
2.3.2. Infractions au PPR et sanctions	20
2.4 Expropriation et Mesure de sauvegarde	21
2.5 Responsabilités	21
2.5.1. Etablissement du PPR	21
2.5.2. Autorisation d'occuper le sol.....	22
3. Présentation de la commune	23
3.1 Contexte de la zone d'étude.....	23
3.1.1. Situation géographique	23
3.1.2. Contexte géomorphologique.....	24
3.1.3. Contexte géologique.....	25
3.1.4. Réseau hydrographique.....	29
3.1.5. Littoral.....	31
3.1.6. Contexte climatique.....	34
3.2 Enjeux et vulnérabilité	41
4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels.....	47
4.1 Phénomènes historiques	47
4.2 Arrêtés de catastrophes naturelles	48
4.3 Caractérisation des aléas littoraux	49
4.3.1. Aléa recul du trait de côte (RTC)	49
4.3.2. Submersion marine	54
5. Caractérisation et cartographie des aléas	59
5.1 Définitions et notions générales.....	59
5.2 Aléa recul du trait de côte.....	59
5.2.1. Cadre méthodologique national.....	59
5.2.2. Estimation de l'aléa recul du trait de côte.....	60
5.2.3. Zonage de l'aléa recul du trait de côte	65
5.3 Aléa submersion marine	70

5.3.1.	Cadre méthodologique national	70
5.3.2.	Méthodologie et scénarios	72
5.3.3.	Modélisation des submersions marines de référence	74
5.3.4.	Résultat des simulations 1D des houles cycloniques de référence à Petite-Île	81
5.3.5.	Données historiques et validation	82
5.3.6.	Zonage cartographique de l'aléa submersion marine	82
6.	<i>Elaboration du zonage réglementaire</i>	87
6.1.	Méthodologie	87
6.1.1.	Les espaces urbanisés et non-urbanisés.....	87
6.1.2.	La submersion marine	88
6.1.3.	Le recul du trait de côte.....	90
6.2.	Traduction réglementaire des deux aleas	90
7.	<i>Bilan de la concertation</i>	93
8.	<i>Lexique des sigles et termes techniques</i>	95
9.	<i>Principaux textes officiels</i>	99
9.1.	Législation - Réglementation.....	99
9.2.	Principales circulaires	99
9.3.	Publication de guides.....	100
10.	<i>Bibliographie</i>	101

Liste des figures

Figure 1 - Délimitation du territoire communal de Petite-Île (Fond ©IGN scan100®-2010).....	23
Figure 2 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de la commune de Petite-Île (source : ©BRGM-Université de la Réunion 2006, fond SHOM /IGN Litto3D® 2011).....	26
Figure 3 - Perspective morpho-géologique schématique de La Réunion avec localisation de la commune de Petite-Île en rouge (modifié, Raunet, 1991).....	27
Figure 4 - Carte morpho-pédologique (source : ©CIRAD (Raunet, 1991), fond ©IGN scan100® - 2010, fond SHOM /IGN Litto3D®).....	28
Figure 5 - Réseau hydrographique de Petite-Île (BDtopo2014®, fond SHOM /IGN Litto3D®).....	30
Figure 6 - Littoral de Petite-Île - Côte rocheuse basse (Fond : Ortho 2017 IGN).....	32
Figure 7 - Littoral de Petite-Île – Plage (Fond : Ortho 2017 IGN).....	32
Figure 8 - Littoral de Petite-Île – Pic rocheux (Fond : Ortho 2017 IGN).....	33
Figure 9 - Littoral de Petite-Île – Falaises (Fond : Ortho 2017 IGN).....	33
Figure 10 - Types de côtes sur le littoral de Petite-Île (©IGN Scan25® - 2015, De La Torre Y. et al., 2004).	34
Figure 11 - Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (©Météo France).....	35
Figure 12 - Zone pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010).....	35
Figure 13 - Localisation des stations météo à Petite-Île (©IGN Scan100® - 2010).....	36
Figure 14 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France) L'œil passe à peine à 30 km des côtes, le scénario est donc majorant puisque la côte Nord de l'île passe dans le rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) excèdera largement les 200 km/h et les vagues dépasseront les 15 m par endroit.....	39
Figure 15 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008).....	40
Figure 16 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).....	41
Figure 17 – Graphique d'évolution de la population de la commune de Petite-Île.....	42
Figure 18 - Extrait de la carte des enjeux de la commune de Petite-Île (cf. Annexe 5).....	43
Figure 19 - Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012).....	50
Figure 20 - Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012).....	51
Figure 21 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012).....	51
Figure 22 - Les manifestations du recul des côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012).....	52

Figure 23 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012).....	53
Figure 24 : front d'érosion au niveaux de la plage végétalisée (BRGM, 2022)	54
Figure 25 : Beachrock affleurant à Grande Anse (BRGM, 2020)	54
Figure 26 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).....	55
Figure 27 - Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)	56
Figure 28 - Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois, 2015)	57
Figure 29 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)	57
Figure 30 - Exemple de définition du trait de côte avec la limite de végétation et avec la rupture de pente.....	62
Figure 31 - Implantation des profils à Petite-Île - Fond orthophotographique ©IGN, 2017.....	63
Figure 32 - Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009).....	63
Figure 33 - Exemple d'artefact en couleurs les différents traits de côte historiques (Haut de plage) - Fond orthophotographique ©IGN, 2017	64
Figure 34 - Extrait cartographique de l'annexe 1 du dossier PPRL de Petite-Île : Carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte pour les secteurs de Anse les bas, Plage de Grande Anse et du pic rocheux.....	65
Figure 35 : Rupture de pente mise en évidence à partir du MNT Litto3D de l'IGN, utilisée comme trait de côte de référence pour la projection du Lr (2017)	66
Figure 36 - Extrait cartographique de l'aléa recul du trait de côte sur le secteur de n°4 (fond : orthophotographie, IGN 2017).....	68
Figure 37 - Extrait cartographique de la jonction de l'aléa recul du trait de côte entre le secteur 3 et le secteur 4 (fond : orthophotographie, IGN 2017)	68
Figure 38 – Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur le secteur de Cap Jaune (cf. Annexe 2)	70
Figure 39 – Comparaison des houles engendrées par différents événements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – Les paramètres comparés pour le linéaire côtier de Petite-Île sont dans l'encadré rouge. (Lecacheux et al., 2012).....	73
Figure 40 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2012).....	74
Figure 41 - Principales étapes nécessaires à la construction du MNE (Le Roy et al., 2012)	75

Figure 42 – Localisation du transect de la simulation 1D à Petite-Île (Profil 7) en rouge (Fond SCAN25 ©IGN, 2015).....	77
Figure 43 - Exemple d'un aperçu de la propagation des vagues (Profil 8 St Joseph).....	80
Figure 44 - Profils de plage, setup, Hmin et Hmax avec simulation du cyclone Hollanda + 20 cm profil 7 Petite-Île.....	80
Figure 45 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 7 pour les 2 scénarios pour 30 minutes simulées.....	81
Figure 46 - Extrait de la carte de synthèse de l'historique des dégâts liés à la submersion marine sur la commune de Petite-Île (cf. Annexe 3).....	84
Figure 47 - Extrait de la carte d'aléa submersion marine de la commune de Petite-Île au 1 : 5000	84
Figure 48 - Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Petite-Île	88
Figure 49 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Petite-Île	92

Liste des tableaux

Tableau 1 : Événements historiques majeurs survenus à La Réunion.....	13
Tableau 2 - Tableau récapitulatif des données hydrographiques (source : PPRI de la commune de Petite-Île, Décembre 2003, ©BCEOM).....	31
Tableau 3 - Précipitations journalières décennales et centennales issues du GEDC, 1992 (en mm)	37
Tableau 4 - Cumul de pluie moyen par jours entre 1981 et 2010 (source : Bulletin climatologique 2013 – Météo France).....	37
Tableau 5 - Maximum des précipitations journalières, précipitations annuelles cumulées, nombre de jours dans l'année où les précipitations journalières dépassent 50 mm et événement climatique associé sur la période de 2001 à 2012 observés sur la station de Piton-Bloc.	38
Tableau 6 - Evolution de la population de Petite-Île (source : ©I.N.S.E.E.).....	42
Tableau 7 - Liste des arrêtés de catastrophes naturelles sur la commune de Petite-Île (source : www.prim.net - Portail de la Prévention des Risques majeurs du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. - mise à jour 16/08/2014)	48
Tableau 8 - Liste des cyclones notables (Soler, 1997 et Mayoka, 1998).....	49
Tableau 9 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012).....	53
Tableau 10 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude).....	60

Tableau 11 – Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées	61
Tableau 12 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 1	66
Tableau 13 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 2	67
Tableau 14 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 3	67
Tableau 15 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 4	67
Tableau 16 - Synthèse des résultats de la caractérisation du recul du trait de côte sur Petite-Île ..	69
Tableau 17 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude).....	71
Tableau 18 - Références altimétriques maritimes pour les sites de Saint-Leu et Saint-Pierre : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et Zéro IGN89 (SHOM, 2011).....	75
Tableau 19 - Niveaux marins retenus pour la simulation de submersion	76
Tableau 20 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : caractéristiques des vagues équivalentes au large orthogonales à la côte utilisées en forçage du profil (d'après Lecacheux et al., 2012)	79
Tableau 21 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée du profil de Petite-Île calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour les 2 scénarios (court-terme et long-terme)	79
Tableau 22 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : synthèse des résultats obtenus pour le profil 7 pour chaque scénario.	82
Tableau 23 - Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (Guide PPRL, MEDDTL, 2014)	82
Tableau 24 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés	89
Tableau 25 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés	90
Tableau 26 : Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces non-urbanisés	91
Tableau 27 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés	92

Préambule

Ce dossier est le **Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) « submersion marine et recul du trait de côte » de la commune de Petite-Île**. Il a été établi conformément aux dispositions législatives instituées par la loi « Barnier » n° 95-101 du 2 février 1995 complétée par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 (transposée notamment dans les articles L.562.1 à L.562.9 du code de l'environnement) et aux dispositions réglementaires issues du décret n° 95-1089 du 5 octobre 1995 (modifiées par le décret n°2005-4 du 4 Janvier 2005 et le décret n°2012-765 du 28 juin 2012).

Ce dossier comporte plusieurs documents informatifs et réglementaires :

- ✓ les documents informatifs :
 - des cartes de localisation des phénomènes naturels historiques (submersion marine et recul du trait de côte) à l'échelle 1/10 000ème (annexes 1 et 3) ;
 - une cartographie des aléas naturels (submersion marine et recul du trait de côte) à l'échelle du 1/5 000ème sur l'ensemble du linéaire côtier (annexes 2 et 4) ;
 - une cartographie des équipements sensibles (enjeux) de la commune à l'échelle 1/10 000ème (annexe 5) ;
- ✓ les documents réglementaires :
 - la note de présentation, décrivant le territoire de la commune de Petite-Île et les phénomènes naturels qui la concernent, ainsi que les règles méthodologiques adoptées ;
 - une cartographie à l'échelle du 1/5 000ème sur l'ensemble des linéaires côtiers communaux (annexe 6) ;
 - le règlement associé au zonage réglementaire

La loi Barnier inscrit en tête de ses dispositions le principe de prévention. Celui-ci fonde les services instructeurs à engager des PPR sans tarder en s'appuyant sur les connaissances disponibles. En conséquence, la conduite du PPR doit être menée avec pragmatisme, sans rechercher une complexité inutile et avec le souci d'aboutir directement dans la plupart des cas à des propositions de mesures réglementaires.

Extrait de la loi n° 95-101 du 2 février 1995 :

Art 1^{er} – 1-3^e alinéa

« (...) l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable. »

1. Introduction

Les risques naturels (cyclones, submersions, fortes pluies, glissements de terrain) ont marqué l'histoire de La Réunion et la mémoire de nombreux réunionnais. Mais tirer les leçons de l'histoire n'est pas une démarche facile. Ainsi voit-on s'installer de nouvelles constructions et des habitations dans des sites où les risques sont perceptibles et des aménagements se réaliser sans protection et sans souci de l'aggravation des risques qu'ils peuvent provoquer.

Petite-Île, commune peuplée de 12 518 habitants (population recensée par l'INSEE en 2019), est affectée par des phénomènes d'érosion littorale et de submersion marine, comme en témoignent les cartes de phénomènes historiques (annexes 1 et 3), impactant plus ou moins durement les hommes et les activités.

Dans un contexte de développement de l'urbanisation et d'augmentation inhérente de la vulnérabilité, le nombre et la diversité des phénomènes naturels auxquels sont exposés des enjeux importants sur leur territoire communal ont justifié de la part du Service instructeur des PPR à La Réunion (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement ou DEAL), l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques naturels littoraux (« recul du trait de côte et submersion marine ») de la commune de Petite-Île.

1.1 ORGANISATION DE LA GESTION DES RISQUES

La lutte contre les risques naturels s'organise autour de quatre axes très différenciés mais complémentaires :

- l'**information** sur les risques est un droit pour les populations menacées. Cette information est organisée par le préfet et les maires dans les conditions fixées initialement par le décret du 11 octobre 1990 modifié et par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 et désormais codifiées aux articles L. 125-2, L. 125-5 et R. 125-5 et suivants du code de l'Environnement. Ces dispositions prévoient notamment que dans les communes où un plan de prévention des risques naturels a été approuvé, le maire informe la population au moins une fois tous les deux ans par des réunions publiques communales ou tout autre moyen approprié. Cette information est délivrée avec l'assistance des services de l'Etat compétents ;
- la **gestion prévisionnelle des crises** s'appuie sur des systèmes d'alerte et s'organise dans les plans de secours spécialisés mis en œuvre par l'Etat et les collectivités ;
- les **travaux de protection**, à l'initiative des communes ou d'associations, bénéficient de subventions dans le cadre de programmations pluriannuelles ;
- la **prévention** relève des communes qui ont le devoir de prendre en compte les risques connus dans leurs documents d'urbanisme, et de l'Etat qui doit réaliser des Plans de Prévention des Risques (PPR) dans les zones menacées. La prévention des risques permet d'anticiper, et d'éviter les conséquences parfois dramatiques liées aux risques. La prévention peut être considérée comme l'outil le plus efficace pour limiter l'aggravation des risques.

1.2. PREVENTION DES RISQUES NATURELS

La politique de prévention des risques naturels a pris un essor particulier en France en 1994 suite à une succession d'événements catastrophiques ayant affecté depuis 1987 le territoire national. Il est

apparu alors de manière évidente qu'un développement urbain mal maîtrisé pouvait aggraver considérablement les catastrophes, en particulier lorsque les zones exposées sont urbanisées. L'extension urbaine peut même contribuer à les aggraver au travers d'aménagements hydrauliquement non-transparents et pouvant accentuer les effets des submersions marines (notamment en cas de rupture) ou accélérer les processus érosifs. Ces phénomènes sont largement constatés sur l'île de La Réunion qui subit régulièrement les effets dévastateurs des cyclones et houles australes et qui présente de fortes densités urbaines en zone littorale (cf. tableau des événements majeurs historiques présenté en 1.4). Les inondations consécutives à la tempête Xynthia de février 2010 en métropole l'ont également mis en exergue.

La commune de Sainte-Marie est particulièrement concernée par cette politique de prévention car exposée aux aléas liés aux cyclones, recul du trait de côte et submersion marine, elle connaît aussi une évolution croissante de sa démographie et de son économie. Il y a donc nécessité pour la sécurité de la population communale de mettre en place des mesures de prévention efficaces.

Les responsabilités et obligations du maire, en particulier en ce qui concerne l'information préventive des citoyens et les mesures de sauvegarde qui les concernent, sont définies par l'article L.125-2 (extrait) du code de l'environnement :

« L'Etat et les communes exposées à au moins un risque majeur contribuent à l'information prévue au I par la mise à disposition du public des informations dont ils disposent.

I.-Toute personne a un droit à l'information sur les risques majeurs auxquels elle est soumise dans certaines zones du territoire et sur les mesures de sauvegarde qui la concernent. Ce droit s'applique aux risques technologiques et aux risques naturels prévisibles.

II.- Dans les communes exposées à au moins un risque majeur, le maire communique à la population, par tout moyen approprié, les caractéristiques du ou des risques majeurs, les mesures de prévention, les modalités d'alerte et d'organisation des secours et, le cas échéant, celles de sauvegarde, en application de l'article L. 731-3 du code de la sécurité intérieure. Cette communication comprend les garanties prévues à l'article L. 125-1 du code des assurances.

L'exploitant est tenu de participer à l'information générale du public sur les mesures prises aux abords des ouvrages ou installations faisant l'objet d'un plan particulier d'intervention.

Dans les communes exposées à au moins un risque majeur, une information sur les risques et les mesures de sauvegarde est affichée dans certaines catégories de locaux et de terrains, notamment au regard des caractéristiques du risque ou du caractère non permanent de l'occupation des lieux. »

Le code de la sécurité intérieure indique dans son article L.731-3 (protection générale de la population) :

« Le plan communal de sauvegarde prépare la réponse aux situations de crise et regroupe l'ensemble des documents de compétence communale contribuant à l'information préventive et à la protection de la population. Il détermine, en fonction des risques connus, les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des personnes, fixe l'organisation nécessaire à la diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité, recense les moyens disponibles et définit la mise en œuvre des mesures d'accompagnement et de soutien de la population.

La mise en place, l'évaluation régulière et les éventuelles révisions du plan communal de sauvegarde peuvent être assurées par un adjoint au maire ou un conseiller municipal chargé des questions de sécurité civile désigné par le maire ou, à défaut, par le correspondant incendie et secours.

Le plan communal de sauvegarde s'articule avec le plan Orsec mentionné à l'article L. 741-2. Il est obligatoire pour chaque commune : dotée d'un plan de prévention des risques naturels ou miniers prévisibles prescrit ou approuvé, La mise en œuvre des mesures de sauvegarde relève de chaque maire sur le territoire de sa commune. »

1.3. PLAN DE PREVENTION DES RISQUES (PPR) NATURELS

Le nouveau dispositif instauré par la loi « Barnier » du 2 février 1995 donne au préfet la possibilité d'agir rapidement sans ôter aux collectivités leurs responsabilités, ni leurs obligations. Les Plans de Prévention des Risques permettent d'interdire ou de réglementer les constructions et aménagements en situation de risque, ou en situation d'aggraver directement ou indirectement les risques pour l'environnement.

La démarche de mise en place des Plans de Prévention des Risques naturels littoraux a été relancée par le président de la République lors d'une allocution à la Roche-sur-Yon en mars 2010, suite aux effets destructeurs de la tempête Xynthia en métropole. Cette approche est relativement récente à La Réunion.

Sont donc pris en compte dans la présente élaboration du Plan de Prévention des Risques littoraux de la commune de Petite-Île les phénomènes de submersion marine et les phénomènes d'érosion côtière. La submersion marine est un phénomène tempétueux (ce qui exclut le tsunami qui a pour origine un phénomène sismique ou un glissement des fonds marins).

1.4. CATASTROPHES NATURELLES MAJEURES A LA REUNION

1875 Salazie, Grand-Sable : 63 personnes ensevelies par un glissement	Février 1998 Tempête Anacelle : 1 mort ; dégâts importants
Février 1932 Cyclone : 90 morts, plus de 41 000 sinistrés, plus de 100 millions de francs de dégâts	Janvier 2002 Cyclone Dina : 2 morts, dégâts très importants
Janvier 1948 Cyclone : 165 morts ; dégâts énormes	Mars 2006 Tempête tropicale modérée Diwa : 4 morts, pluies importantes
Février 1962 Cyclone Jenny : 36 morts ; dégâts importants	Février 2007 Cyclone Gamède : 2 morts, dégâts importants
Janvier 1966 Cyclone Denise : 3 morts ; dégâts importants	Mai 2007 Violente houle australe impactant le littoral Sud-ouest : 2 morts, dégâts importants dans les ports
Janvier 1980 Tempête Hyacinthe : 25 morts ; 1 milliard de francs de dommages	Janvier 2014 Cyclone Béjisa : 1 mort, 16 blessés, dégâts importants dans l'Ouest

<p style="text-align: center;">Février 1987</p> <p>Tempête Clotilda : 9 morts ; dégâts très importants (109 millions de francs sur St Denis)</p>	<p style="text-align: center;">Janvier 2018</p> <p>Cyclone Berguita : dégâts importants dans le Sud</p>
<p style="text-align: center;">Janvier 1989</p> <p>Cyclone Firinga : 4 morts ; dégâts très importants</p>	<p style="text-align: center;">Avril 2018</p> <p>Tempête Fakir : 2 morts, dégâts importants dans l'Est</p>
<p style="text-align: center;">Janvier 1993</p> <p>Cyclone Colina : 2 morts ; dégâts importants</p>	<p style="text-align: center;">Février 2022</p> <p>Cyclone Batsirai : dégâts importants notamment concernant les cultures agricoles</p>

Tableau 1 : Événements historiques majeurs survenus à La Réunion

2. Présentation du PPR

2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DU PPR

Le Plan de Prévention des Risques est, depuis la loi du 2 février 1995, le seul document de cartographie réglementaire spécifique aux risques naturels. Le contenu du PPR est fixé par l'article 40-1 de la loi du 22 juillet 1987 (modifié par l'article 16 de la loi du 2 février 1995 et transposé notamment dans les articles L.562.1 à L.562.9 du code de l'environnement).

Extrait de l'article L.562.1 du code de l'environnement :

« II.- Ces plans ont pour objet, en tant que de besoin :

- 1°) de délimiter les zones exposées aux risques, en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru, d'y interdire tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle, notamment afin de ne pas aggraver le risque pour les vies humaines ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles, pourraient y être autorisés, prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités ;*
- 2°) de délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des constructions, des ouvrages, des aménagements ou des exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux et y prévoir des mesures d'interdiction ou des prescriptions telles que prévues au 1° ;*
- 3°) de définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises, dans les zones mentionnées au 1° et au 2°, par les collectivités publiques dans le cadre de leurs compétences, ainsi que celles qui peuvent incomber aux particuliers ;*
- 4°) de définir, dans les zones mentionnées au 1° et au 2°, les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des ouvrages, des espaces mis en culture ou plantés existants à la date de l'approbation du plan qui doivent être prises par les propriétaires, exploitants ou utilisateurs.*

III. - La réalisation des mesures prévues aux 3° et 4° peut être rendue obligatoire en fonction de la nature et de l'intensité du risque dans un délai de cinq ans, pouvant être réduit en cas d'urgence. A défaut de mise en conformité dans le délai prescrit, le Préfet peut, après mise en demeure non suivie d'effet, ordonner la réalisation de ces mesures aux frais du propriétaire, de l'exploitant ou de l'utilisateur.

IV. - Les mesures de prévention prévues aux 3° et 4° ci-dessus, concernant les terrains boisés, lorsqu'elles imposent des règles de gestion et d'exploitation forestière ou la réalisation de travaux de prévention concernant les espaces boisés mis à la charge des propriétaires et exploitants forestiers, publics ou privés, sont prises conformément aux dispositions du titre II et livre III et du livre IV du Code Forestier.

V. - Les travaux de prévention imposés en application du 4° à des biens construits ou aménagés conformément aux dispositions du Code de l'Urbanisme avant l'approbation du plan et mis à la charge des propriétaires, exploitants ou utilisateurs ne peuvent porter que sur des aménagements limités. »

Objectif général de l'outil PPR

« Délimiter les zones exposées aux risques naturels (secteurs inconstructibles et ceux soumis à prescriptions), ainsi que définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à y mettre en œuvre, tant par les particuliers que par les collectivités publiques. »

Dans le processus d'élaboration du PPRL, le BRGM a en charge la caractérisation des aléas littoraux ainsi que la cartographie des enjeux associés. L'Etat a en charge l'élaboration de la stratégie de zonage réglementaire et le règlement lui-même.

L'Etat est responsable de l'élaboration et de la mise en application du PPR. Le préfet approuve le document, après avis notamment des conseils municipaux et communautaires concernés et sur la base des apports citoyens lors de l'enquête publique.

Le PPR vaut servitude d'utilité publique. Il est annexé au Plan Local d'Urbanisme, conformément à l'article L.126-1 du Code de l'Urbanisme.

Le PPR approuvé par arrêté préfectoral, après enquête publique, constitue une servitude d'utilité publique (article L.562-4 du Code de l'Environnement). Les collectivités publiques ont l'obligation, dès lors que le PPR vaut servitude d'utilité publique, de l'annexer au PLU (L.153-60 du code de l'urbanisme).

Le PPR peut être modifié, dès lors que la connaissance des risques a évolué et permet d'établir de nouveaux zonages réglementaires.

2.2. PROCEDURE REGLEMENTAIRE

2.2.1. Secteurs géographiques concernés

La procédure réglementaire est définie par les articles R.562-1 à R.562-9 du code de l'environnement. Le point de départ de la présente procédure d'élaboration du PPR est l'arrêté préfectoral de prescription n° 2015-1088/SG/DRCTCV en date du 25 juin 2015.

Cet arrêté précise dans son article 1 que le périmètre mis à l'étude concerne l'ensemble du territoire de la commune de Petite-Île, et que les risques relatifs aux phénomènes de recul du trait de côte et de submersion marine sont pris en compte.

2.2.2. État des démarches menées

Le projet de Plan de Prévention des Risques est élaboré par les services de l'Etat, en l'occurrence pour l'île de La Réunion, la Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de La Réunion (DEAL). Les principales étapes d'élaboration du PPR ont été les suivantes :

- 16 avril 2013 : Présentation en sous-préfecture de la méthodologie de caractérisation des aléas côtiers ainsi que du résultat cartographique en découlant sur le territoire de l'arrondissement sud de La Réunion ;
- 22 juillet 2013 transmission des cartes des aléas littoraux aux services communaux pour avis ;
- 19 mai 2014 : Porter à Connaissance des aléas littoraux ;

- 25 juin 2015 : Prescription de l'élaboration du PPR « recul du trait de côte » et « submersion marine » de Petite-Ile (arrêté n° 2015 – 1088 SG/DRCTCV) ;
- 22 juin 2018 : Prorogation du délai d'approbation du PPR « recul du trait de cote » et « submersion marine » (arrêté n° 1117 SG/DCL/BU) ;
- 17 avril 2023 : réunion de présentation en mairie de la cartographie actualisée des aléas littoraux ;
- 26 mai 2023 : Porter à Connaissance actualisé relatif à l'aléa « recul du trait de cote » ;
- Du 15 juin 2023 au 15 juillet inclus : Concertation avec le public sur le projet de PPRL (cartes d'aléas, zonage réglementaire et projet de règlement) ;
- janvier 2024 : finalisation du projet PPR pour le lancement de la phase de consultation officielle - pièces écrites (présente note, règlement), documents cartographiques (aléas, réglementaire) et annexes.

Après la phase d'élaboration, le dossier est soumis à des consultations officielles conformément à l'article R. 562-7 :

« Le projet de Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles est soumis à l'avis des conseils municipaux des communes et des organes délibérants des établissements publics de coopération intercommunale compétents pour l'élaboration des documents d'urbanisme dont le territoire est couvert en tout ou partie par le plan.

Si le projet de plan contient des mesures de prévention des incendies de forêt ou de leurs effets ou des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde relevant de la compétence des départements et des régions, ces dispositions sont soumises à l'avis des organes délibérants de ces collectivités territoriales. Les services départementaux d'incendie et de secours intéressés sont consultés sur les mesures de prévention des incendies de forêt ou de leurs effets.

Si le projet de plan concerne des terrains agricoles ou forestiers, les dispositions relatives à ces terrains sont soumises à l'avis de la chambre d'agriculture et du « Centre national » de la propriété forestière.

Tout avis demandé en application des trois alinéas ci-dessus qui n'est pas rendu dans un délai de deux mois à compter de la réception de la demande est réputé favorable. »

Un bilan de la concertation est en cours de rédaction et sera joint au dossier d'enquête publique. Ce bilan rappelle quelle a été la concertation menée tout au long des études d'élaboration du projet de PPRL qui s'achève après les consultations officielles.

Après cette phase de consultation, le dossier est soumis à une enquête publique puis approuvé conformément aux articles R. 562-8 et R. 562-9 :

« Art. R. 562-8 Le projet de plan est soumis par le préfet à une enquête publique dans les formes prévues par les articles R. 123-7 à R. 123-23, sous réserve des dispositions des deux alinéas qui suivent.

Les avis recueillis en application des trois premiers alinéas de l'article R. 562-7 sont consignés ou annexés aux registres d'enquête dans les conditions prévues par l'article R. 123-13.

Les maires des communes sur le territoire desquelles le plan doit s'appliquer sont entendus par le commissaire enquêteur ou par la commission d'enquête une fois consigné ou annexé aux registres d'enquête l'avis des conseils municipaux.

Art. R. 562-9 A l'issue des consultations prévues aux articles R. 562-7 et R.5 62-8, le plan, éventuellement modifié, est approuvé par arrêté préfectoral. Cet arrêté fait l'objet d'une mention au recueil des actes administratifs de l'État dans le département ainsi que dans un journal diffusé dans le département. Une copie de l'arrêté est affichée pendant un mois au moins dans chaque mairie et au siège de chaque établissement public de coopération intercommunale compétent pour l'élaboration des documents d'urbanisme sur le territoire desquels le plan est applicable.

Le plan approuvé est tenu à la disposition du public dans ces mairies et aux sièges de ces établissements publics de coopération intercommunale ainsi qu'en préfecture. Cette mesure de publicité fait l'objet d'une mention avec les publications et l'affichage prévus à l'alinéa précédent ».

2.3. ASSURANCES ET INFRACTIONS AU PPR

2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur

La loi du 13 juillet 1982 a institué un régime particulier d'assurance, avec intervention de l'Etat, destiné à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. Ce régime se fonde sur le principe de « la solidarité et l'égalité de tous les Français » devant les charges qui résultent des calamités nationales (Préambule de la Constitution de 1946, repris par celle de 1958).

Les contrats d'assurance garantissant les dommages d'incendie ou les dommages aux biens, ainsi que les dommages aux corps de véhicules terrestre à moteur, ouvrent droit à la garantie contre les catastrophes naturelles (art. L.125.1 du code des assurances).

Cette garantie est étendue aux pertes d'exploitation, si elles sont prévues par le contrat. L'extension de la garantie est couverte par une prime supplémentaire à taux unique.

Toutes les personnes physiques ou morales, autres que l'Etat, peuvent bénéficier de cette garantie, que les praticiens appellent « garantie Cat.Nat. »

Champ d'application de la garantie

La garantie couvrant les dommages occasionnés par une catastrophe naturelle se substitue aux mécanismes classiques d'assurances. Son champ d'application est fixé par l'article 1 de la loi du 13 juillet 1982 :

« Sont considérés comme les effets des catastrophes naturelles, au sens de la présente loi, les dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises. ».

Risques couverts

Il s'agit des dommages matériels résultant des catastrophes naturelles qui ne sont pas habituellement garantis par les règles classiques d'assurances. L'agent naturel doit être la cause déterminante du sinistre et doit, par ailleurs, présenter une intensité anormale.

Deux circulaires (du 27 mars 1984 et du 28 décembre 1992) fixent une liste non exhaustive des événements naturels susceptibles d'être couverts. Elle comprend notamment :

1. les inondations (cours d'eau sortant de leur lit) ;
2. les ruissellements d'eau, de boue ou de lave ;
3. **les glissements ou effondrements de terrain ;**
4. la subsidence (effondrement de terrain consécutif à la baisse de la nappe phréatique) ;
5. les séismes ;
6. **les raz-de-marée (ou submersion marine) ;**
7. les masses de neige ou de glace en mouvement (avalanches, coulées de neige...).

Les trois critères prévus par le texte étant réunis (1. caractère naturel de la cause du dommage 2. anormalité de son intensité 3. mise en œuvre préalable des mesures de prévention), il doit évidemment exister un lien de causalité entre ces trois facteurs.

Avant le 1^{er} janvier 2001, les risques cycloniques liés aux effets du vent étaient couverts par la garantie T.O.C. (Tempête – Ouragans – Cyclones) prévue automatiquement au sein des contrats d'assurance relatifs à la couverture incendie et risques divers aux biens. Avec la loi d'orientation pour l'Outre-mer (n° 2000-1207 du 13 décembre 2000), les effets d'un cyclone pour lequel « les vents maximaux de surface enregistrés ou estimés sur la zone sinistrée ont atteint ou dépassé 145 km/h en moyenne sur 10 mn ou 215 km/h en rafales » seront couverts par le régime catastrophe naturelle. Concrètement, ce régime permettra l'intervention du fonds de garantie des catastrophes naturelles, alimenté par l'Etat, lors de certains événements cycloniques.

Biens garantis

La garantie bénéficie à tous les assurés quel que soit leur degré d'exposition aux risques.

L'assureur a la possibilité de refuser la couverture des catastrophes naturelles aux propriétaires ou exploitants de biens situés dans une zone couverte par un PPR, s'ils ne se sont pas conformés, dans un délai de cinq ans, aux prescriptions imposées par le plan (des travaux d'aménagement peuvent être imposés sous réserve de ne pas excéder 10 % de la valeur vénale du bien). Cette possibilité, prévue par l'article L.125.6 du Code des Assurances, ne peut être mise en œuvre que lors de la conclusion initiale ou du renouvellement du contrat. Evidemment, les assureurs pourront également refuser leur garantie à l'égard des biens et des activités installées postérieurement à la publication d'un PPR sur des terrains classés inconstructibles par ce plan. Le Bureau Central de Tarification (B.C.T.) est saisi des contentieux éventuels.

Les biens garantis sont les meubles et immeubles, assurés contre les dommages incendie ou tous autres dommages, et ayant subi des dommages matériels directs, c'est-à-dire, portant atteinte à la structure ou au contenu de la chose. Sont donc exclues les vies humaines.

Une liste des biens garantis est donnée par la circulaire du 27 mars 1984 qui précise également quels sont les biens susceptibles d'être exclus du régime d'assurance « Cat.Nat », en raison notamment d'autres modalités de couverture.

Etat de catastrophe naturelle

L'état de catastrophe naturelle est constaté par un arrêté interministériel (Ministère de l'Intérieur et Ministère de l'Economie et des Finances). C'est cet arrêté qui permet aux assurés d'être indemnisés au titre de la garantie catastrophe naturelle.

Lorsque survient un événement susceptible de présenter le caractère de catastrophe naturelle, le préfet du département doit adresser un rapport à la Direction de la Sécurité Civile dans le délai d'un mois à compter du début du sinistre.

Avant la signature de l'arrêté, une commission interministérielle, appelée « commission « Cat.Nat », émet un avis consultatif sur l'intensité anormale de l'agent naturel.

Règlement des sinistres

Dans les dix jours suivant la publication au Journal Officiel de l'arrêté interministériel, l'assuré doit déclarer les dommages matériels causés par la catastrophe naturelle. Le délai est de trente jours pour les pertes d'exploitation. L'assureur doit verser l'indemnité dans un délai de trois mois.

Dispositions pour l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles

Par arrêtés du 5 septembre 2000 du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (publiés au journal officiel du 5 septembre 2000), certains articles du code des assurances ont été modifiés pour renforcer le lien entre l'indemnisation des dommages résultant des catastrophes naturelles et les mesures de prévention de ces risques. Les dispositions adoptées ont pour objet d'une part l'augmentation des franchises, et d'autre part leur modulation en fonction de la répétitivité des risques naturels survenus et des mesures de prévention prises tendant à les réduire.

Sur ce dernier point, dans une commune non dotée d'un PPR pour le risque faisant l'objet d'un arrêté portant constatation de l'état de catastrophe naturelle, la franchise est modulée en fonction du nombre d'arrêtés pris pour le même risque à compter du 2 février 1995, selon les modalités suivantes :

- **premier et second arrêtés** : application de la franchise
- **troisième arrêté** : doublement de la franchise applicable
- **quatrième arrêté** : triplement de la franchise applicable
- **cinquième arrêté et arrêtés suivants** : quadruplement de la franchise applicable

Ces mesures cessent de s'appliquer à compter de la prescription d'un PPR pour le risque faisant l'objet de l'arrêté portant constatation de l'état de catastrophes naturelles dans la commune concernée. Elles reprennent leurs effets en l'absence d'approbation du plan précité dans le délai de cinq ans à compter de la prescription correspondante.

2.3.2. Infractions au PPR et sanctions

Toute infraction aux règles définies par le Plan de Prévention des Risques est sanctionnée dans les conditions fixées par l'article 40-5 de la loi du 22 juillet 1987 (modifiée par la loi du 2 février 1995 et transposée notamment dans l'article L.562.5 du code de l'environnement).

Extrait de l'article L.562.5 du code de l'environnement :

« Le fait de construire ou d'aménager un terrain dans une zone interdite par un Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles approuvé ou de ne pas respecter les conditions de réalisation, d'utilisation ou d'exploitation prescrites par ce plan est puni des peines prévues à l'article L.480.4 du Code de l'Urbanisme.

Les dispositions des articles L.461.1, L.480.1, L.480.2, L.480.3, L.480.5 à L.480.9 et L.480.12 et L.480.14 du Code de l'Urbanisme sont également applicables aux infractions visées au premier alinéa du présent article, sous la seule réserve des conditions suivantes :

- 1°) Les infractions sont constatées, en outre, par les fonctionnaires et agents commissionnés à cet effet par l'autorité administrative compétente et assermentés ;*
- 2°) Pour l'application de l'article L.480.5 du code de l'urbanisme, le tribunal statue au vu des observations écrites ou après audition du maire ou du fonctionnaire compétent, même en l'absence d'avis de ces derniers, soit sur la mise en conformité des lieux ou des ouvrages avec les dispositions du plan, soit sur leur rétablissement dans l'état antérieur ;*
- 3°) Le droit de visite prévu à l'article L.461.1 du Code de l'Urbanisme est ouvert aux représentants de l'autorité administrative compétente. »*

2.4. EXPROPRIATION ET MESURE DE SAUVEGARDE

Le PPR n'entraîne aucune mesure d'expropriation. Une procédure d'expropriation indépendante du PPR est prévue par les articles 11 et suivants de la loi du 2 février 1995. Elle vise à régler les situations où le déplacement des populations, dont la vie serait menacée, s'avère le seul moyen de les mettre en sécurité à un coût acceptable. Cette mesure implique une analyse particulière des risques, car la notion de menace grave pour les vies humaines est fondée sur des critères beaucoup plus restrictifs que ceux qui président à la délimitation du zonage PPR, le plus souvent établis sur la constructibilité ou les usages des sols. **Pour cette raison, le classement en zone « rouge » d'un PPR n'est jamais à lui seul un motif d'expropriation.**

Par contre, des mesures de sauvegarde, et notamment des évacuations temporaires, méritent au moins d'être prises dans les plans de gestion des crises des communes pour les secteurs les plus fortement exposés.

2.5. RESPONSABILITES

2.5.1. Etablissement du PPR

C'est le préfet qui élabore le PPR et peut le modifier ou le réviser.

Extrait de l'article L.562.1 du code de l'environnement :

« I.- L'Etat élabore et met en application des plans de prévention des risques naturels prévisibles tels que les inondations, les mouvements de terrain, les avalanches, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les cyclones. »

Extrait de l'article L.562.4.1 du code de l'environnement :

« I. — Le Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles peut être révisé selon les formes de son élaboration. Toutefois, lorsque la révision ne porte que sur une partie du territoire couvert par le plan, la concertation, les consultations et l'enquête publique mentionnées à l'article L. 562-3 sont effectuées dans les seules communes sur le territoire desquelles la révision est prescrite.

II. — Le plan de prévention des risques naturels prévisibles peut également être modifié. La procédure de modification est utilisée à condition que la modification envisagée ne porte pas atteinte à l'économie générale du plan ou à condition que la modification envisagée consiste à abroger les

dispositions relatives au recul du trait de côte de ce plan dans une ou plusieurs communes à la suite de l'entrée en vigueur d'un document d'urbanisme intégrant les dispositions relatives au recul du trait de côte en application du paragraphe 3 de la sous-section 3 de la section 1 du chapitre 1er du titre II du livre 1er du code de l'urbanisme. Le dernier alinéa de l'article L. 562-3 n'est pas applicable à la modification. Au lieu et place de l'enquête publique, le projet de modification et l'exposé de ses motifs sont portés à la connaissance du public en vue de permettre à ce dernier de formuler des observations pendant le délai d'un mois précédant l'approbation par le préfet de la modification. »

2.5.2. Autorisation d'occuper le sol

En l'absence de Plan d'Occupation des Sols (POS) ou de Plan Local d'Urbanisme (PLU), le maire délivre les autorisations au nom de l'Etat (sauf cas particuliers). Si un POS ou un PLU a été approuvé, le maire délivre les autorisations au nom de la commune.

En application de **l'article R.111.2 du Code de l'Urbanisme**, si les constructions sont de nature à porter atteinte à la sécurité publique, l'autorité administrative peut refuser le permis de construire ou l'assortir de prescriptions spéciales. Cette disposition est notamment valable soit en l'absence de PPR, soit encore pour tenir compte de risques qui n'étaient pas pris en compte par le PPR approuvé et dont la connaissance a été acquise ultérieurement.

La responsabilité individuelle du constructeur peut, bien évidemment, être mise en œuvre en cas de contentieux administratif ou pénal, s'il n'a pas sollicité les autorisations de construire ou n'a pas respecté les prescriptions du PPR.

3. Présentation de la commune

3.1. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1. Situation géographique

Localisé au Sud du département, l'îlot de Petite-Île est le seul véritable « satellite » de La Réunion, situé face au village, à une cinquantaine de mètres du littoral. Il est classé Zone d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique et a donné son nom à la commune de Petite-Île.

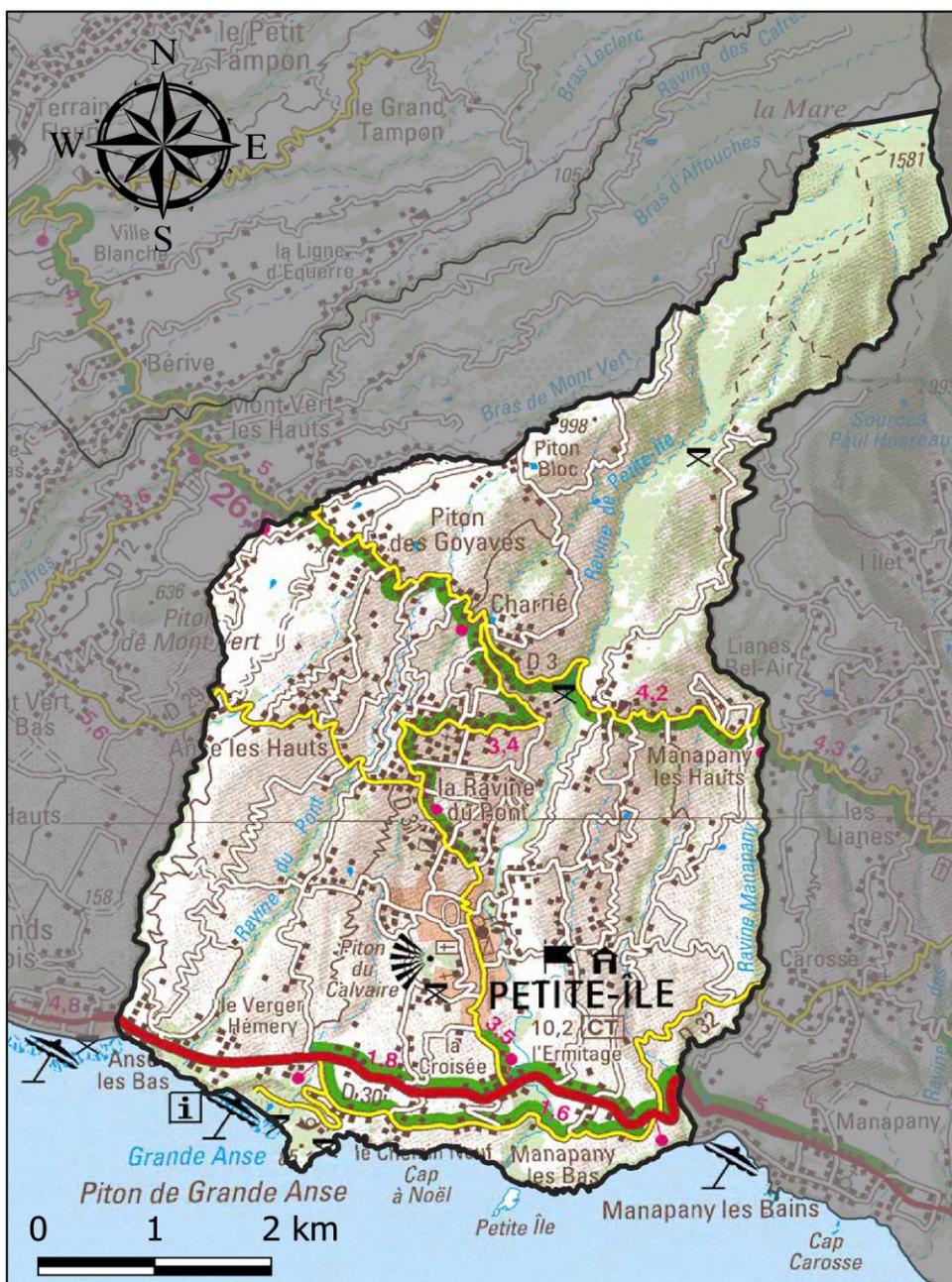


Figure 1 - Délimitation du territoire communal de Petite-Île (Fond ©IGN scan100®-2010)

Le territoire de Petite-Île possède une forme triangulaire avec une largeur avale au niveau de la façade littorale de 5 km et une longueur suivant un axe Nord-Sud Est de 11 km (Figure 1). Situé au large du Cap Fil à 50m de la côte, l'îlot de Petite-Île est un rocher de 300 m de long pour 100 m de large.

La commune est limitrophe avec les communes de Saint-Joseph sur la bordure Est et de Saint-Pierre sur la bordure Ouest. Les limites communales sont essentiellement naturelles, avec :

- au sud, la bordure littorale,
- à l'ouest, la ravine de l'Anse,
- à l'est, la ravine de Manapany,
- au nord-est, la limite du bassin versant de la rivière des Remparts,
- au nord-ouest, la Ravine de Petite-Île.

Petite-Île occupe une superficie de 33,93 km² (3393 hectares) et s'étend sur les pentes les plus externes du Massif du Piton de la Fournaise. Avec sa superficie, Petite-Île représente donc une des plus petites communes de La Réunion (1,35% de la surface totale de l'île).

12 395 habitants avec une densité de population de 365,3 habitants/km² (INSEE 2019) occupe ce territoire. Depuis 1967 jusqu'en 2019, la population de la commune a augmenté d'environ 65%.

Le moteur de l'économie de Petite-Île est principalement le secteur tertiaire avec un pourcentage du 48,4 % suivi par l'agriculture au 16,8 % et l'industrie 8,5 %. Petite-Île est incluse au sein de la Communauté Intercommunale des Villes Solidaires (CIVIS).

Les hauts de Petite-Île sont classés « Cœur du Parc National de La Réunion ». Le littoral est escarpé et sauvage et compte une plage accessible parmi les plus belles de l'île : Grande Anse.

3.1.2. Contexte géomorphologique

De même contexte morphologique que les communes avoisinantes, Petite-Île présente une planèze sur laquelle on observe une grande partie des activités humaines de la commune. Sa forme est héritée des activités du Piton de la Fournaise. Les pentes restent relativement faibles et régulières, hormis aux abords de pitons (piton Calvaire, Piton de Charrié, Piton Bloc où les pentes dépassent les 40%) ou des principales ravines (incisions souvent marquées à subverticales).

Les planèzes sont habitées et cultivées jusqu'à environ 900 m d'altitude. Ces terrains sont incisés par des ravines délimitant des plateaux plus ou moins vastes où les principaux villages et hameaux sont installés. Le centre-ville de Petite-Île s'étend le long de la route départementale 3, épousant les contours de la quasi-totalité du Piton Calvaire. Par ailleurs, on trouve les principaux lieux-dits suivants du Nord vers le Sud :

- Piton Bloc ;
- Piton Goyaves ;
- Charrié ;
- Manapany les Hauts ;
- Ravine du Pont ;
- Anse les Hauts ;

- Manapany les bas.

Piton Goyaves et Ravine du Pont représentent les deux centres secondaires. Manapany les Hauts et toute la zone d'habitat littorale le long des axes RN2 et RD30 sont plutôt des hameaux d'habitat rural.

Les principales ravines présentes dans le territoire communal sont, de l'Ouest à l'Est :

- Ravine de l'Anse ;
- Ravine du Pont ;
- Ravine de Charrié ;
- Ravine des Français ;
- Ravine de Petite-Île ;
- Ravine Manapany.

Dans le détail, on note une certaine récurrence dans la morphologie des ravines. Généralement, elles s'articulent en un bras principal orienté quasiment N-S où plusieurs affluents convergent. Les formes de cours d'eau restent assez variables, longitudinalement et d'un cours d'eau à l'autre : évasées ou encaissées, avec un profil transversal convexe ou concave, (en " V ") ou à fond plat (en " U "). Les facteurs qui conditionnent ces morphologies semblent être le régime hydraulique et la nature des formations géologiques (notamment la présence à plus ou moins grande profondeur de coulées de lave massive résistantes à l'érosion).

3.1.3. Contexte géologique

Le territoire communal de Petite-Île est édifié sur les pentes sud-ouest du massif du Piton de la Fournaise. Il a une forme conique et ses flancs sont inclinés d'une quinzaine de degrés vers la mer.

Le volcan de la Fournaise se construit en permanence grâce à ses laves effusives qui se répandent sur les flancs du volcan de manière conique. Néanmoins, depuis son édification, sa morphologie évolue avec une érosion permanente,

Au droit du territoire communal, les formations volcaniques issues du massif du Piton de la Fournaise font partie pour la plupart du bouclier ancien (450 000 à 150 000 ans). Des formations récentes sont également constatées (< 5000 ans, < 65 000 ans), notamment suite aux éruptions du Piton Calvaire ou d'autres pitons adventifs situés plus en amont.

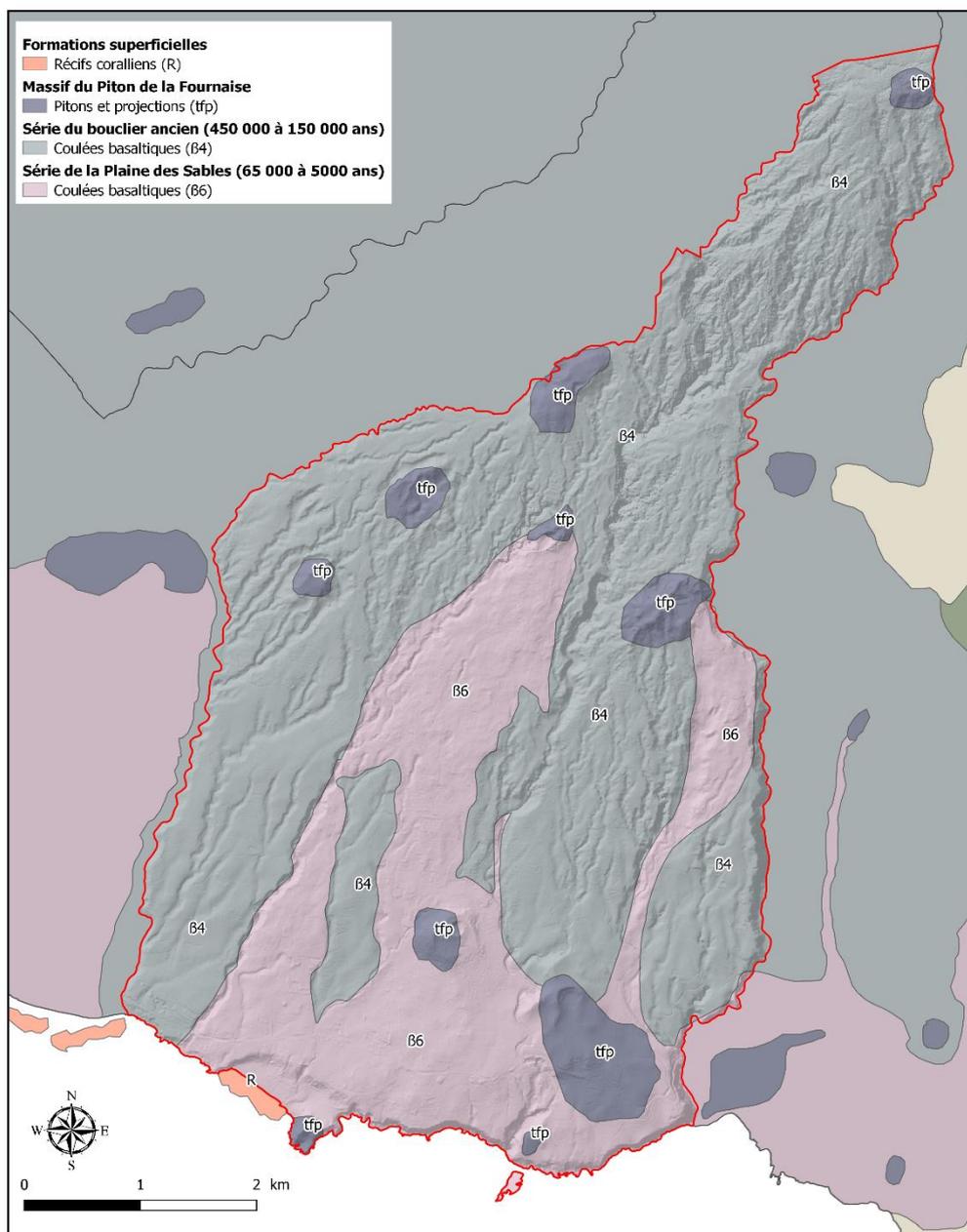


Figure 2 - Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de la commune de Petite-Île (source : ©BRGM-Université de la Réunion 2006, fond SHOM /IGN Litto3D® 2011)

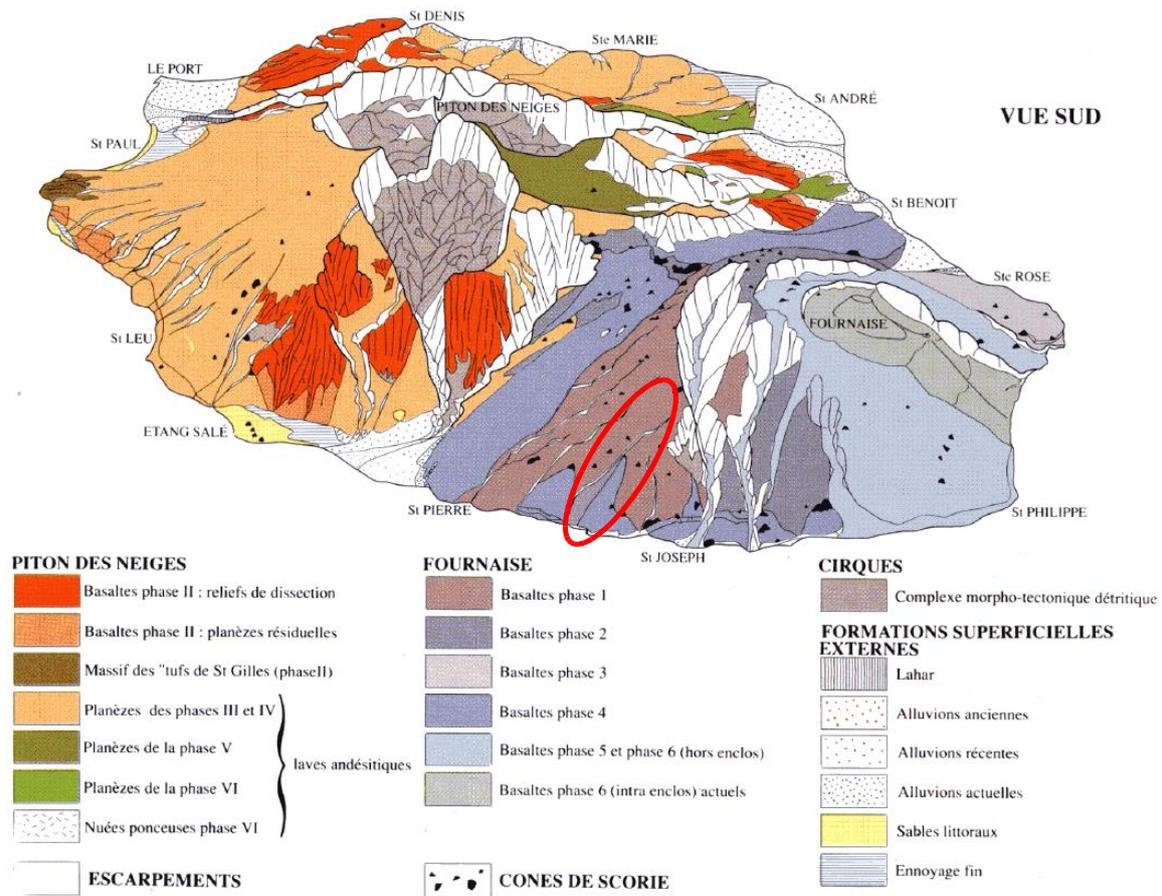


Figure 3 - Perspective morpho-géologique schématique de La Réunion avec localisation de la commune de Petite-Île en rouge (modifié, Raunet, 1991)

Comme le montre la Figure 2 et la Figure 3, les littoraux du secteur d'étude sont formés essentiellement de coulées basaltiques mais aussi de sables.

Les formations volcaniques

- **Les séries récentes : Coulées basaltiques du massif du Piton de la Fournaise (Béta 4 et Béta 6)**

Issue de la Phase III et IV de La Fournaise, elles ont recouvert les terrains plus anciens sur la quasi-totalité des versants. Il s'agit pour l'essentiel, de coulées basaltiques (alternance de basaltes et scories) plus ou moins altérées. Cette altération est de nature argileuse et le paysage est marqué par de nombreux cônes de scories. La classification des coulées basaltiques β_4 et β_6 (Figure 2) marquent différentes phases d'activité du volcan séparées par des périodes de calme :

- Les coulées basaltiques de la série du bouclier ancien du Piton de La Fournaise (β_4 , 450 000 à 150 000 ans)
- Les coulées basaltiques de la série de la Plaine des Sables (β_6 , 65 000 à 5 000 ans)

Durant les phases d'activités volcaniques, des empilements de laves basaltiques et de scories se forment sur plusieurs mètres voire centaines de mètres de hauteur. Suite à certaines éruptions, des effondrements du sommet du massif se produisent laissant dans le paysage des traces géomorphologiques visibles de nos jours (remparts des Sables, remparts de l'Enclos de Fouqué,

etc.). Associés à ces phases majeures, de nombreux puys et fissures fonctionnent non seulement à l'intérieur de la zone effondrée, mais aussi à l'extérieur.

Les périodes de calme, qui succèdent chaque phase d'activité, sont marquées par une altération des terrains et par l'érosion des reliefs de manière plus ou moins intense.

- **Les formations tardives : *Pitons et projections (tfp)***

Les principaux pitons présents sur le territoire communal sont le Piton du Calvaire, le Piton de Grande Anse, le Piton des Goyaves, le Piton Bloc et le Piton de Charrié. A proximité des pitons, on retrouve souvent des projections pyroclastiques telles que des cônes de scories basaltiques et des cendres (lapilli).

Les formations superficielles

Les sols

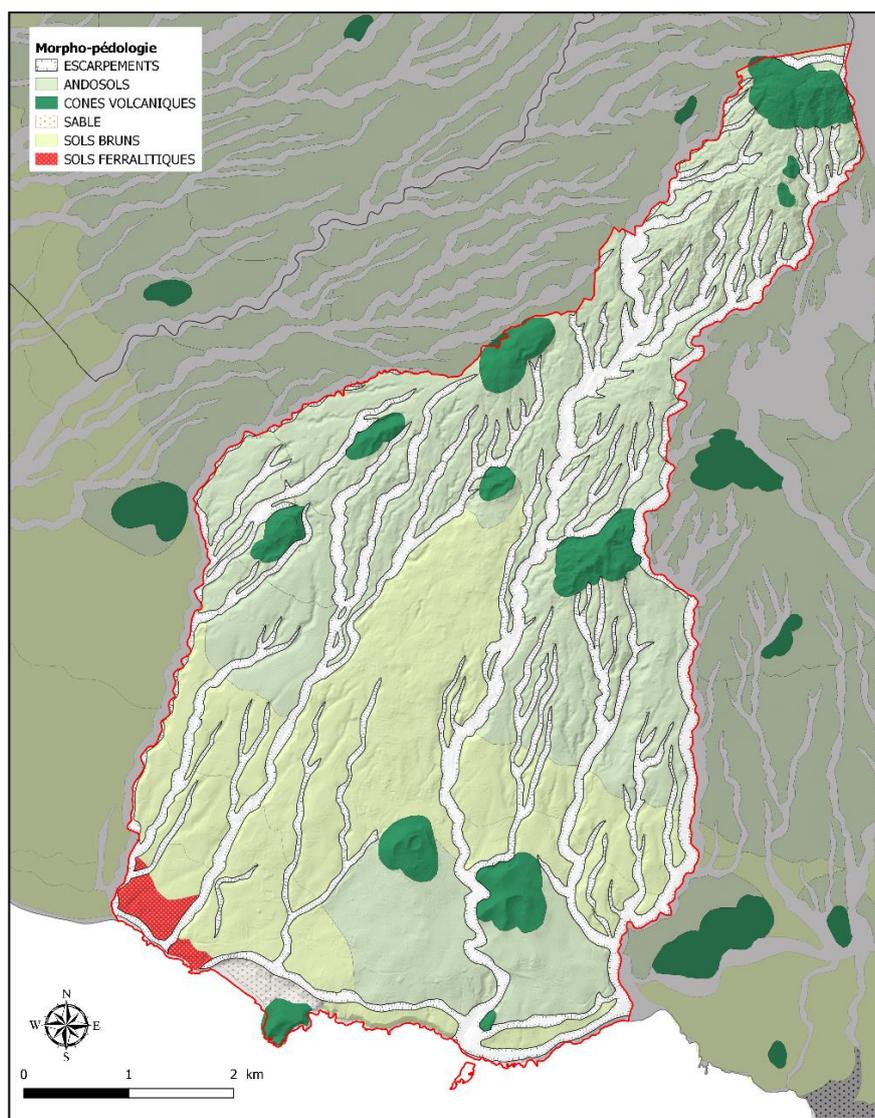


Figure 4 - Carte morpho-pédologique (source : ©CIRAD (Raunet, 1991), fond ©IGN scan100® - 2010, fond SHOM /IGN Litto3D®)

L'ensemble des séries volcaniques présente une altération météorique poussée (action des eaux en milieu tropical), qui a affecté la texture et la structure du matériel originel. L'altération qui se développe depuis la surface descend à plusieurs mètres de profondeur. Les coulées de lave et les matériaux pyroclastiques (scories, cendres) les plus anciens qui ont subi plusieurs cycles d'altération sont, de ce fait, plus altérés et des sols se sont développés à partir de ces formations géologiques.

D'après la Figure 4, trois grands ensembles se distinguent sur le territoire communal de Petite-Île :

- des sols bruns andiques épais sur cendres, parfois sur tufs avec quelques cônes volcaniques phase ancienne Fournaise (250000 ans; océanites, basaltes à olivine), dans la moitié Est de la commune. C'est essentiellement sur les sols bruns que la plupart des activités agricoles se développe ;
- des sols ferrallitiques faiblement désaturés dans le Sud-Ouest de la commune ;
- Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres épaisses, entre 500 et 1600 m d'altitude dans le Nord – Est de la commune ainsi que dans le Sud-Est quasiment en bordure littorale. Ces andosols sont des sols noirs fertiles riches en matière organique qui se retrouvent essentiellement sur les planèzes

3.1.4. Réseau hydrographique

Sur la commune de Petite-Île, le réseau hydrographique compte 5 ravines principales dont deux qui délimitent le territoire communal (Ravine de l'Anse et Ravine de Manapany) et trois autres traversant le territoire communal (Ravine du Pont, Ravine des Français, Ravine de Petite-Île) (Figure 5). Les autres ravines sont des cours d'eau temporaires qui n'entrent en fonctionnement qu'en cas de fortes pluies. Elles prennent leurs sources principalement dans les hauts de la commune et s'écoulent vers l'océan en traversant Petite-Île ou en rejoignant les ravines principales en tant qu'affluents.

On note la présence de pentes quasi-nulles au niveau de la frange littorale avec des encaissements de ravines peu marqués et inversement, des encaissements marqués dans les hauts.

Ce réseau hydrographique reste tout de même complexe car les écoulements présentent un débit non pérenne dans un contexte de sols volcaniques très perméables (les planèzes sont connues pour les infiltrations des eaux en situation de fortes pluies.). De plus, les bassins versants sont de formes allongées sur toute la zone d'étude. Ceci génère des ruissellements rapides et conséquents en cas de fortes pluies, et tend à rendre les phénomènes de crues encore plus intenses.

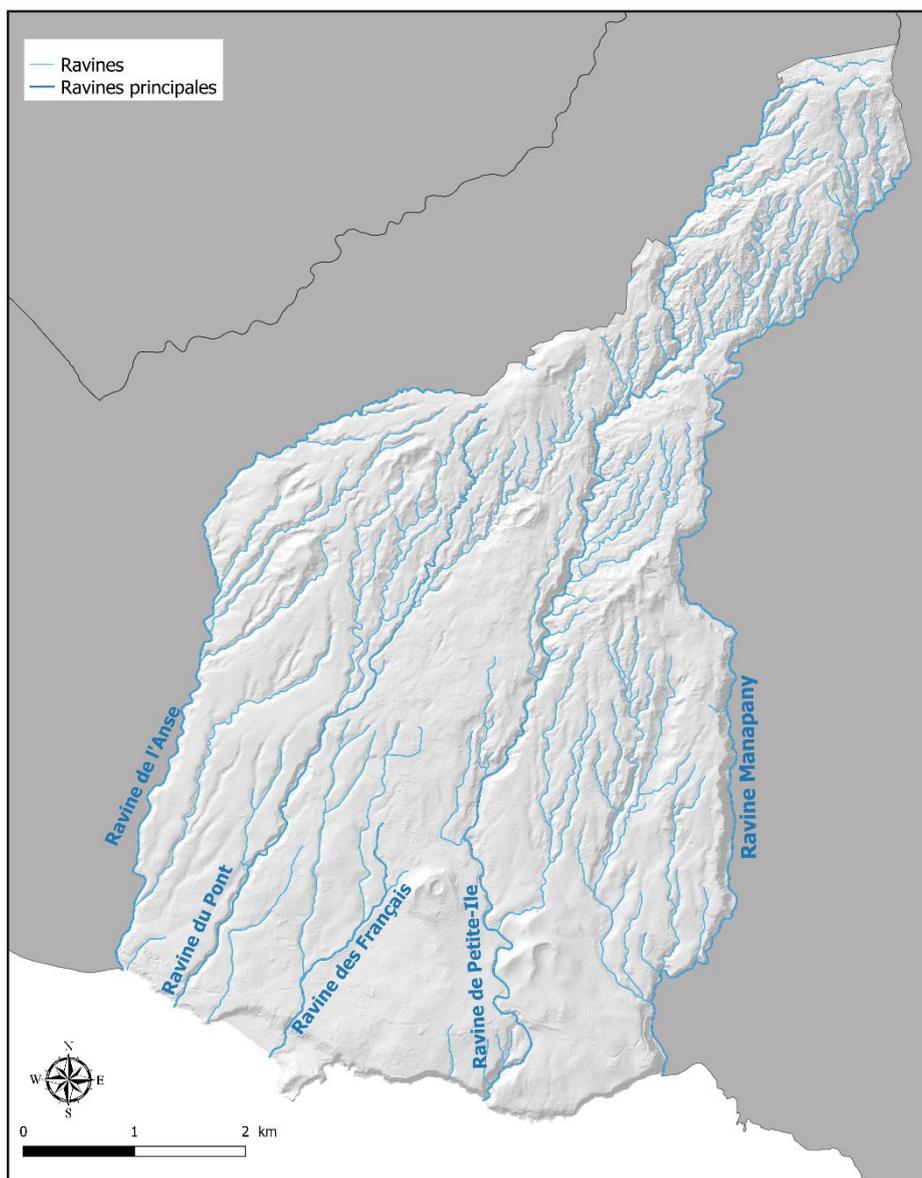


Figure 5 - Réseau hydrographique de Petite-Île (BDtopo2014®, fond SHOM /IGN Litto3D®)

Dans le cadre de l'élaboration de la cartographie de l'aléa inondation sur la commune de Petite-Île (2003), la DDE a sollicité le bureau d'étude BCEOM qui a établi une analyse hydrologique des ravines traversant le territoire communal afin d'évaluer les débits de crue des différents cours d'eau.

Les débits de référence pour des occurrences décennales et centennales pour les principaux cours d'eau traversant Petite-Île sont les suivants :

- La Ravine de l'Anse (limite communale avec la commune de Saint-Pierre) draine un bassin versant de 7,2 km². Le débit de crue centennale est estimé à 145 m³ /s à l'embouchure (Source : rapport provisoire de présentation – projet de PPRi de la commune de Saint Pierre, juillet 2010 Hydrétudes) et à 262 m³ /s dans le PPRi de Petite-Île de 2003 (source : étude des risques d'inondation, décembre 2003, BCEOM) ;

- La Ravine du Pont draine un bassin versant de 4,38 km² et détient un débit de crue décennale de 71 m³ /s à l'exutoire et de 152 m³ /s en crue centennale (source : étude des risques d'inondation, décembre 2003, BCEOM) ;
- La Ravine des Français draine un bassin versant de 4,46 km² et son débit de crue caractéristique pour une occurrence décennale atteint à l'exutoire 81 m³ /s et 173 m³ /s en crue centennale (source : étude des risques d'inondation, décembre 2003, BCEOM) ; -
- La Ravine de Petite-Île est la plus importante de la commune et longe l'Est de l'agglomération de la commune, avec un bassin versant de 9,6 km². Elle présente un débit pour une crue d'occurrence décennale à l'exutoire de 181 m³ /s et en crue centennale de l'ordre de 363 m³ /s (estimation BRGM à partir de la méthodologie établie dans le GEDC) ;
- La Ravine de Manapany, matérialise la limite communale avec Saint Joseph et ne concerne aucun secteur urbanisé de la commune de Petite-Île. Elle présente un bassin versant d'une superficie de 9,3 km². Les débits de crue caractéristiques de cette ravine sont évalués à 141 m³ /s pour la crue décennale et 301 m³ /s pour la crue centennale (Tableau 2).

Nom du cours d'eau	Surface du bassin versant (km ²)	Débit pour la crue décennale (m ³ /s)	Débit pour la crue centennale (m ³ /s)
Ravine de l'Anse	7,44	123	262
Ravine du Pont	4,38	71	152
Ravine des Français	4,46	81	173
Ravine de Petite-Île	9,6	181	363
Ravine de Manapany	9,31	141	301

Tableau 2 - Tableau récapitulatif des données hydrographiques (source : PPRI de la commune de Petite-Île, Décembre 2003, ©BCEOM)

3.1.5. Littoral

Faciès littoraux et dynamique de Petite-Île

De par son exposition plein sud, la dynamique du littoral de Petite-Île dépend principalement du régime des houles australes.

Ce littoral, long d'environ 5 km, est composé de différents faciès littoraux découpés en secteurs d'est en ouest (Figure 6 à Figure 9) :

- *Les côtes rocheuses basses*



Figure 6 - Littoral de Petite-Île - Côte rocheuse basse (Fond : Ortho 2017 IGN)

A l'est de la commune de Petite-Île se trouvent les côtes rocheuses basses surplombant des cordons de sédiments. Quelques habitations sont situées en haut de ces falaises de 30 m de haut dans la bordure littorale.

➤ *La plage de Grande Anse*



Figure 7 - Littoral de Petite-Île – Plage (Fond : Ortho 2017 IGN)

La plage de Grande Anse est une plage de sable blanc d'origine corallienne de 650 m de long. Le beachrock affleure dans la zone du jet de rive. Le haut de plage est végétalisé avec des patates à Durand et des filaos. L'arrière de plage se compose de formation superficielles sur lesquelles a été plantée anciennement une cocoteraie. Un bassin de baignade a été aménagé à l'est de la plage. Il y a également des aménagements en arrière de plage comme des aires de pique-nique, des barbecues et des snack bars.

➤ *Le pic rocheux*

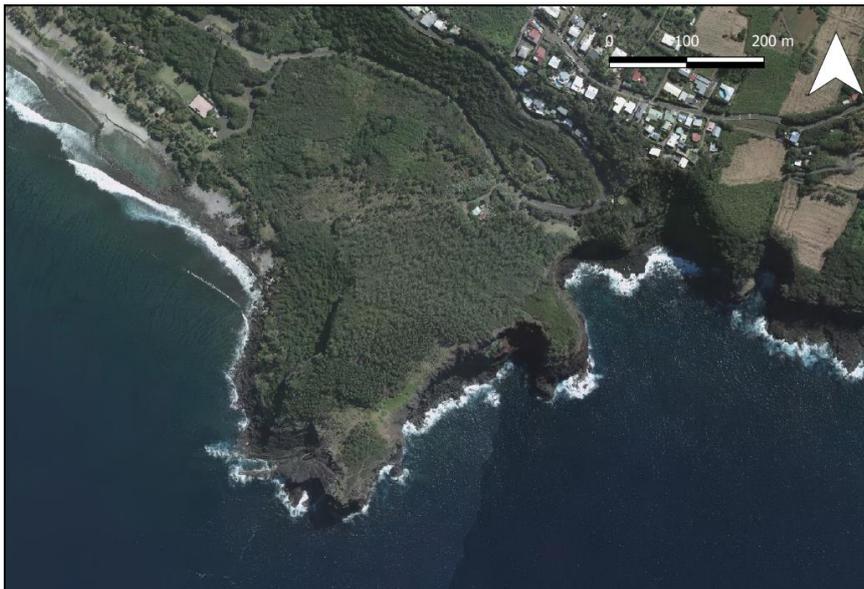


Figure 8 - Littoral de Petite-Île – Pic rocheux (Fond : Ortho 2017 IGN)

Le pic rocheux se situe entre la plage de Grande Anse et le secteur des falaises. Il présente de nombreux escarpements. Le piton Grande-Anse y atteint la hauteur de 85 m. Il existe quelques aménagements dans un des escarpements reculés à l'est du pic.

➤ *Les falaises*



Figure 9 - Littoral de Petite-Île – Falaises (Fond : Ortho 2017 IGN)

Les falaises constituent la majeure partie de la commune de Petite-Île. Elles dépassent 100 mètres de haut au niveau de la moitié ouest de la commune. Quelques habitations se situent à l'est du secteur, dans la bande littorale derrière les falaises.

L'ensemble de ces faciès littoraux est présenté en Figure 10.

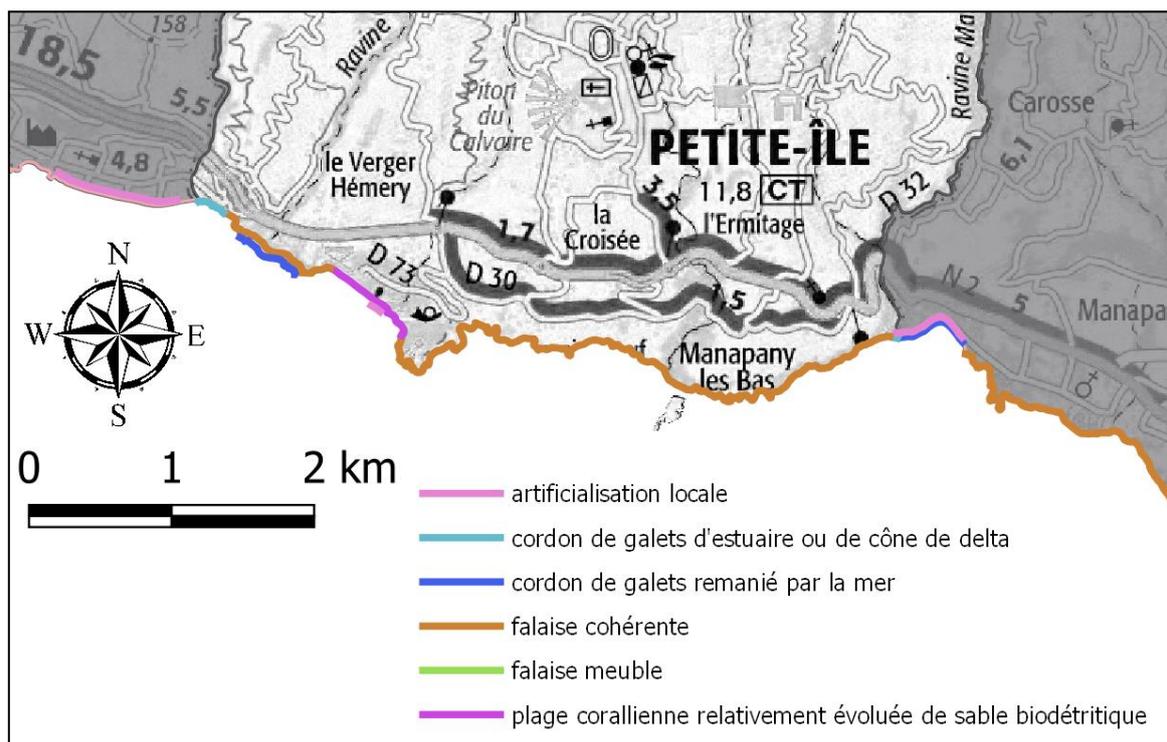


Figure 10 - Types de côtes sur le littoral de Petite-Île (©IGN Scan25® - 2015, De La Torre Y. et al., 2004).

3.1.6. Contexte climatique

Vent

A La Réunion, les vents dominants proviennent du secteur Est-Sud-Est (alizés), avec toutefois des variations saisonnières et localisées selon les facteurs orographiques et thermiques. La commune de Petite-Île, située dans le Sud-Ouest de l'île, est protégée par les hauts reliefs de l'île et se retrouve « sous le vent » de l'alizé. Ce territoire est donc davantage affecté par des brises de pentes nocturnes (vent soufflant de la terre vers la mer) de secteur est et des brises diurnes (vent soufflant de la mer vers la terre) de secteur ouest et sud-ouest.

Pluviométrie

L'île de La Réunion est soumise à un régime d'alizés de Sud-Est. Durant l'hiver austral (mai à novembre), le courant d'alizé est généralement stable, induisant un temps relativement frais et sec. A l'inverse, pendant l'été austral, le déplacement vers le Sud de la zone de basses pressions intertropicales et l'éloignement de l'anticyclone de l'océan Indien affaiblissent les alizés et induisent un temps chaud, humide et pluvieux. C'est pendant cette saison que peuvent se former des dépressions, tempêtes et cyclones tropicaux.

Une des conséquences de cette situation est une pluviométrie exceptionnellement intense à La Réunion : l'île détient les records mondiaux de pluviométrie cumulée pour des durées allant de 12 h (1 144 mm) à 15 jours (6 083 mm).

Située sur la côte « sous le vent », la commune de Petite-Île affiche des valeurs de pluviométrie bien moindres que les territoires de la côte « au vent ». Les précipitations moyennes annuelles dans le secteur de Petite-Île ne dépassent pas 2 500 mm en altitude (Figure 11).

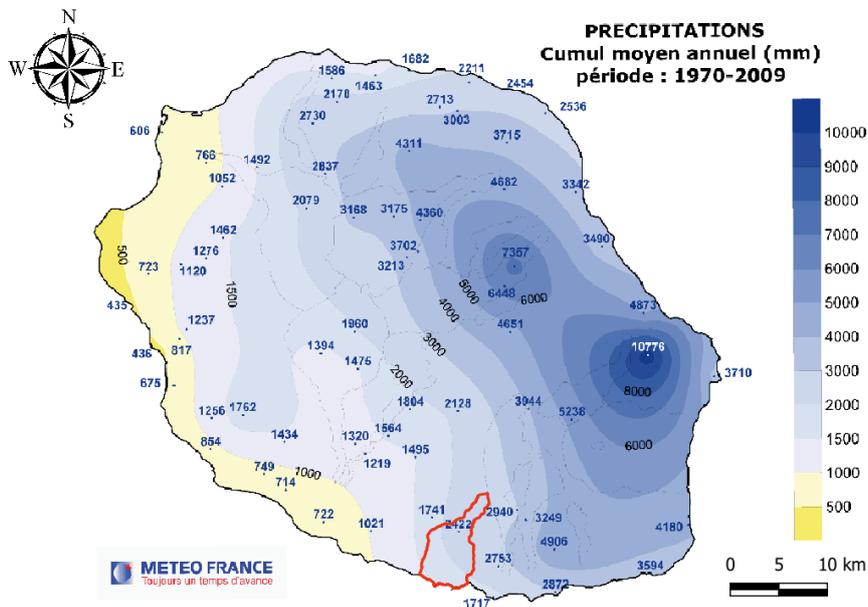


Figure 11 - Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (©Météo France)

La carte des zonages pluviométriques a été réalisée selon le coefficient de Montana défini par MétéoFrance. L'île de La Réunion est ainsi découpée selon des zones de régimes pluviométriques similaires et en tenant compte du relief de l'île. Les zones définies reflètent l'intensité maximum de la pluie à une fréquence horaire, ici pour une période décennale. La zone 1 est la zone présentant l'intensité pluviométrique la moins élevée et la zone 5 correspond à la zone d'intensité pluviométrique la plus élevée. La commune de Petite-Île est principalement concernée par la zone 2 et la bordure littorale est moins impactée (zone 1) que les Hauts (zone 3) (12).

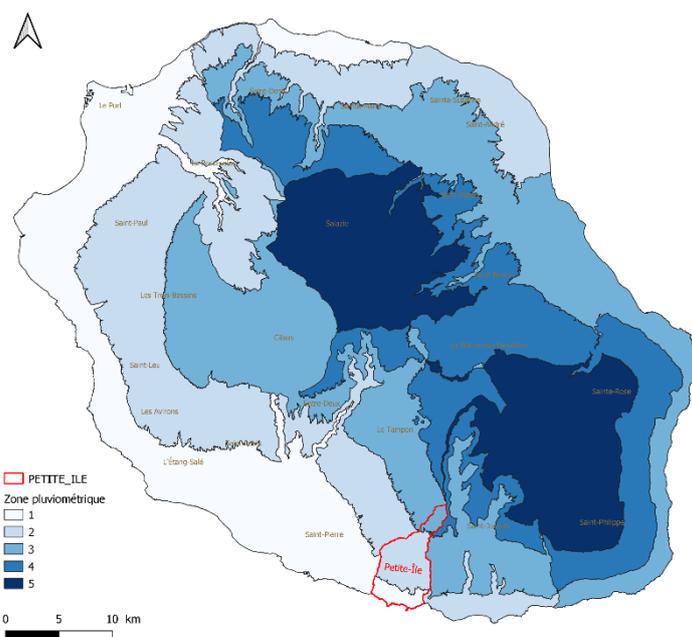


Figure 12 - Zone pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)

Concernant les stations météorologiques, deux stations sont installées et suivies sur le territoire de Petite-Île. Puisque ces deux stations ont été installées récemment, il n'y a pas suffisamment de données pour pouvoir réaliser une analyse statistique détaillée de la pluviométrie de la commune. Nous sommes donc contraints de prendre en compte des autres stations proches du périmètre communal afin de pouvoir densifier les données.

Ainsi, les données pluviométriques, suivies par Météo France, permettent de caractériser la pluviométrie sur le territoire communal (Figure 13). Il s'agit notamment des stations météorologiques suivantes :

- Piton Bloc (CIRAD) (commune de Petite-Île, altitude 813 m, installée en 1990) ;
- Petite-Île (CIRAD) (commune de Petite-Île, altitude : 155 m, installée en 2000) ;
- St-Joseph (CIRAD) (commune de Saint-Joseph, altitude : 17 m, installée en 1960) ;
- Grand-Coude (commune de Saint-Joseph, altitude : 1085 m, installée en 1978) ;
- Ligne Paradis (commune de Saint-Pierre, altitude : 156m, installée en 1966) ;
- Le Tampon PK 13 (CIRAD) (commune du Tampon, altitude : 860 m, installée en 01/01/1958)

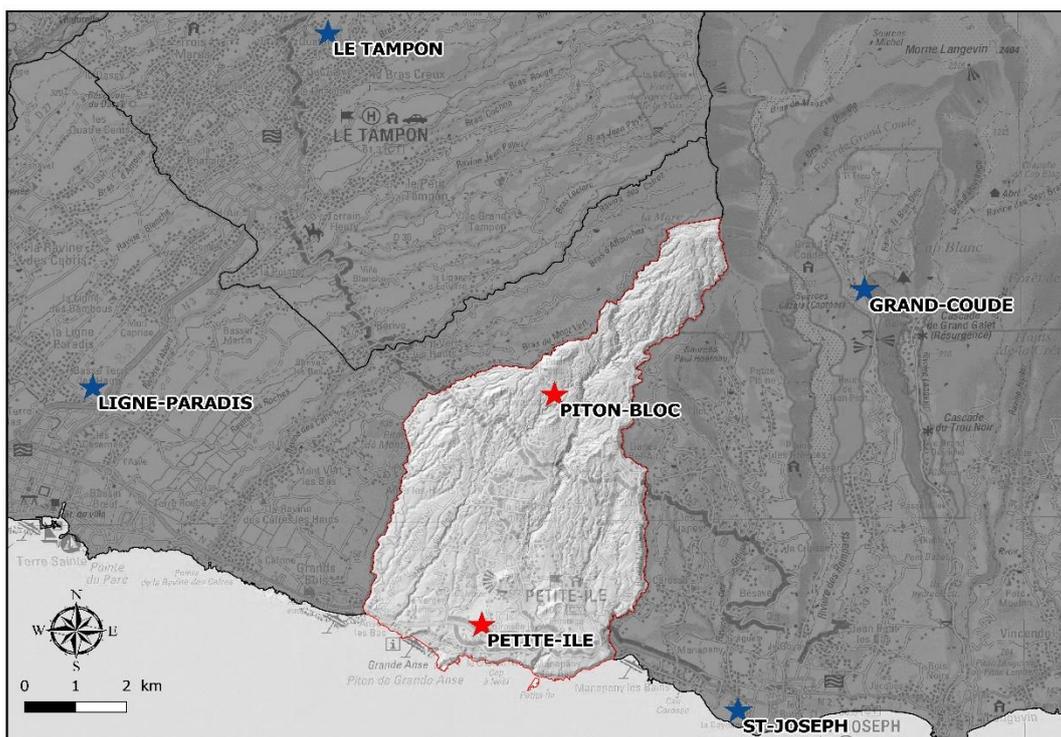


Figure 13 - Localisation des stations météo à Petite-Île (©IGN Scan100® - 2010)

Le GEDC (Guide d'Estimation des Débits de Crues de la Réunion de 1992), propose, à partir d'une analyse statistique, des valeurs de pluies journalières décennales et centennales pour les stations suivies avec respectivement plus de 10 et 25 ans de mesures. Du fait des dates d'installation des postes météo sur la commune de Petite-Île, aucune donnée de ce type n'est disponible mais les données des communes adjacentes sont présentées Tableau 3.

Nom station	Altitude (m)	Pluie Journalière Décennale (PJ ₁₀ en mm)	Pluie Journalière Centennale (PJ ₁₀₀ en mm = 1.6* PJ ₁₀)
Piton Bloc	813	-	-
Petite-Île	155	-	-
Saint Joseph	10	275	440
Grand-Coude	1125	597	955
Ligne Paradis	156	286	457,6
Le Tampon PK13	737	403	645

Tableau 3 - Précipitations journalières décennales et centennales issues du GEDC, 1992 (en mm)

La comparaison entre les pluies journalières maximales observées sur les différentes stations du territoire de Petite-Île, depuis leur ouverture, ainsi que l'analyse des cumuls de pluies caractéristiques confirment également le contraste de pluviométrie selon l'altitude et donc le zonage pluviométrique à considérer. Pour la station de Petite-Île, il n'y a pas de données relatives au nombre de jours de pluie pour la période 1981-2010 mais les données sont disponibles pour Piton Bloc (Tableau 4).

Station	Nombre de jours moyen (période 1981-2010) où le cumul de pluie (en mm) est ≥ à				Maximum absolu quotidien depuis l'ouverture	
	1	10	50	100	Valeur (en mm)	Date
Piton Bloc	122.6	50,4	12,6	4,1	600	22/01/2002
Petite-Île	-	-	-	-	347	05/04/2009
Saint Joseph	117.3	42,6	5.9	1,6	715,5	15/03/1975
Grand Coude	134.2	52,1	13.5	5,6	1300	22/01/2002
Ligne Paradis	71.8	26,3	3	0,5	426,5	29/01/1989
Le Tampon PK13	89.5	31,8	5,6	1,9	600	29/01/1989

Tableau 4 - Cumul de pluie moyen par jours entre 1981 et 2010 (source : Bulletin climatologique 2013 – Météo France).

Des pics de pluviométrie sont observés chaque année et sont présentés dans le Tableau 5. Le nombre de jours dans l'année où les précipitations journalières ont dépassé 50 mm est également affiché. Celles-ci correspondent approximativement à un seuil de précipitations au-delà duquel on observe du ruissellement.

Année	Précipitations journalières maximales en mm	Précipitations annuelles cumulées en mm	Nombre de jours dans l'année où les précipitations journalières dépassent 50 mm	Evènement climatique
2001	197	1718.1	6	Fort épisode pluvieux d'avril
2002	600	2961.3	17	Cyclone tropical intense (DINA)
2003	150	2528	11	Fort épisode pluvieux de juillet
2004	150.5	1669	9	Fort épisode pluvieux de mars (données jusqu'en juillet)
2005	111	2391.5	19	Fort épisode pluvieux de mars
2006	130	1880	11	Forte tempête tropicale (DIWA)
2007	310	2931	15	Cyclone tropical (GAMEDE)
2008	176.5	2333.5	14	Cyclone tropical très intense (HONDO)
2009	423.5	3314	14	Fort épisode pluvieux d'avril (JADE)
2010	191	2006	6	Fort épisode pluvieux d'avril (GELANE)
2011	55.5	631	2	Fort épisode pluvieux de février

Tableau 5 - Maximum des précipitations journalières, précipitations annuelles cumulées, nombre de jours dans l'année où les précipitations journalières dépassent 50 mm et évènement climatique associé sur la période de 2001 à 2012 observés sur la station de Piton-Bloc.

L'année 2009 est marquée par le passage de la tempête tropicale Jade, particulièrement intense en précipitations dans le sud de La Réunion. Lors de cet évènement pluvieux la station de Piton Bloc a enregistré son maximum de précipitations en 24h. Il est à noter également que l'année 2011 n'est pas complète et s'arrête le 30/04/2011. L'année 2012 est également dépourvue de donnée.

Les précipitations journalières maximales représentent en moyenne 0 à 20 % du cumul annuel, ce qui montre l'impact significatif des événements climatiques lors de saisons « sèches » et l'impact modéré lors de saisons « humides ».

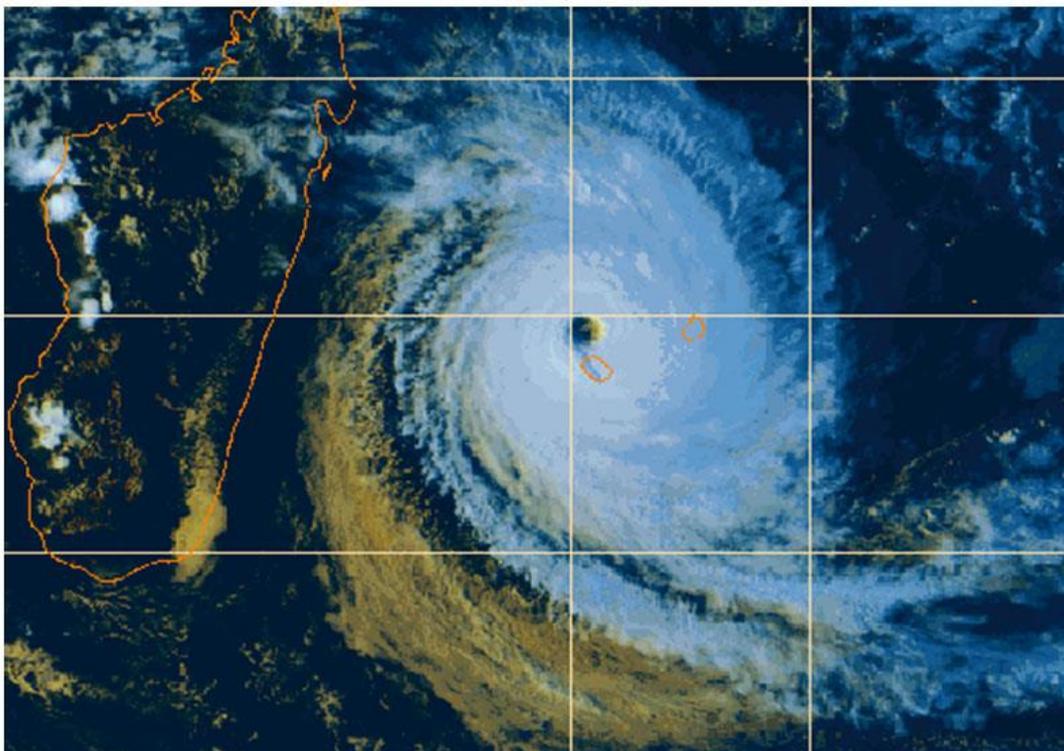
Au-delà d'un seuil de l'ordre de 50 mm de précipitations journalières il peut être estimé que le sol a atteint sa capacité limite d'infiltration, provoquant ainsi le phénomène de ruissellement. De 2001 à 2011, les précipitations ont ainsi provoqué des ruissellements en moyenne plus de 11 jours dans l'année. Ces ordres de grandeurs sont toutefois à prendre avec précaution selon la nature du sol qui peut influencer significativement les conditions de ruissellement (imperméabilisation anthropique, nature des formations en place).

L'analyse des données de pluies, confirme la variation spatiale et temporelle des pluies notamment entre les hauts du territoire de Petite-Île (plus pluvieux) et le littoral (plus sec) malgré l'exposition plein Sud.

Les précipitations peuvent également être très localisées, avec des cumuls journaliers pouvant atteindre des valeurs extrêmement fortes (plus de 600 mm par jour), notamment lors des passages d'évènements cycloniques qui conditionnent ces années-là les cumuls annuels. Ces derniers, pour le territoire de Petite-Île et d'après les données à disposition, ne présentent toutefois pas de caractère exceptionnel comparativement à ceux observés sur d'autres secteurs de l'île.

Les cyclones tropicaux

L'île de La Réunion est soumise à l'importante influence cyclonique affectant le Sud-ouest de l'océan Indien. Chaque année, de novembre à avril, la saison cyclonique apporte son lot de dépressions venant de l'Est. Les trajectoires les plus pénalisantes en termes de houle cyclonique diffèrent selon la façade que l'on considère. Généralement, les cyclones arrivent du Nord-est de l'île avec une trajectoire zonale Est-Ouest puis s'orientent vers le Sud-ouest en passant soit par l'Ouest (tels que Dina et Gamède, (cf. Figure 14 et Figure 15) soit par l'Est de La Réunion.



*Figure 14 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France)
L'œil passe à peine à 30 km des côtes, le scénario est donc majorant puisque la côte Nord de l'île passe dans le rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) excèdera largement les 200 km/h et les vagues dépasseront les 15 m par endroit.*

Lors de la saison cyclonique, l'île vit au rythme des cyclones et des alertes qui lui sont associées. Bien qu'une solide politique de prévention soit en place sur l'île, le caractère imprévisible de la trajectoire des cyclones peut rendre difficile la gestion des risques. À La Réunion, le dernier cyclone à avoir impacté la quasi-totalité de l'île reste Gamède (février 2007), et ce en contournant La Réunion par le Nord-ouest. La difficulté de prévision de sa trajectoire s'est par ailleurs fait ressentir. Après être passé au Nord de l'île, ce dernier est en effet resté stationnaire plusieurs jours avant de se rapprocher de nouveau de l'île, générant de fortes précipitations, un important vent d'ouest et une houle destructrice en continu sur les façades Nord et Ouest.

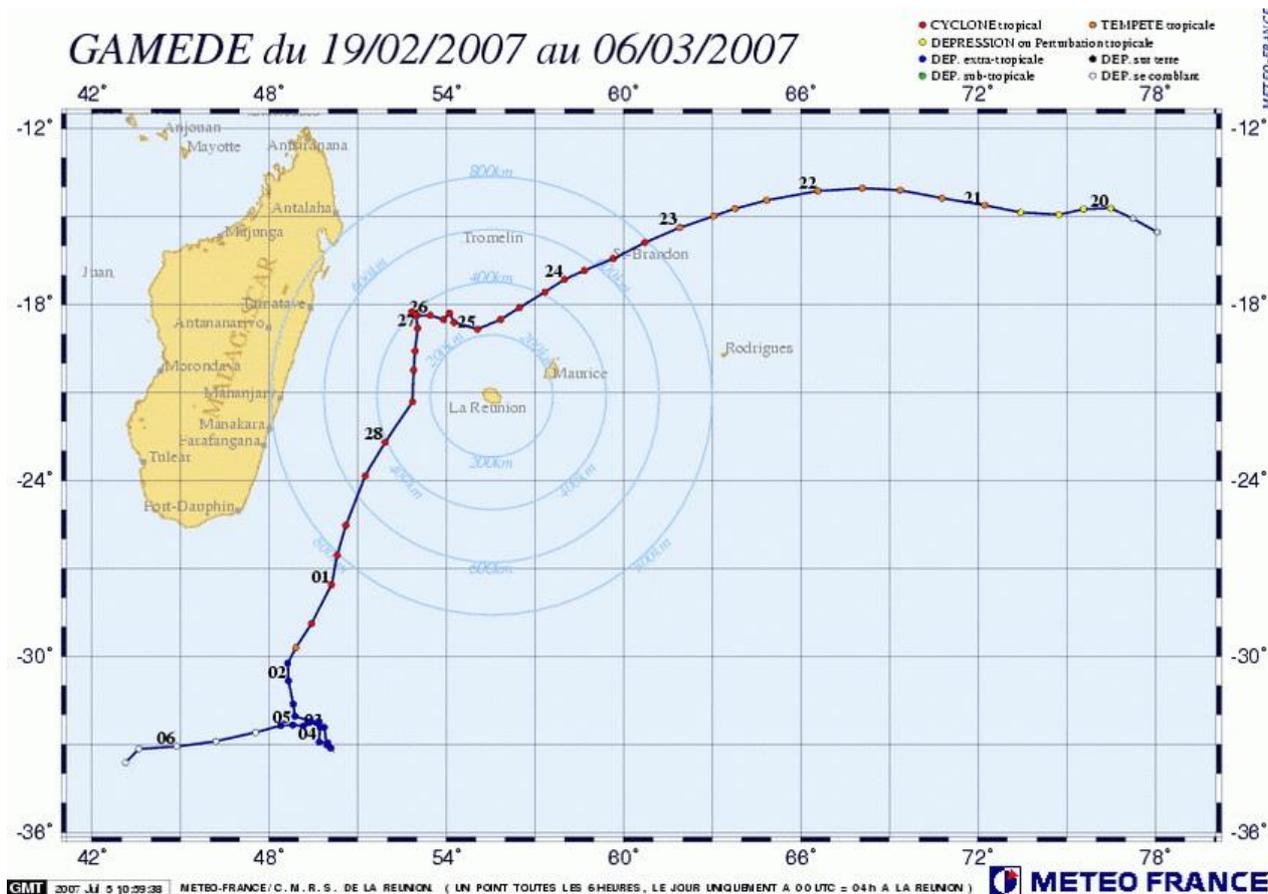


Figure 15 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)

Une configuration comparable s'est produite lors du cyclone Hyacinthe en 1980, dont la trajectoire a décrit des boucles autour de La Réunion durant plus de 10 jours entre les 17 et 28 janvier. Ces deux cyclones ont battu plusieurs records mondiaux de précipitations.

Historiquement, d'autres cyclones ont lourdement impacté l'île de La Réunion et parfois bien plus que Gamède et Hyacinthe. Ce fut par exemple le cas des cyclones de 1948 et de 1962, tuant respectivement 165 et 37 personnes. Ces chiffres s'expliquent de trois manières :

- une politique de prévention quasiment inexistante à l'époque ;
- un habitat majoritairement précaire (cases en « bois sous tôle ») ;
- une absence de connaissance des risques entraînant une installation dans des zones fortement vulnérables aux différents aléas liés au passage d'un cyclone (fond de ravine, bord de mer, bordure de précipice...).

Depuis, un système d'alerte cyclonique et des normes de constructions anticycloniques ont été mis en place. Cependant, bien que les constructions soient de plus en plus solides, il n'existe aucune obligation de respecter ces règles en dehors du domaine des constructions publiques. Les effets de cette consolidation progressive du parc immobilier réunionnais se fait malgré tout quelque peu ressentir ces dernières décennies, bien que des cyclones tels que Clotilda (1987), Firinga (1989), Hollanda (1994), Dina (2002), Gamède (2007), ou Bėjisa (2014) aient engendré des dégâts considérables sur les biens mais également les personnes.

Les houles australes

La commune de Petite-Île n'est pas seulement soumise à l'influence cyclonique estivale, elle est également concernée par les risques hivernaux et la survenue des grandes houles australes (Figure 16).

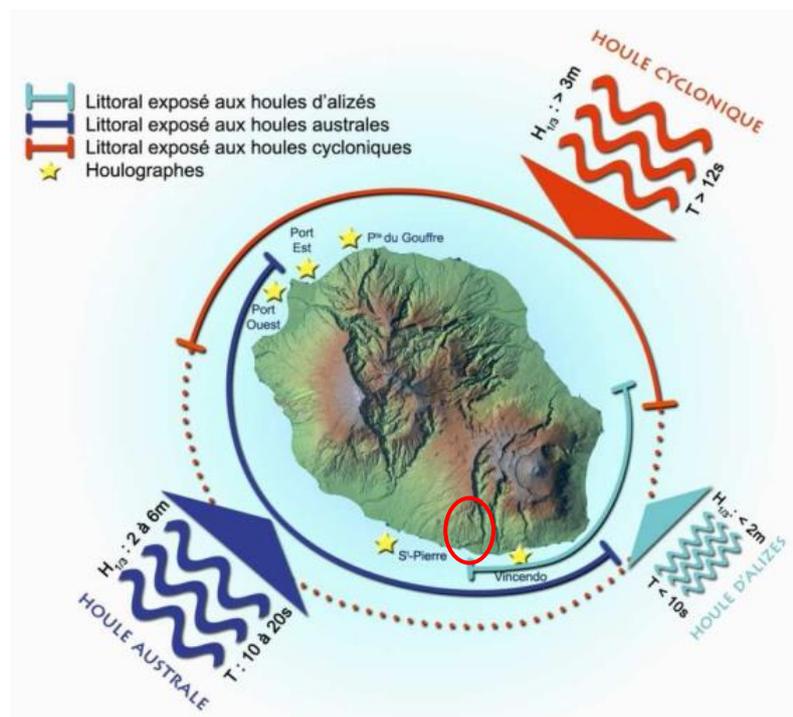


Figure 16 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009)

Les houles australes, de périodes relativement longues (périodes comprises entre 10 et 20 secondes), présentent des hauteurs moyennes de l'ordre de 3 à 4 m et affectent principalement les communes du Sud et de l'Ouest de l'île. Elles proviennent de tempêtes formées à environ 3 000 km au large, dans la zone tempérée de l'hémisphère Sud (plus précisément entre les 40° et 50° parallèles) et atteignent les rivages réunionnais 15 à 25 jours par an. Par leur énergie, ces houles sont particulièrement érosives et peuvent également être à l'origine d'importantes submersions (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Les réunionnais gardent en mémoire les houles australes du 12 mai 2007, ayant atteint une valeur maximale de 11,3 m (6,4 m de hauteur significative¹) à 19h selon les données du houlographe de Saint Pierre.

Par son orientation Sud, le littoral de Petite-Île est systématiquement soumis aux houles australes qui parviennent jusqu'à La Réunion.

3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE

Évaluée à 7 951 personnes en 1967, la population de Petite-Île a stagné dans les années 70 puis a connu une légère baisse jusqu'en 1982. Puis la population augmenta de plus de 3 000 habitants de 1982 à 2013 pour atteindre 12 395 habitants en 2019 (correspondant à un accroissement démographique de près de 65% en 50 ans) (Figure 17).

¹ La hauteur significative (H_s ou $H^{1/3}$) correspond à la moyenne du tiers des vagues les plus hautes. Cette valeur est la plus couramment utilisée pour caractériser la hauteur la plus représentative de la houle

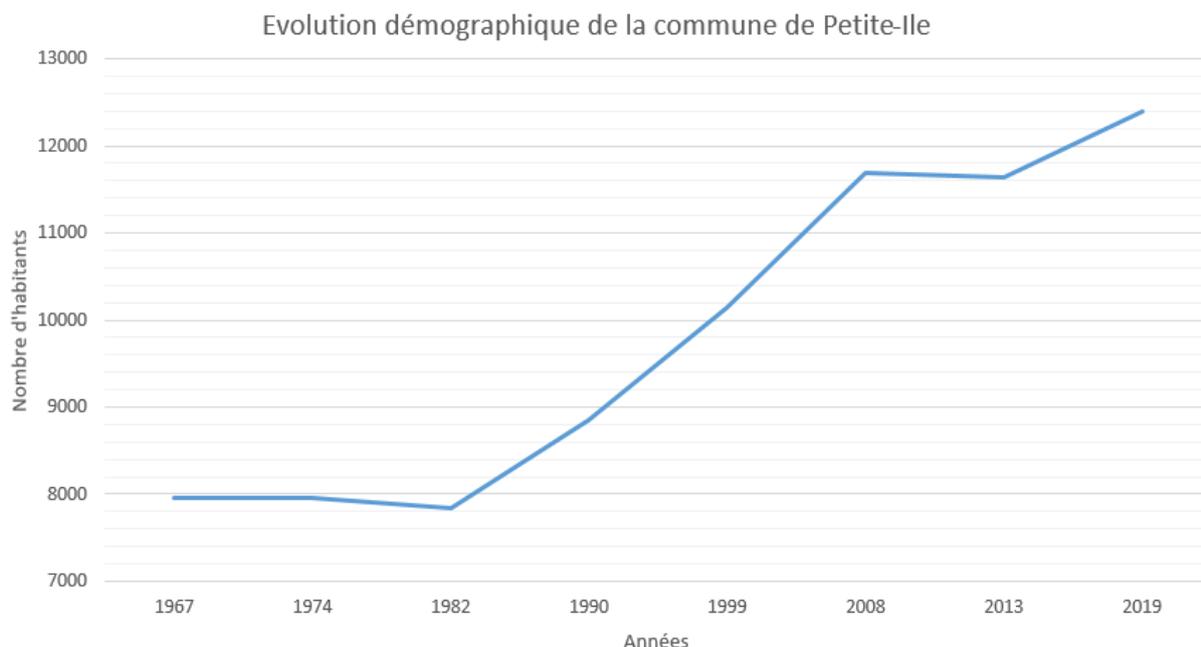


Figure 17 – Graphique d'évolution de la population de la commune de Petite-Île

	1967	1974	1982	1990	1999	2008	2013	2019
Population	7 951	7 961	7 834	8 852	10 151	11 692	11 633	12 395
Densité moyenne (hab/km²)	234,3	234,6	230,9	260,9	299,2	344,6	342,9	365,3

Tableau 6 - Evolution de la population de Petite-Île (source : ©I.N.S.E.E.)

La densité démographique lors du recensement de 2019 était de 365,3 hab./km² (Tableau 6), relativement proche de la densité moyenne de l'ensemble de l'île de La Réunion de 332 hab. /km².

La commune de Petite-Île se divise en plusieurs secteurs qui semblent s'organiser de façon rectiligne le long des axes routiers majeurs :

- le secteur urbain majeur, le centre-ville de Petite-Île ainsi que la Ravine du Pont, se développent en bordure de la RD31
- le long du littoral, sur l'axe de la RN2, les quartiers du Verger Hémerly, la Croisée et Manapany les Bas,
- les écarts habités, plus ou moins urbanisés le long de la RD3 sont notamment Le Piton des Goyaves, Charrié et Manapany les Hauts

Le parc de logement s'établissait en 2019 à 5 637 unités (constitué à 90 % de résidences principales), contre seulement 3 570 à la fin des années 1990, illustrant un développement de l'urbanisation significatif et une pression foncière existant sur la commune de Petite-Île.

Outre le bâti, les principaux enjeux qui ont été répertoriés et cartographiés dans l'étude B.R.G.M. sur l'évaluation et la cartographie des aléas mouvements de terrain et inondation sont les suivants :

- les services de sécurité et de secours (gendarmerie, caserne de pompiers, cliniques et hôpitaux) ;
- les espaces communaux, les Z.A.C., les zones d'insalubrité (R.H.I.) ;
- les voies de circulation (R.N.2, D.3, D.31, D.29., D.30, D.32, D.73) ;
- le réseau d'Adduction d'Eau Potable (captages, stations de traitement) ;
- les établissements d'enseignement (écoles, collèges, lycées) ;
- les bâtiments administratifs (mairie principale et mairies annexes) ;
- les autres établissements recevant du public (crèche, bibliothèque, équipements sportifs) ;
- les zones agricoles et naturelles.

Les principaux enjeux représenté Figure 18 sont reportés sur la carte présentée en annexe 5 de ce dossier.

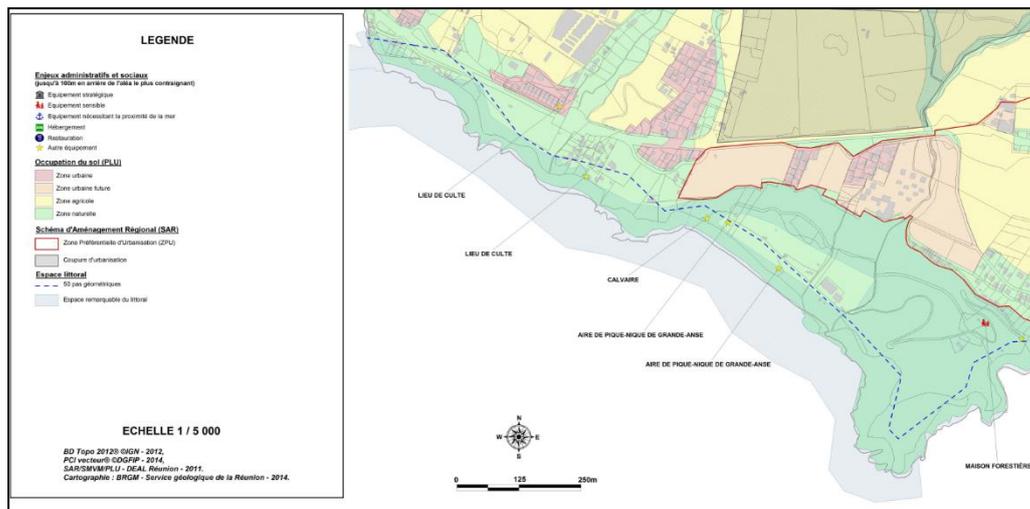


Figure 18 - Extrait de la carte des enjeux de la commune de Petite-Île (cf. Annexe 5)

4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels

4.1. PHENOMENES HISTORIQUES

La connaissance de phénomènes historiques est issue des services communaux qui font remonter les différentes informations sur les événements extrêmes. Cette connaissance historique est principalement issue de l'analyse d'archives, notamment de la revue de presse de « Petite-Ile dans la tourmente », d'articles de journaux et d'enquêtes de terrain. Quelques éléments sur les événements sont donnés ci-après :

21 janvier 1980 : *« Le passage du cyclone Hyacinthe provoque des inondations impactant chaussées et bâtiments. La famille Gerville paie un lourd tribut : 2 morts et 5 blessés. Leur case se fait entraînée par un flot de boue. »* [Le JIR](#)

21 janvier 1993 : Cyclone Colina. *« A Petite-Île ce sont les robinets qui subissent le plus les affres post cycloniques. La canalisation des Hirondelles ayant cassée, des problèmes d'alimentation en eau potable sont présents. »* [Le Quotidien](#)

12 février 1994 : Cyclone Hollanda. *« Avec 107 personnes accueillies dans ses cinq centres d'hébergement, Petite-Île aura compté près de 1.2% de réfugiés. La commune est privée d'eau, d'électricité, de téléphone. Les arbres à fruits sont couchés, leurs fruits fanés à terre. Une véritable catastrophe économique pour la commune. »* [Le Quotidien](#)

Mars 2002 : La commune de Petite Ile a été, elle aussi affectée par le passage du cyclone DINA : 13 mouvements de terrain ont été recensés, la plupart touchant le réseau routier. [Rapport public BRGM/RP-51567-FR](#)

12 février 2010 : *« Petite-Île est sous l'eau, radier Adenor Payet submergé... »* [Zinfos974.com](#)

4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES

Depuis 1993, 8 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur la commune. Le Tableau 7 ci-après en présente la liste :

Type de catastrophe	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	18/01/93	20/01/93	18/05/93	12/06/93
Inondations et coulées de boue	27/02/93	03/03/93	14/06/93	27/06/93
Inondations et coulées de boue	10/02/94	12/02/94	12/04/94	23/04/94
Inondations et coulées de boue	22/01/02	23/01/02	08/04/02	18/04/02
Mouvement de terrain	22/01/02	23/01/02	08/04/02	18/04/02
Inondations et coulées de boue	24/02/07	25/02/07	23/03/2007	28/03/07
Inondations et coulées de boue	05/04/09	07/04/09	25/06/09	01/07/09
Inondations et coulées de boue	01/01/14	03/01/14	17/01/14	18/01/14

Tableau 7 - Liste des arrêtés de catastrophes naturelles sur la commune de Petite-Île (source : www.prim.net - Portail de la Prévention des Risques majeurs du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie. - mise à jour 16/08/2014)

Les ouvrages généraux de Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998), indiquent les cyclones majeurs ayant concernés La Réunion depuis 1980 (Tableau 8).

Cyclones	Passage au plus près des côtes réunionnaises	Pression minimale (hPa)	Vents max (Km/h)	Hauteur de houle
Béjisa	50 km à l'Ouest des côtes de Saint-Leu	950	178 au Gîte de Bellecombe	$H_{1/3} \approx 6,5$ $H_{Max} \approx 10,6$ à la Possession
Gamède (23/02-28/02/2007)	230 km au Nord et à l'Ouest des côtes	935	137 (au Port)	H_{Max} : 11,7 m à la Pointe du Gouffre
Gafilo (02/03 -15/03 2004)	720 km au Sud de l'île	898	260	$H_{1/3}$: 4 au Port-Est 4,7 m à la Pointe du Gouffre
Hary (06/03 -13/03 2002)	371 km au Sud-Ouest de l'île	905	> 220	$H_{1/3}$: 5,3 m au Port-Ouest 4,5 m au Port-Est 4,3 m à la Pointe du Gouffre
Dina (17/01-26/01 2002)	65 km au Nord-Nord-Ouest de l'île	910	>180 (sur le littoral)	$H_{1/3}$: >3,5 m au Port-Ouest >3,4 m au Port-Est >4,2 m à la Pointe du Gouffre
Hollanda (06/02-15/02 1994)	20 km à l'Est de Saint-Philippe	940	150	-
Colina (14/01-21/01 1993)	Sur l'île le 19 janvier	970	> 140	-
Firinga (25/01- 07/02 1989)	Sur l'île le 29 janvier à Saint Benoît, ressort au niveau du Port	954	> 140	-
Clotilda (09/02- 22/02 1987)	Sur l'île le 13 février	970	> 120	$H_{1/3}$: 2,28 m au Port-Ouest.
Hyacinthe (Janvier 1980)	70 km au Sud de l'île	978 (au Port)	137 (à Gillot)	-
Jenny (Février 1962)	Sur l'île le 28 février	948	264	-
Cyclone de 1948	30 km à l'Ouest de l'île	910	310	-

Tableau 8 - Liste des cyclones notables (Soler, 1997 et Mayoka, 1998)

4.3. CARACTERISATION DES ALEAS LITTORAUX

4.3.1. Aléa recul du trait de côte (RTC)

Considérations générales sur l'aléa RTC

D'après le guide national pour l'élaboration des PPRL², le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. Il est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, érosion naturelle induite par les forçages marins, combinée parfois à des actions continentales, ou d'une érosion générée ou accélérée par l'homme (sur-fréquentation, extraction, aménagements et ouvrages de protection, urbanisation proche du littoral entraînant des ruissellements de surface et la présence de réseaux, etc.).

L'érosion est une perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement du niveau de l'estran ou de la plage. Les côtes basses meubles ainsi que les côtes à falaises peuvent reculer. Les côtes basses meubles se caractérisent cependant par une mobilité permanente donnant au trait de côte une géométrie variable, pouvant se caractériser par des phases d'avancée et de

² Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, DGPR, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Mai 2014.

recul. Les côtes à falaises ne peuvent quant à elles que reculer. Leur recul est souvent plus complexe à appréhender du fait de la lithologie et de la fracturation en haut de falaise et des actions directes de la mer. L'évolution du trait de côte dépend de plusieurs paramètres (Figure 19) :

- Les facteurs météorologiques : précipitations et vent (météorisation) ;
- Les facteurs hydrodynamiques : marée, houle (couple période/hauteur) ;
- Les facteurs continentaux : géologie et apports sédimentaires terrigènes ;
- Les facteurs anthropiques : piétinement, prélèvements, perméabilisation et/ou fixation du trait de côte, etc.

A La Réunion, il faut également compter sur les apports biodétritiques liés à la présence de récifs coralliens frangeants.

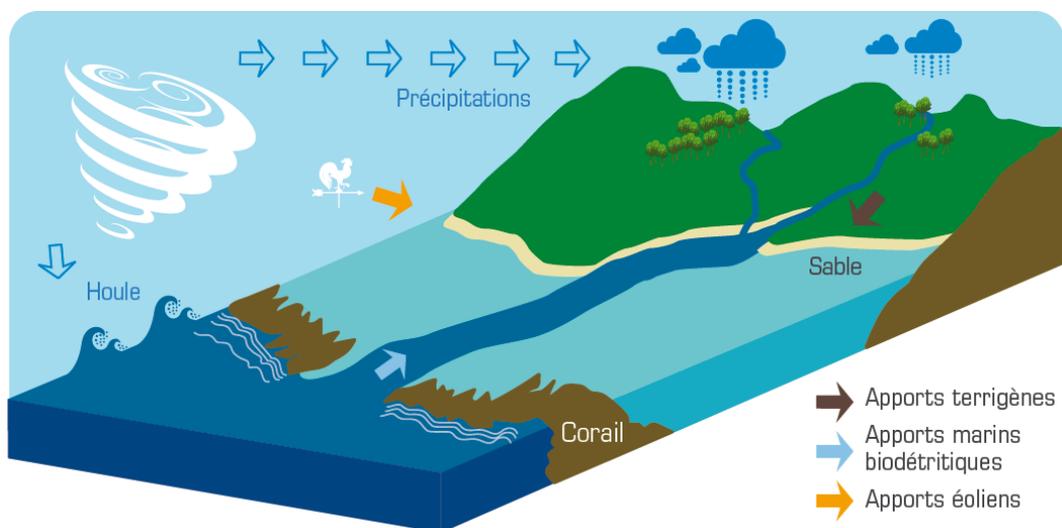


Figure 19 - Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

Le recul du trait de côte s'appréhende à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire. Les flux sédimentaires littoraux et les obstacles naturels ou anthropiques (Figure 20) qui peuvent entraver ces processus sont à la base des phénomènes qui définissent la distribution des matériaux sur la côte et donc la position du trait de côte. Ces processus dépendent notamment :

- de la morphologie littorale (caps, péninsules, anses) ;
- d'autres limites naturelles telles que les embouchures de cours d'eau (rôle d'épi hydraulique/apports sédimentaires différenciés en amont-dérive et en aval-dérive) ;
- des courants marins pouvant inverser les dynamiques évolutives entre deux secteurs adjacents ;
- des aménagements pouvant bloquer le transit et les dynamiques longitudinales (digues, perrés, etc.) et transversales (épis, jetées, etc.).



Figure 20 - Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012)

Tel que défini dans le guide méthodologique national pour l'élaboration des PPRL, le recul du trait de côte correspond à une évolution sur le long terme du littoral, observable à des échelles de plusieurs décennies, consécutive à une tendance à l'érosion.

L'érosion peut aussi être observée de manière ponctuelle après un événement tempétueux. Le phénomène érosif d'une plage peut être plus ou moins important en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur significative, longueur d'onde³, incidence...), et en fonction de l'environnement de la plage (présence d'épis, de caps...).

La longueur d'onde définit en effet la puissance du courant de retrait des vagues (ou backwash) duquel va découler un arrachement des sédiments. Par opposition, les vagues dites « constructrices » ont une période courte et permettent une reconstitution des cordons sédimentaires avec un swash (vague montante) plus important que le backwash (vague descendante) (Figure 21).

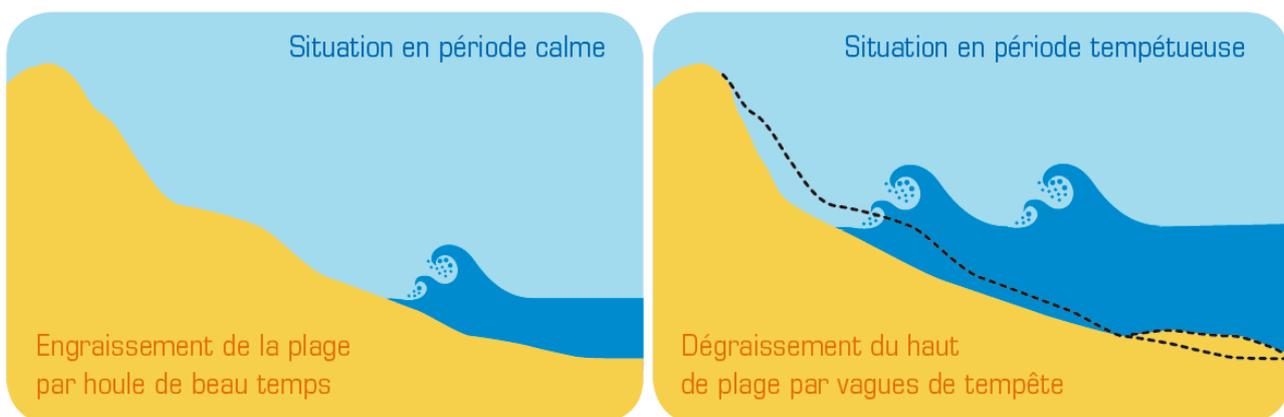


Figure 21 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)

A La Réunion, les manifestations du recul du trait de côte peuvent être multiples. Par ailleurs, on peut distinguer les phénomènes affectant les côtes sédimentaires de ceux affectant les côtes rocheuses et à falaises.

Sur les côtes sédimentaires, on peut constater (Figure 22) :

3

Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs

- la mise à nue racinaire ou l'arrachage de la végétation littorale (filaos, vacoas, Patate à Durand, veloutier, etc.) ;
- la création de talus d'érosion ;
- la mise à nue et/ou le démantèlement de dalles de beach rock (ou grès de plage) ;
- la déstructuration partielle ou totale (affouillement, déchaussement, basculement, ruine, etc.) d'ouvrages côtiers (murs, clôtures, ouvrages de défense).



Figure 22 - Les manifestations du recul des côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)

À la suite d'événements exceptionnels et en fonction des stocks sédimentaires disponibles, deux types de dynamiques peuvent se produire sur les cordons sédimentaires :

- une reconstitution du cordon sédimentaire (sable et/ou galets) autrement appelée « résilience » et correspondant à la capacité du trait de côte à se recharger naturellement à la suite d'un événement donné ;
- une érosion durable du trait de côte pour cause de déficit sédimentaire dans les petits fonds à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire. Ce déficit définit les tendances à l'érosion sur le moyen et long terme.

Sur les côtes à falaises, les phénomènes rencontrés sont les suivants (Figure 23) :

- sous-cavage ;
- fracturation de la roche en partie sommitale et/ou frontale ;
- éboulements/effondrements de pans de falaises.

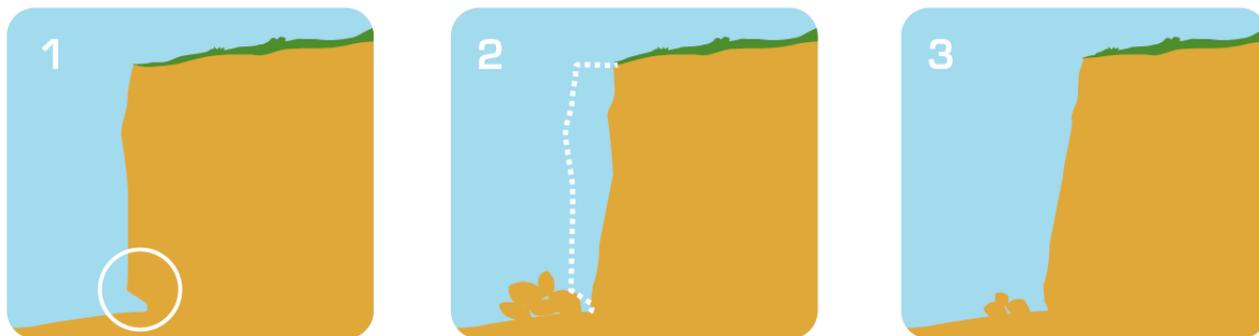


Figure 23 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)

Le bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais fait état d'un recul sur environ 50% du linéaire côtier, soit environ 125 km sur un total de 250km de côtes (cf. Tableau 9).

Evolution	Part	Longueur	Type de littoral concerné
Accrétion (engraissement)	7%	18 km	Embouchures de rivières et ravines
Stabilité	22%	55 km	Littoral stabilisé par des aménagements ou de la végétation
Equilibre	21%	52 km	Littoral en équilibre dynamique (présentant une bonne résilience)
Erosion modérée	38%	95 km	Falaises basaltiques
Erosion prononcée	12%	30 km	Plage et microfalaises meubles surmontant les cordons de galets/de sable

Tableau 9 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

L'aléa RTC sur la commune de Petite-Île

La commune de Petite-Île est confrontée aux problématiques de recul du trait de côte. La position géographique de la commune, au sud de l'île, fait qu'elle est particulièrement exposée aux houles australes.

Il est possible d'observer des signes d'érosion sur la plage de Grande Anse, au niveau de la limite de végétation (Figure 24). L'affleurement du beachrock est également un indicateur de l'érosion de la plage (Figure 25), il peut être utilisé en tant qu'indicateur de la limite du bas de plage, comme le jet de rive.



Figure 24 : front d'érosion au niveau de la plage végétalisée (BRGM, 2022)



Figure 25 : Beachrock affleurant à Grande Anse (BRGM, 2020)

4.3.2. Submersion marine

Considérations générales sur l'aléa submersion marine

La submersion marine est l'inondation temporaire de la zone côtière liée à des conditions météorologiques défavorables. Lors du passage d'un cyclone, les vents violents et la chute de la pression atmosphérique contribuent de différentes manières à la submersion (cf. Figure 26) en générant :

- Une **surcote atmosphérique** : il s'agit d'une surélévation du niveau moyen de l'eau qui résulte de l'effet combiné de la dépression, qui crée un effet de baromètre inverse (on considère que la surcote augmente de 1 cm par hectopascal de dépression par rapport à la pression atmosphérique moyenne), et du vent, qui pousse les masses d'eau vers la côte en particulier dans les baies et les zones de haut fond.
- Des **vagues** qui contribuent de deux manières à la submersion :
 - Lors du déferlement, l'apport de masses d'eau au niveau de la côte engendre également une surcote très locale qui contribue à l'élévation du niveau moyen (cette surcote est communément appelée le **wave-setup**) ;

- Sous l'impulsion des vagues, une nappe d'eau (appelée **jet-de-rive**) est projetée sur le rivage et peut atteindre des zones plus élevées que le niveau moyen. De plus, si les vagues déferlent au niveau de la côte et des aménagements côtiers (protections ou habitations), la libération de leur énergie peut engendrer des dégâts importants.

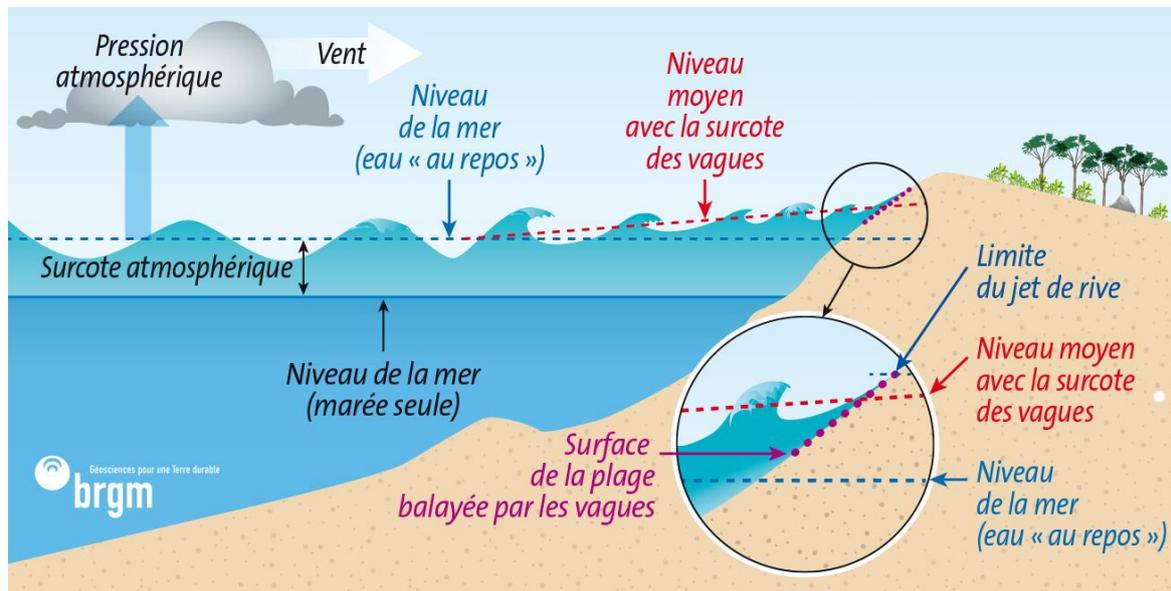


Figure 26 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).

On distingue traditionnellement plusieurs types de submersions marines (cf. Figure 27) :

- ✓ La **submersion par débordement** : dans ce cas, le niveau moyen de l'eau (comprenant le niveau de la marée et les effets de surcote atmosphérique et de wave-setup) est supérieur à l'altitude du rivage (haut d'ouvrage ou terrain naturel). Toutes les zones en arrière dont l'altitude est inférieure à celle atteinte par la mer sont donc potentiellement submersibles.
- ✓ La **submersion par franchissement** ou par paquets de mer : dans ce cas, le niveau moyen de l'eau reste inférieur à la cote du rivage mais le jet de rive des vagues est suffisamment important pour franchir les ouvrages ou le cordon littoral. L'eau se déverse alors par salves successives. Si ce type de submersion engendre généralement des zones inondées moins étendues, le franchissement de paquets de mer peut endommager les constructions littorales et provoquer une accumulation d'eau dans certains secteurs qui se retrouvent alors submergés.
- ✓ La **submersion par rupture du système de protection** : les terres en arrière d'un ouvrage se trouvent inondées si cet ouvrage est défaillant. L'eau s'engouffre dans la brèche, entraînant généralement une ruine totale de l'ouvrage en question. La dynamique est similaire en cas de rupture d'un cordon naturel (dune de sable/cordon de galets).

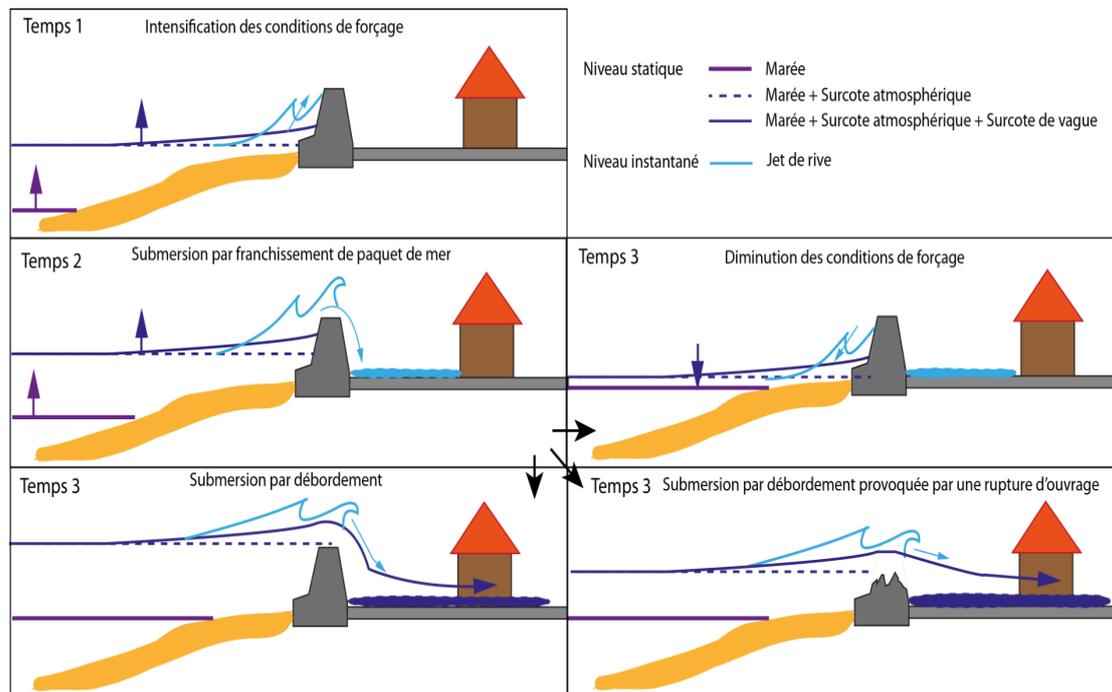


Figure 27 - Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)

La configuration géographique de la côte (forme du plateau continental, présence de baies, exposition par rapport à la houle incidente) joue un rôle déterminant dans l'intensité des phénomènes. Sur les côtes réunionnaises, on distingue deux particularités :

- ✓ L'absence de plateau continental induit des profondeurs d'eau importantes à proximité de l'île ce qui a deux principaux effets. Tout d'abord, l'influence du vent sur la surcote atmosphérique est négligeable et celle-ci est due essentiellement à la pression. Ainsi la surcote atmosphérique dépasse rarement les 50cm. En revanche, les vagues, qui peuvent atteindre une quinzaine de mètres lors d'épisodes exceptionnels, déferlent très proche de la côte ce qui accentue le risque de franchissement par paquets de mer ainsi que la détérioration des ouvrages côtiers.
- ✓ La présence de récifs sur la côte ouest offre une protection contre l'impact direct des vagues qui déferlent avant d'atteindre la côte, mais elle induit également une amplification de la surcote liée aux vagues au niveau du littoral. En effet les lagons ont une action de rétention de l'eau de mer, qui ne peut s'évacuer que par les passes. La surcote liée aux vagues ou wave-setup peut alors aisément dépasser le mètre. S'agissant souvent de secteurs topographiquement bas, cette augmentation du niveau de l'eau tend à aggraver l'exposition à la submersion par débordement.

Par ailleurs, la concomitance d'un cyclone avec un coefficient de marée élevé et une marée haute accroît le risque de submersion par franchissement ou débordement. Toutefois, les marnages étant relativement modérés à La Réunion (de l'ordre de 50cm), cette action n'est pas aussi significative qu'en métropole.

Historiquement, l'île de La Réunion a été soumise uniquement aux problématiques de submersion par franchissement de paquets de mer ou de rupture de cordon naturel. Une soixantaine de sites est connue pour être sensible au franchissement par paquets de mer et/ou à l'érosion sur tout le pourtour de l'île (cf. Figure 28 et Figure 29).

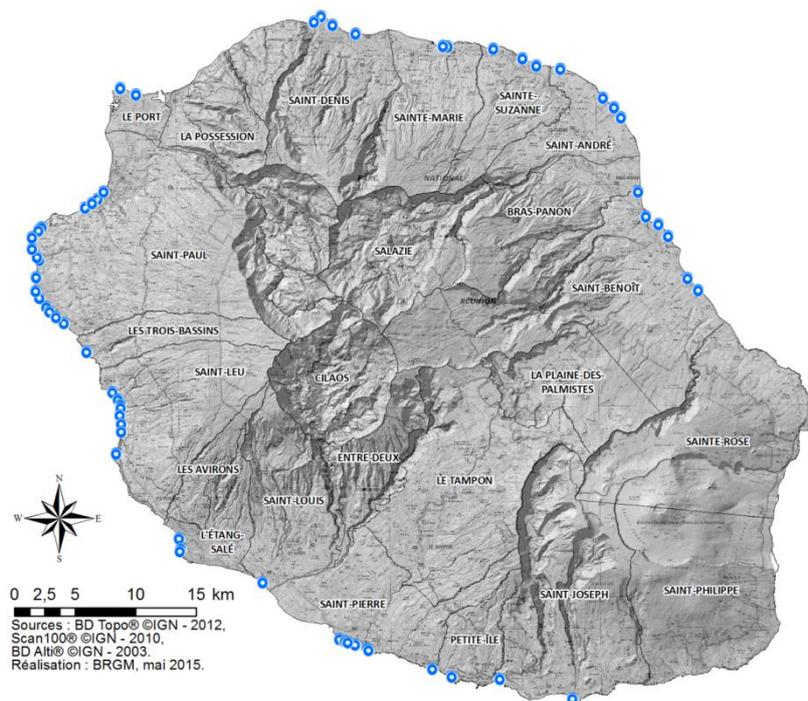


Figure 28 - Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois, 2015)



Figure 29 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)

On peut noter une sensibilité toute particulière des zones récifales de Saint-Paul, Saint-Leu ou encore de Saint-Pierre. Cependant, l'eau ne pénètre généralement pas profondément dans les terres, à l'inverse de certains secteurs soumis directement au déferlement de la houle du large.

D'autres aléas accompagnent la submersion marine. Il s'agit principalement des effets de dissipation d'énergie des phénomènes marins induisant des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents. Son effet est directement lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures.

L'arrivée brutale des eaux à terre peut elle aussi être génératrice de chocs violents. Elle peut être engendrée par une surverse ou une rupture d'ouvrage. Ce phénomène est particulièrement rencontré :

- en arrière immédiat des ouvrages de protection contre les submersions ;
- au-delà de celles-ci dans les zones d'écoulement préférentielles.

L'aléa submersion marine à Petite-Île

Le littoral de Petite-Île est majoritairement peu impacté par la submersion marine du fait de sa morphologie côtière, principalement composée de falaises hautes (>10 mètres), et de la faible urbanisation aux abords du littoral.

5. Caractérisation et cartographie des aléas

5.1. DEFINITIONS ET NOTIONS GENERALES

La **notion d'aléa** est complexe et de multiples définitions ont été proposées. Nous retiendrons la définition suivante :

« L'aléa traduit, en un point donné, la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel de nature et d'intensité définies pour une période de retour donnée ».

Du fait de la grande variabilité des phénomènes naturels et des nombreux paramètres qui interviennent dans leur déclenchement, l'aléa ne peut être qu'estimé et son estimation est très complexe. L'évaluation des aléas littoraux se veut cependant relativement objective et ne laisse que peu de place à l'appréciation. Ce travail fait en effet appel à l'ensemble des informations recueillies au cours de l'étude et à la connaissance des événements passés, ce qui constitue des repères fiables et concrets sur l'extension des phénomènes dans les secteurs déjà soumis à l'un ou l'autre des aléas. De plus, les méthodes quantitatives utilisées sont robustes.

La définition de l'aléa impose de connaître, sur l'ensemble de la zone étudiée, l'**intensité** des phénomènes naturels. L'intensité d'un phénomène peut être appréciée de manière variable en fonction de sa nature même : vitesses de recul pour le recul du trait de côte, vitesse et hauteur des écoulements d'eau pour la submersion marine. L'importance des dommages causés par des phénomènes passés est également prise en compte.

5.2. ALEA REcul DU TRAIT DE COTE

5.2.1. Cadre méthodologique national

Concernant l'aléa recul du trait de côte, il s'agit essentiellement de prendre en compte :

- Le taux annuel de recul du trait de côte par secteur ;
- le recul L_{max} lié à un événement tempétueux majeur ;
- les ouvrages de protection ;
- le changement climatique.

La méthodologie globale ainsi que les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le tableau ci-dessous et précisés dans les chapitres 5.2.2 et 5.2.3 :

Etape 1	Analyse de la cinématique du trait de côte		
Analyse diachronique (100 Tx ⁴)	Création orthophotographies et numérisation multi-dates du trait de côte	Calcul marge d'erreur et calculs automatiques taux moyens d'évolutions par profils (Tx)	Projection des taux moyens à 100 ans (100 Tx)
Prise en compte du recul lié à un évènement majeur (Lmax)	Données historiques sur un évènement majeur	Modèle numérique (modélisation morphodynamique liée à une tempête spécifique)	Analyse géomorphologique à dire d'expert
Zone soumise à l'aléa	Lr = 100 Tx + Lmax		
Etape 2	Prise en compte des ouvrages de protection (vocation à fixer le trait de côte)		
Estimation du rôle à long terme	Capacité à retenir le recul et à résister aux évènements majeurs (analyse historique et dire d'expert)		
Adaptation de la zone soumise à l'aléa	Pas d'adaptation si la plage existe encore à échéance 2100	Prise en compte de l'évolution des zones naturelles adjacentes non protégées (si existantes à échéance 2100)	Bande de précaution forfaitaire de 50 m en l'absence d'information
Etape 3	Prise en compte de l'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte		
Identification des facteurs de recul	Analyse historique du fonctionnement du site		
Méthode pour les côtes connaissant un recul sur la période étudiée	Une règle de trois prenant en compte le scénario de l'ONERC : 20 cm au XX s., et 60 cm à échéance 2100.		
Côtes basses meubles sans évolution historique récente	Même règle de trois basée sur les reculs occasionnés lors d'un évènement tempétueux passé		
Côtes non soumises à l'érosion	Sur la base altimétrique d'une augmentation d'un niveau d'eau de 60 cm (étangs, lagunes, fonds de baie)		
Etape 4	Qualification de l'aléa		
Qualification unique	Fort		
Etape 5	Résultats cartographiques		
Carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte	Positions du trait de côte, délimitation des cellules hydrosédimentaires, ouvrages de protection, secteurs de comportements homogènes, vitesses d'évolution du trait de côte (Tx et Lmax)		
Cartes du zonage de l'aléa recul du trait de côte	Zonage de l'aléa de référence (sans changement climatique) à échéance 2100	Position du trait de côte à échéance 2100 avec prise en compte du changement climatique	

Tableau 10 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude)

5.2.2. Estimation de l'aléa recul du trait de côte

L'estimation de l'aléa recul du trait de côte repose sur une approche historique sur environ 50 ans permettant une « projection sur les 100 prochaines années dans des conditions environnementales estimées comme invariantes dans le temps » (DGPR, 2014).

Pour ce faire, l'analyse de la cinématique du trait de côte se base principalement sur la photo-interprétation de clichés aériens anciens. Le calcul du recul du trait de côte suit les étapes suivantes :

⁴ Vitesse d'évolution annuelle

- préparation des photographies aériennes ;
- définition et numérisation du trait de côte aux différentes dates ;
- calcul du recul du trait de côte à échéance 2100⁵.

Préparation des photographies aériennes anciennes

Les photographies utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes couvrant l'ensemble du linéaire côtier de la commune de Petite-Île de 1950 à 2017 (cf. Tableau 11).

Années	Nature des clichés	Echelle de prise de vue	Résolution image numérique
1950	Noir & Blanc	1 : 25 000	1 pixel = 0.4 m
1997	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 1 m
2003	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2008	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2011	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.2 m
2017	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.2 m

Tableau 11 – Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées

Elles ont été numérisées (scan photogrammétrique pour les prises de vues argentiques), orthorectifiées (correction des déformations dues à l'optique et au relief) et géoréférencées par l'IGN. Les images de 1997, 2003, 2008, 2011 et 2017 sont issues du produit « BD Ortho ».

Définition et numérisation des traits de côte

Compte-tenu de l'évolution des aménagements côtiers et des conditions hydrodynamiques (marée, état de mer) d'une date à l'autre, la définition du trait de côte comme étant la limite du contact terre-mer visible sur les photographies aériennes n'est pas satisfaisante. La limite haute du littoral a donc été privilégiée afin de matérialiser la dynamique d'évolution du trait de côte de Petite-Île. La limite haute du littoral a été caractérisée à partir de la limite de végétation pour la partie plage et de la rupture de pente pour les falaises (Figure 30).

Le trait de côte a été numérisé sous SIG par digitalisation à l'écran à une échelle de 1/2 500ème en prévision d'une restitution cartographique au 1/5 000ème. Le type de limite de trait de côte considéré est renseigné dans les données attributaires de la couche SIG ainsi créée.

⁵ On parle d'une échéance 2100 par simplification linguistique. Considérant que les PPRL seront réalisés à brève échéance, le trait de côte de référence récent se situe autour de 2010 +/- 2 ou 3 ans, en toute rigueur la position du trait de côte en 2100 serait obtenue en considérant un recul égal à 90 (+/- 2 ou 3) x Tx. Il a été décidé de simplifier et de considérer une formule unique 100.Tx pour le recul du trait de côte à échéance 2100.

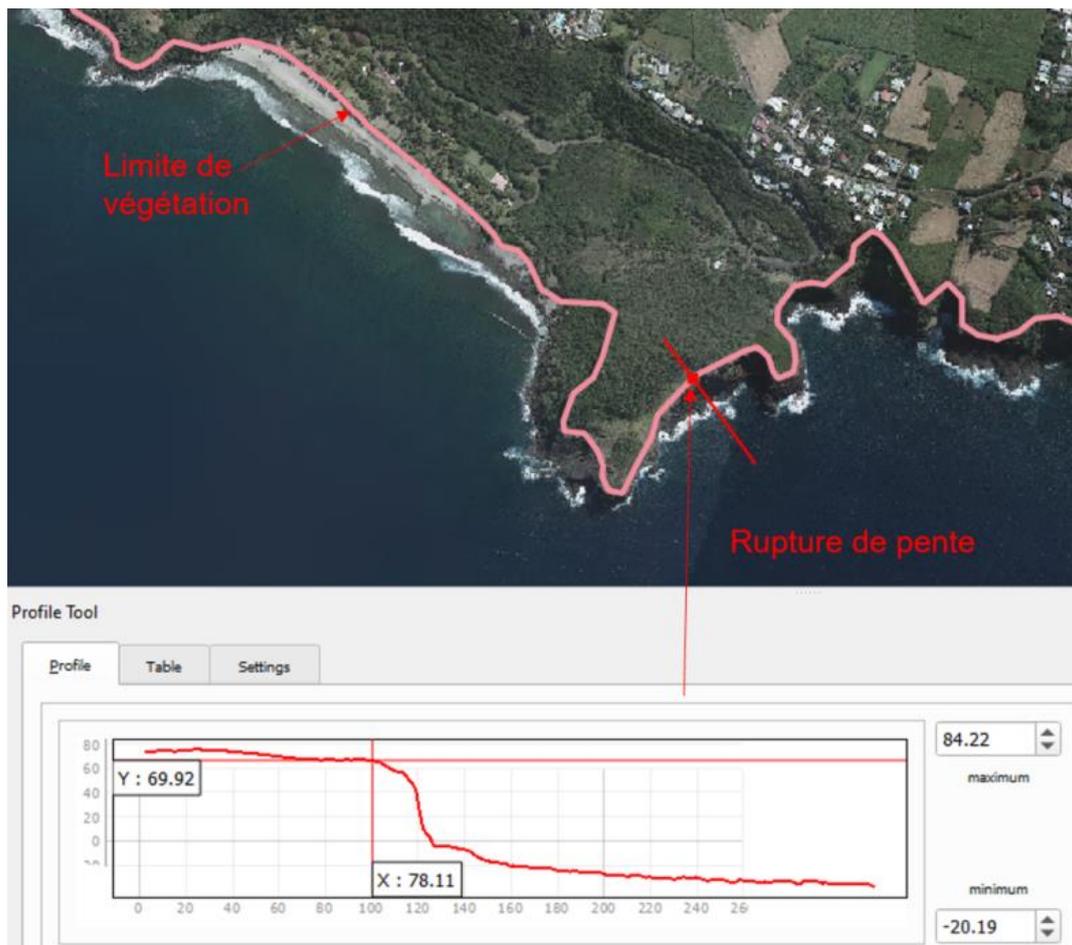


Figure 30 - Exemple de définition du trait de côte avec la limite de végétation et avec la rupture de pente

La marge d'erreur issue de cette photo-interprétation du trait de côte dépend de la qualité des images aériennes (échelles, grain de la pellicule argentique pour les plus anciennes, résolution, orthorectification, géoréférencement) et de l'interprétation du trait de côte dans les zones délicates (ombres portées, falaises en pente douce, escarpements, etc.). Elle est estimée globalement entre 5 et 10 m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à 10 m n'ont pas été conservés (orthophotos de 1966 et 1978).

Calcul du recul du trait de côte à 100 ans

L'utilisation de l'extension d'ArcGIS « DSAS » permet d'automatiser le calcul de l'évolution du trait de côte sur la période considérée.

A partir d'une ligne de base située en arrière de l'enveloppe de traits de côte, des transects sont générés à un intervalle prédéfini. La vitesse d'évolution annuelle (T_x) et sa projection à l'horizon 2100 ($100T_x$) sont calculées pour chaque transect, selon plusieurs méthodes statistiques possibles.

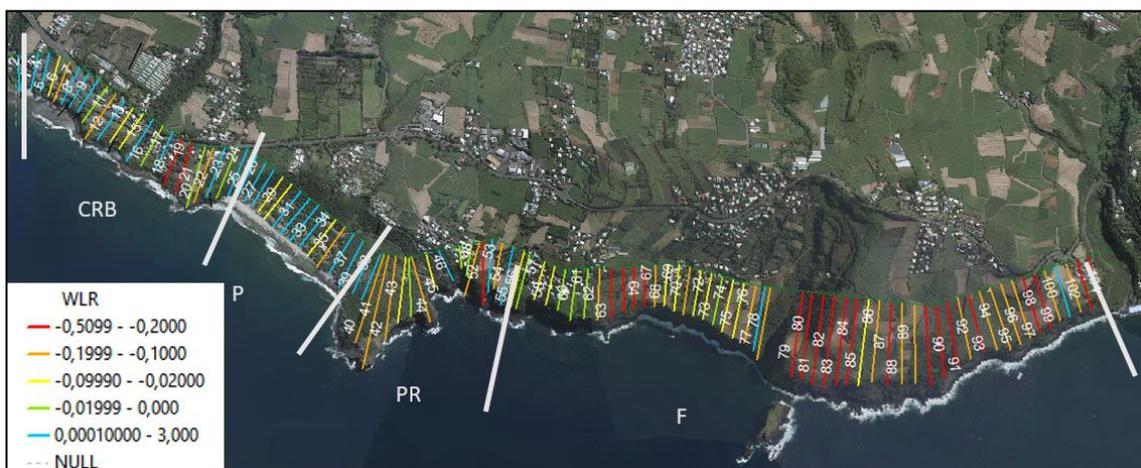


Figure 31 - Implantation des profils à Petite-Île - Fond orthophotographique ©IGN, 2017

Les transects sont implantés tous les 50 m (cf. Figure 31), et le taux d'évolution est calculé à partir d'une régression linéaire pondérée (*Weight Linear Regression - WLR*) adaptée à l'échantillon de traits de côte (Figure 31).

La régression linéaire pondérée est une méthode d'ajustement couramment employée pour le calcul de l'évolution du trait de côte. Elle offre l'avantage d'utiliser toute la donnée disponible et donne plus de poids aux données les plus fiables afin de déterminer la meilleure droite d'ajustement (Figure 32/figure 32).

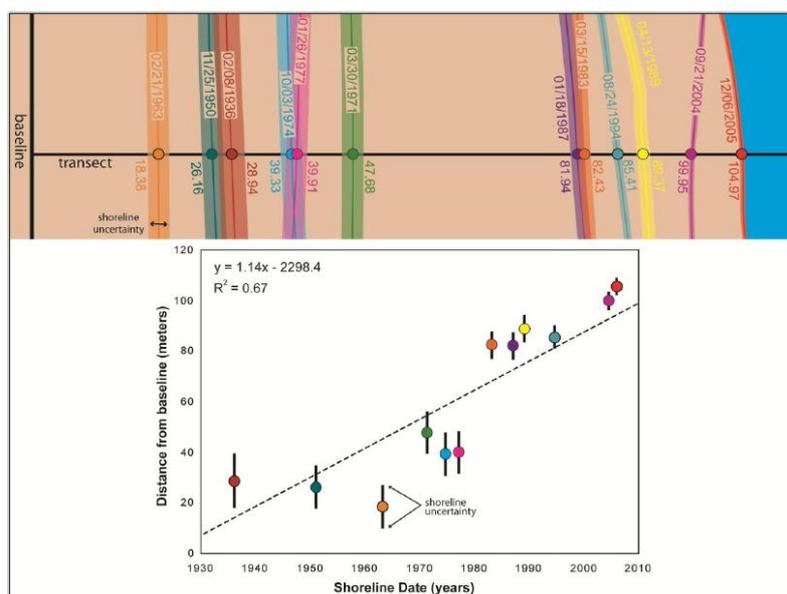


Figure 32 - Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)

Les valeurs obtenues sont ensuite filtrées sous Excel afin de ne retenir que celles exprimant un recul et ramenées à 100 ans (100Tx).

Afin de s'affranchir des effets locaux de transects (artefacts et fortes disparités d'un profil à l'autre générant un trait de côte en « dents de scie » (cf. Figure 33), il convient de regrouper et « moyenner » les valeurs au sein de secteurs au comportement morpho-dynamique homogène. De plus, la dynamique des exutoires étant fortement variable au cours du temps, le recul du trait de côte ne pourra y être calculé.

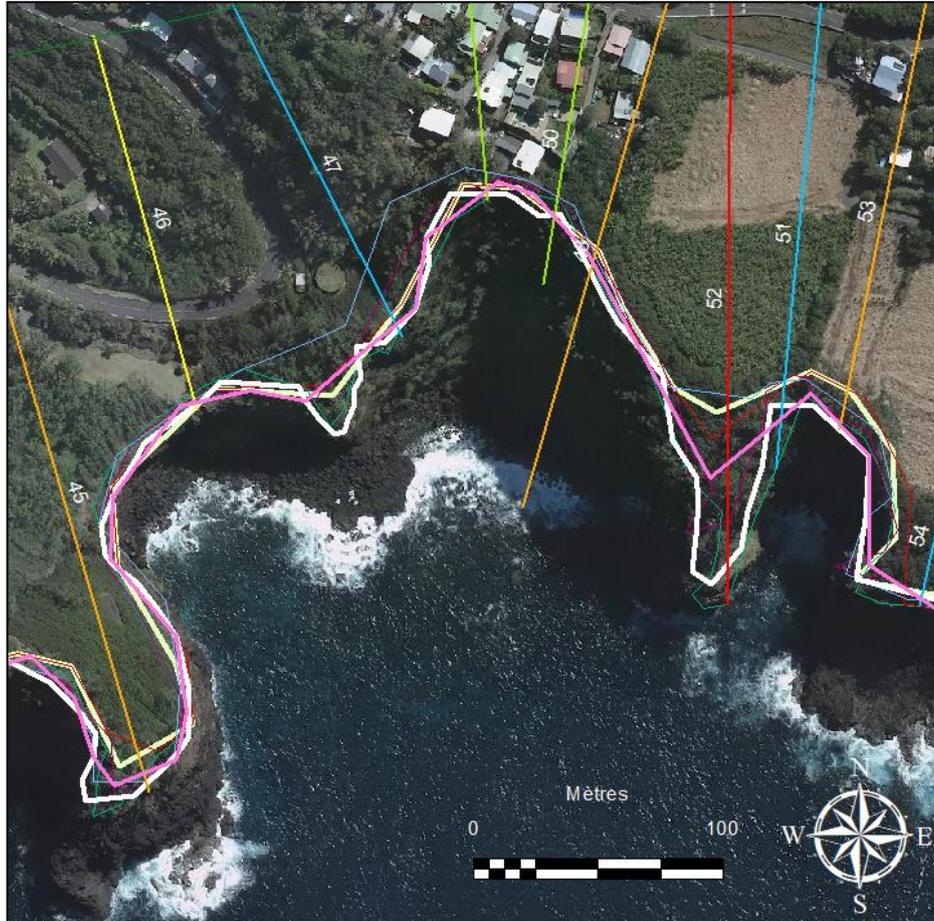


Figure 33 - Exemple d'artefact en couleurs les différents traits de côte historiques (Haut de plage) - Fond orthophotographique ©IGN, 2017

Des secteurs sont ainsi définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral. Il correspondent au faciès littoraux de Petite-Île (cf. 3.1.5). Les reculs moyens par secteur (moyenne des Tx obtenus sur chacun des profils) sont enfin classés par catégories de vitesses de recul soit :

- Stable : de 0 à -0,02 m/an ;
- Faible : de -0,02 à -0,10 m/an ;
- Modéré : de -0,10 à -0,20 m/an ;
- Fort : < -0,20 m/an.

Un exemple est donné au travers l'extrait cartographique de l'Annexe 1 du PPRL de Petite-Île en Figure 34. Il concerne les secteurs de Anse les bas, de la plage de Grande Anse et du pic rocheux :

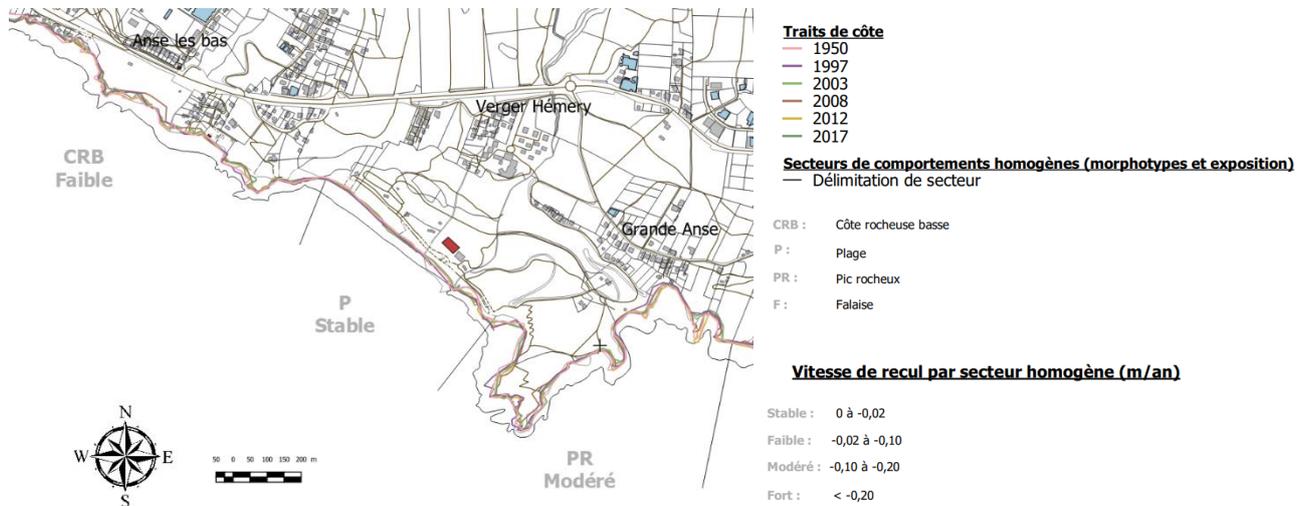


Figure 34 - Extrait cartographique de l'annexe 1 du dossier PPRL de Petite-Île : Carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte pour les secteurs de Anse les bas, Plage de Grande Anse et du pic rocheux.

Il convient en outre de prendre en compte le recul lié à un événement tempétueux majeur (Lmax). Sur la base des tempêtes et cyclones connus (cyclone Gamède et houles australes de mai 2007), le Lmax, ici estimé à -10 m pour les secteurs de cordons de galets et à -5 m pour les côtes à falaises.

5.2.3. Zonage de l'aléa recul du trait de côte

Zonage de référence : recul du trait de côte à échéance 2100

La limite du recul à échéance 2100 est cartographiée sous SIG à partir des valeurs 100Tx par secteurs homogènes. Afin de respecter une marge d'incertitude, les valeurs sont arrondies à 5 m près. Elles sont également plafonnées à un recul maximal de 50 m en 100 ans afin de s'affranchir des valeurs exagérées liées à un effet de profil (artefact local faisant remonter la moyenne sur l'ensemble du secteur).

La largeur de la zone d'aléa résultante ($L_r = 100T_x + L_{max}$) est affectée en arrière du trait de côte de référence, ici le haut de plage (limite de végétation, rupture de pente de 2008) (Figure 35).

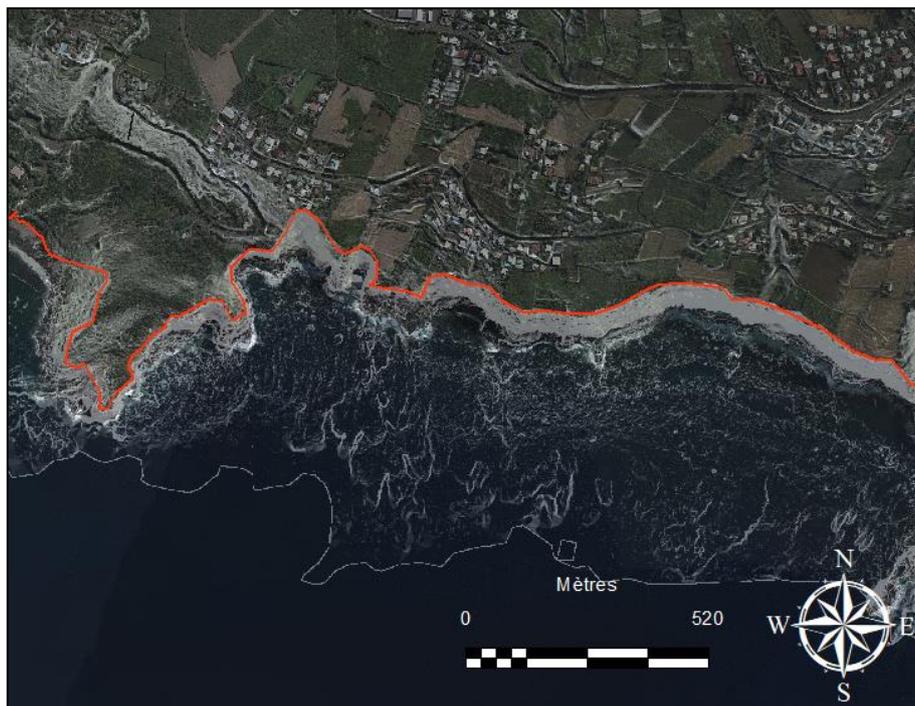


Figure 35 : Rupture de pente mise en évidence à partir du MNT Litto3D de l'IGN, utilisée comme trait de côte de référence pour la projection du Lr (2017)

Caractérisation du recul du trait de côte par secteurs

Secteur 1 : de la ravine de l'Anse au cap de l'Abri

Indicateur de trait de côte : Rupture de pente et limite de végétation.

Trait de côte de référence : Moyenne des traits de côte historiques.

N°	Nom	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné (m)	Lmax (m)	Lr (m)
1	CRB	Côte rocheuse basse	-5	-5	-10

Tableau 12 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 1

Le secteur CRB est celui où sont localisés le plus d'habitations au bord de la côte. L'évolution du trait de côte de 1950 à 2017 a montré un recul du trait de côte de 0,05 m par an. Le 100Tx est donc de 5m. Le Lmax, recul lié à un événement tempétueux majeur, est de 5 m pour les côtes rocheuses et est appliqué pour le calcul du recul du trait de côte futur (Lr). L'aléa recul de trait de côte dans 100 ans a donc été positionné 10 m derrière le trait de côte de référence (Tableau 12).

Secteur 2 : du cap de l'Abri au Piton de Grande Anse

Indicateur de trait de côte : Rupture de pente et limite de végétation.

Trait de côte de référence : Moyenne des traits de côte historiques

N°	Nom	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné (m)	Lmax (m)	Lr (m)
2	P	Plage sableuse	0	-10	-10

Tableau 13 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 2

Le secteur n°2 correspond à la plage de Grande Anse, aucun recul significatif n'a été constaté dans l'évolution des traits de côtes historiques. par conséquent seul le Lmax (-10 m pour les côtes sableuses) est conservé et projeté à partir de la limite de végétation afin de prendre en compte les événements extrêmes capables d'impacter directement le haut de plage par principe de précaution (Tableau 13)

De plus, l'inspection du site en septembre 2022 a montré des signes d'érosion du haut de plage. (Figure 24).

Secteur 3 : du Piton de Grande Anse au cap la Source

Indicateur de trait de côte : Rupture de pente et limite de végétation.

Trait de côte de référence : Moyenne des traits de côte historiques

N°	Nom	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné (m)	Lmax (m)	Lr (m)
3	PR	Pic Rocheux	-10	-5	-15

Tableau 14 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 3

Le secteur n°3 correspond au pic rocheux de Grande Anse. Un recul de 10 m a été calculé à partir de l'évolution des traits de côte historiques et un Lmax de 5 m est ajouté au calcul de l'évolution du trait de côte dans 100 ans (correspondant au Lmax des côtes rocheuses). Ainsi Lr est placé à 15 m à partir du trait de côte de référence (Tableau 14).

Secteur 4 : du cap la Source à la Ravine de Manapany

Indicateur de trait de côte : Rupture de pente et limite de végétation.

Trait de côte de référence : Moyenne des traits de côte historiques

N°	Nom	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné (m)	Lmax (m)	Lr (m)	Lr CC (m)
4	F	Falaise	-20	-5	-25	-65

Tableau 15 - Caractérisation du recul du trait de côte Petite-Île secteur 4

L'analyse des traits de côtes historiques du secteurs n°4 à conduit à un 100Tx de 20m. Le Lmax étant de 5m pour les côtes rocheuses, le Lr calculé est de 25 m en arrière du trait de côte historique (Tableau 15).

La cartographie SIG de ces valeurs est réalisée par l'utilisation de l'outil « buffer » consistant à créer une zone tampon (selon la valeur L_r) sur le secteur considéré à partir du trait de côte de référence. Un extrait de la cartographie du zonage de l'aléa recul du trait de côte sur le secteur n°4 est présenté Figure 36.

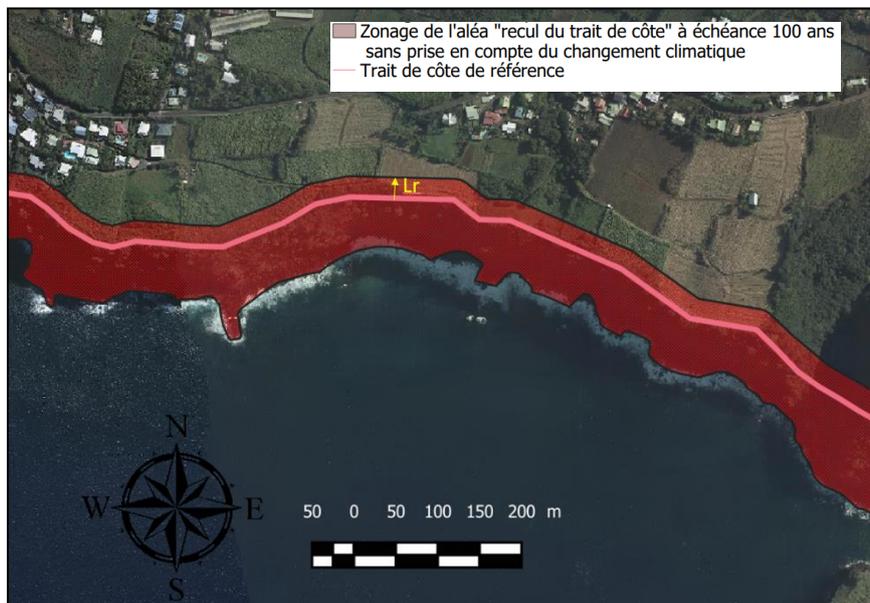


Figure 36 - Extrait cartographique de l'aléa recul du trait de côte sur le secteur de n°4 (fond : orthophotographie, IGN 2017)

Lorsque le passage d'un secteur à un autre ne coïncide pas avec une limite physique (cap rocheux, embouchure), une zone de transition est appliquée pour ne pas cartographier un zonage « en marche d'escalier ». La distance de transition équivaut à environ 10 fois le décalage entre deux secteurs (pour un écart de 5 m, la zone de transition s'étale sur 50 m ; pour 10 m sur 100 m (Figure 37); etc.).

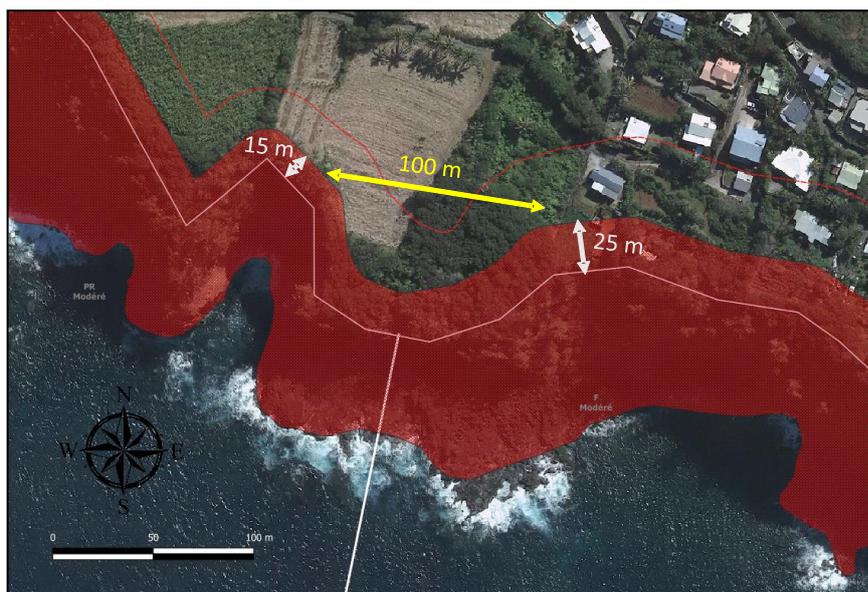


Figure 37 - Extrait cartographique de la jonction de l'aléa recul du trait de côte entre le secteur 3 et le secteur 4 (fond : orthophotographie, IGN 2017)

Lorsque les aménagements présents sur le littoral se caractérisent par des ouvrages légers de particuliers (murs, palissades), ces aménagements ne sont pas considérés comme des ouvrages de défense au sens du guide national de mai 2014 car ils n'ont pas été spécifiquement conçus pour lutter contre l'érosion. Pour les plus gros ouvrages, bien qu'ils puissent contenir localement le recul du trait de côte, leur faible étendue ne garantit pas qu'à long terme l'érosion n'affecte pas les espaces situés en arrière en les contournant. Conformément aux recommandations du guide national, ces ouvrages ne sont pas pris en compte pour corriger le zonage.

Zonage du recul à échéance 2100 avec prise en compte du changement climatique (+60 cm d'élévation du niveau de la mer)

Faute de consensus scientifique sur la méthode pour déterminer la zone qui pourrait être érodée du fait du changement climatique (**Lr CC**), qui plus est dans le contexte spécifique de La Réunion, le guide national⁶ propose d'appliquer :

- une règle de trois entre les +60cm d'élévation du niveau de la mer attendu pour 2100 et les +20 cm enregistrés le siècle dernier, ce qui revient à tripler le recul 100Tx entre 2008 et 2100 (sans Lmax) ; ou si celui-ci est nul, à tripler le Lr (équivalent du Lmax).

Le principe de la règle de trois a donc été appliqué sur la commune de Petite-Île (cartographie avec l'outil *buffer*).

L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau ci-dessous (Tableau 16) :

N°	Nom	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné (m)	Lmax (m)	Lr (m)	Lr CC (m)
1	CRB	Côte rocheuse basse	-5	-5	-10	-20
2	P	Plage sableuse	0	-10	-10	-30
3	PR	Pic Rocheux	-10	-5	-15	-35
4	F	Falaise	-20	-5	-25	-65

Tableau 16 - Synthèse des résultats de la caractérisation du recul du trait de côte sur Petite-Île

Résultats cartographiques

Concernant l'aléa recul du trait de côte, il n'existe pas de gradation du niveau d'intensité de l'aléa : soit les terrains restent en place à échéance 2100, soit ils se trouvent emportés par les phénomènes érosifs. La règle appliquée en accord avec les textes nationaux consiste donc à ne définir qu'un seul niveau d'intensité érosive forte sur les cartes d'aléas, et pour chacun des deux scénarios court et long terme.

Les résultats sont présentés sous la forme de deux types de cartes :

⁶ Analyse et cartographie des aléas littoraux pour l'élaboration des PPRL – Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – Septembre 2012 – 146 p

- une carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte au 1/10 000 (Annexe 1) contenant les différents traits de côtes historiques, les limites des cellules hydrosédimentaires et des secteurs à comportement homogène ainsi que les classes de vitesses de recul associées (cf. Figure 34) ;
- une carte de l'aléa recul du trait de côte au 1/5 000 (Annexe 2) contenant le trait de côte de référence (2008), le zonage de l'aléa à échéance 2100 (qualification en aléa fort uniquement), la limite de l'aléa avec prise en compte du changement climatique (cf. Figure 38).

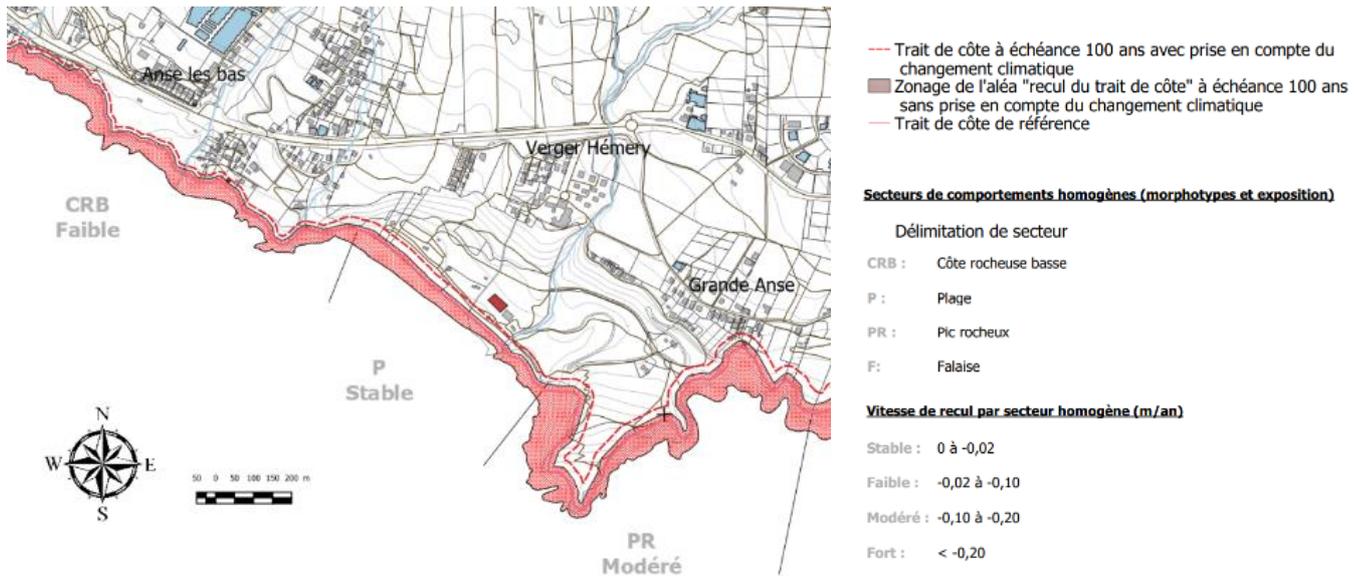


Figure 38 – Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur le secteur de Cap Jaune (cf. Annexe 2)

5.3. ALEA SUBMERSION MARINE

5.3.1. Cadre méthodologique national

La méthodologie pour l'aléa submersion marine s'appuie sur la circulaire *relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPRL* publiée le 27 juillet 2011 et sur le guide d'élaboration des PPRL (DGPR, mai 2014). Les éléments à intégrer sont :

- la dynamique de submersion avec la prise en compte distincte des modes de submersion par débordement ou franchissement (rôle de la houle) et l'estimation de la hauteur et vitesse de l'écoulement ;
- le choix de l'évènement naturel de référence selon l'estimation des couples houle/niveau de la mer ;
- la prise en compte des ouvrages et des défaillances associées (brèches, ruines) ;
- l'interaction avec le trait de côte et la prise en compte des cordons naturels ;
- la prise en compte du changement climatique.

La méthodologie globale et les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le Tableau 17 suivant et précisés dans le chapitre 5.3.2 et 5.3.3. :

Etape 1	Détermination des scénarios				
Collecte des données historiques	Cartographies	Documents écrits (rapports, presse, catnat, autre)		Photographies	Témoignages
Définition des modes de submersion	Débordement (surverse)	Franchissement (action de la houle)		Rupture du système de protection (digue)	Concomitance avec d'autres types d'inondation (cours d'eau, nappes)
Analyse de la morphologie du terrain	Détermination des points d'entrée d'eau possibles (points bas)		Identification des zones de stagnation de l'eau (cuvettes)		Identification des zones de projections de matériaux (sable, galets, coraux)
Prise en compte des ouvrages ou cordon naturel à vocation de protection	Oui (hypothèse de défaillance)		Non (absence de structure de protection au sens du texte)		
	Brèche	Ruine (dès surverse de 20 cm)			
Prise en compte des cordons naturels	Oui (interaction avec l'évolution du trait de côte)		Non (absence de cordon naturel)		
Etape 2	Choix de l'évènement naturel de référence				
Période de retour	Evènement théorique centennal (basé sur la résultante de chacun des couples centennaux niveau marin / houle)		Evènement historique (>= centennal)		Autre évènement plus fréquent ou plus extrême (décennal, millennial)
Prise en compte des incertitudes	Marge d'erreur calculée		Marge de sécurité forfaitaire (niveau marin de référence +25cm)		
Prise en compte du changement climatique	Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer à long terme (+ 20 cm pour une première prise en compte du changement climatique et +60 cm à échéance 2100)			Prise en compte des variations altimétriques (subsidence/surrection)	
Prise en compte des interactions en estuaire, delta et lagune	OUI (détermination du niveau de référence par calcul des couples niveau / débit)			NON	
Etape 3	Caractérisation de l'aléa				
Type de méthode	Débordement	Franchissements			
	Superposition topographie / niveau de référence	Formules empiriques (wave set-up et run-up)		Modèle numérique (casier, vague à vague en 1D ou 2D)	Valeur forfaitaire de franchissement (25m ou 50m en contexte cyclonique)
Prise en compte des structures de protection (digues)	Estimation simple ou forfaitaire (L = 100 x h ou >= 50 m)		Eléments techniques fournis par le gestionnaire		Etude de sensibilité (calculs, modélisation)
Etape 4	Qualification de l'aléa				
Paramètres de qualification (a minima pour du fort et du moyen)	Hauteur d'eau (0.5>h>1 m)	Dynamique de submersion		Adaptation à dire d'expert (ouvrages de protection, particularités topographiques, données historiques)	
		Vitesses (0.2>v>0.5 m/s)	Durée		
Etape 5	Résultat cartographique				
Carte de synthèse	Mode de submersions, données historiques, points d'entrée, zones de projection, zones d'interaction entre le trait de côte et la submersion, ouvrage de protection				
Cartes de zonage de l'aléa	Carte d'aléa de référence		Carte d'aléa 2100		Cartes d'aléa autre que centennal

Tableau 17 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude)

5.3.2. Méthodologie et scénarios

Les phénomènes de submersion sur la commune

Le préalable étant de déterminer le mode de submersion, il est considéré qu'à La Réunion, hormis pour la zone interne des étangs qui peut subir des débordements liés à la surcote de tempête sans action des vagues, c'est le franchissement par les vagues qui impacte l'ensemble du linéaire côtier de l'île.

Pour la submersion par débordement, la méthode consiste à croiser sous SIG le niveau marin de référence avec la topographie côtière.

Pour la submersion par franchissement, plusieurs méthodes d'estimation sont possibles. Les formules empiriques de calcul du run-up⁷ telles que Stockdon *et al.* (2006) ont été utilisées à La Réunion (De la Torre et Louzé, 2008). Cependant, elles ne s'appliquent pas dans les environnements récifaux ou lorsque la houle est très fortement diffractée et ne permettent pas de quantifier la hauteur d'eau et les vitesses d'écoulement.

La modélisation numérique est donc préférée car elle permet d'intégrer les spécificités du littoral de Petite-Île. Les simulations de propagation de la houle sont réalisées à partir du chaînage du modèle de vague spectral mis en place pour l'étude HOULREU (Pedreros *et al.*, 2009) avec un modèle dit « vague à vague » capable de calculer la submersion marine par franchissement. Pour cette commune, les modélisations ont été réalisées en 1D (profils).

Choix de l'événement naturel de référence

Afin de déterminer les caractéristiques d'un événement centennal, les calculs de probabilités conjointes (houle/niveau marin extrême, périodes de retour) nécessitent un nombre important d'événements observés. A La Réunion, les données concernant les événements cycloniques ne sont disponibles que depuis la fin du XX^{ème} siècle, et les cyclones y restent peu fréquents (comparativement aux tempêtes métropolitaines). Les données disponibles rendent donc incertains les calculs d'extrêmes par cette approche. On adopte donc une approche historique en sélectionnant les événements passés les plus dommageables comme scénarios de référence.

Le mode de submersion prépondérant étant le franchissement suite au déferlement des vagues, l'évènement naturel de référence est donc déterminé à partir de l'analyse comparative d'évènements historiques majeurs pour différents régimes de houles extrêmes (Lecacheux *et al.*, 2012). Pour le littoral de Petite-Île, l'évènement de référence est donc basé sur **les houles cycloniques de Hollanda** comme pour tous les secteurs au Sud de la pointe de l'Etang Salé. Hollanda a généré des houles plus énergétiques que l'évènement de houles australes de 2007 qui a également impacté la commune (Figure 39).

⁷ Run-up : altitude maximale atteinte par le jet de rive sous l'action des vagues.

L'événement naturel de référence est construit également avec un niveau de la mer de référence (marée + surcote) présenté en 5.3.3.

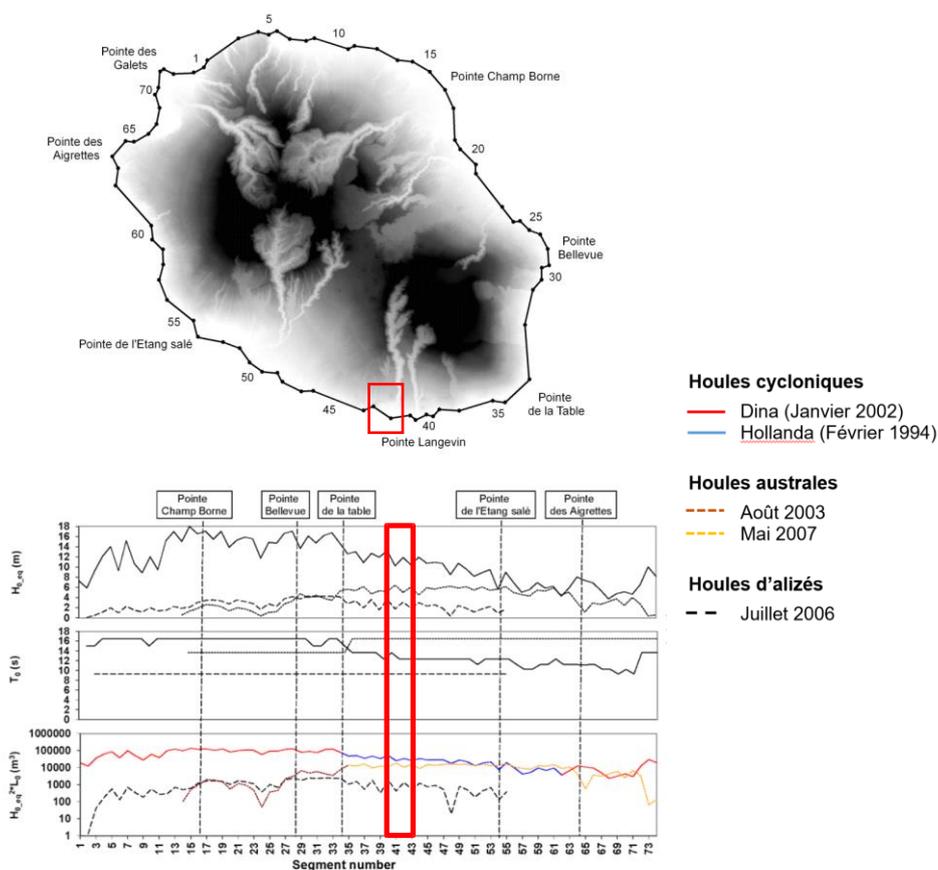


Figure 39 – Comparaison des houles engendrées par différents événements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – Les paramètres comparés pour le linéaire côtier de Petite-Île sont dans l'encadré rouge. (Lecacheux et al., 2012)

Scénarios de référence et prise en compte du changement climatique

Sur la base de cet événement naturel de référence, et conformément au *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux* (DGPR, 2014), deux scénarios sont ensuite considérés avec des hypothèses différentes permettant de tenir compte du changement climatique et de son impact sur l'élévation du niveau marin (cf. Figure 40) :

- **Un scénario de référence** intégrant une hypothèse d'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique de 20 cm intégrée au niveau marin de référence
- **Un scénario à échéance 100 ans** intégrant une hypothèse d'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique de 60 cm (dont les 20 cm intégrés au scénario de référence).

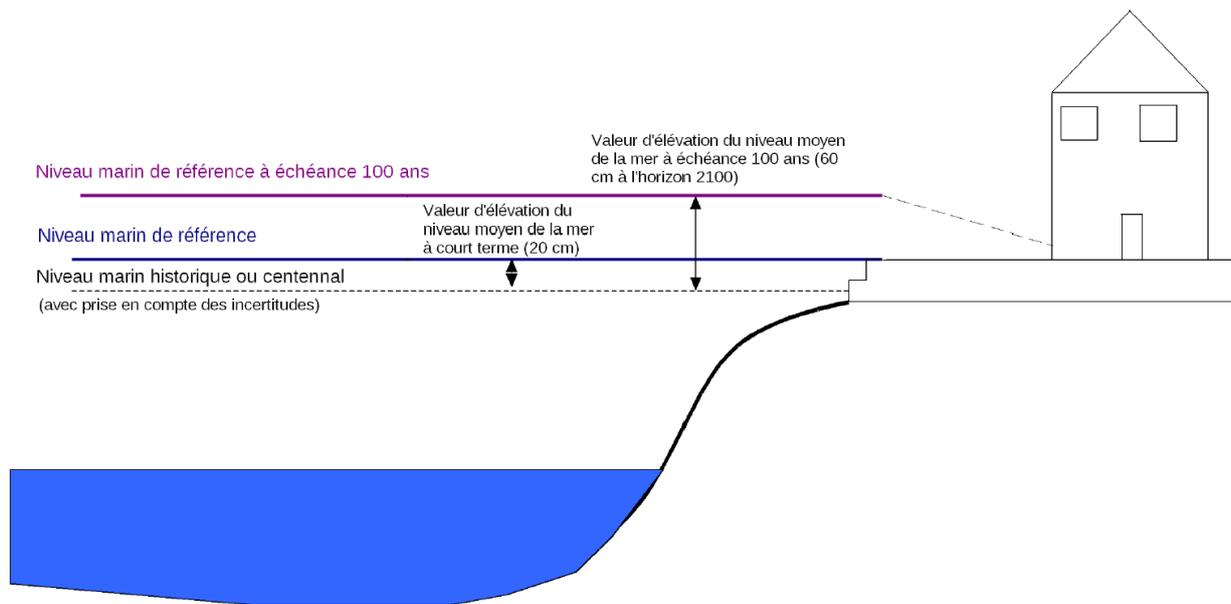


Figure 40 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2012)

5.3.3. Modélisation des submersions marines de référence

Données topo-bathymétriques

Les données bathymétriques utilisées dans le cadre de cette étude sont issues soit de l'étude HOULREU précédente (Pedreros *et al.*, 2009), donc des sondes du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), soit du programme Litto3D dont les données ont été livrées par le SHOM et l'IGN à la DEAL Réunion.

Les données topographiques utilisées sont celles issues du programme Litto3D (levés Lidar à haute résolution). Pour les simulations 1D, les bâtiments n'ont pas été pris en compte, et seule la topographie issue du MNT Litto3D a été utilisée.

En 2D, les bâtiments susceptibles d'interagir avec les écoulements à terre sont pris en compte à travers la réalisation d'un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) à partir de la BDTopo (IGN), des données Litto3D. Les principales étapes nécessaires à cette construction, développées dans le cadre du projet ALDES (Alerte descendante aux tsunamis en Méditerranée Occidentale : Le Roy *et al.*, 2012), sont schématisées dans la Figure 41 :

- Dans le MNE « brut » issu de Litto3D sont intégrés aussi bien le bâti que les arbres, les voitures, etc... Le croisement avec la couche « bâti » de la BDTopo 2008 de l'IGN permet d'en extraire les éléments correspondant strictement aux bâtiments.
- La superposition de cette couche « bâti 3D » au MNT généré avec les données Litto3D et les sondes Histolitt permet d'établir un MNE ne prenant en compte comme « sursol » que le bâti.
- Enfin, des corrections manuelles peuvent être nécessaires pour tenir compte des bâtiments et/ou ouvrages qui ne figurent pas dans la BDTopo de 2008.

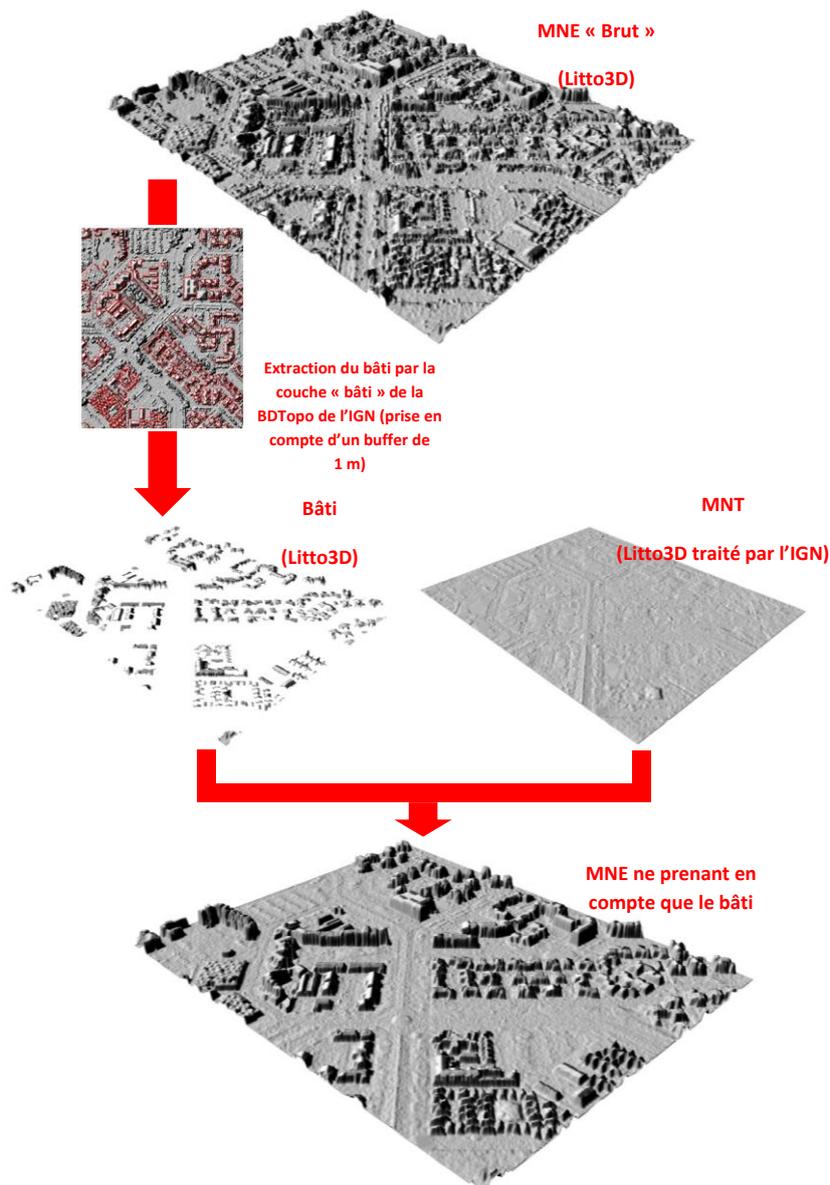


Figure 41 - Principales étapes nécessaires à la construction du MNE (Le Roy et al., 2012)

Références altimétriques

Les références altimétriques utilisées pour cette étude sont issues du document de référence publié par le SHOM (SHOM, 2011). Seuls trois sites y sont référencés pour l'île de La Réunion : il s'agit des ports de la Pointe des Galets, de Saint-Leu et de Saint Pierre. Le port de Saint-Pierre est la référence pour cette étude (Tableau 18).

Site	Plus haute mer astronomique (m/ ZH)	Moyenne des plus hautes mers journalières (m/ ZH)	Niveau moyen (m/ZH)	Moyenne des plus basses mers journalières (m/ ZH)	Plus basse mer astronomique (m/ ZH)	ZH / 0 IGN89 (m)
Saint-Pierre	0,92	0,70	0,50	0,20	0,02	-0,554

Tableau 18 - Références altimétriques maritimes pour les sites de Saint-Leu et Saint-Pierre : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et Zéro IGN89 (SHOM, 2011)

Pour mémoire, on retiendra que le niveau de plus haute mer astronomique (marée) se situe dans le secteur d'étude aux alentours de +0,36 m IGN89⁸.

Niveaux d'eau considérés

Dans le modèle numérique, les niveaux d'eau ont été choisis à partir de l'événement naturel de référence, le cyclone Hollanda :

- Le niveau de marée prédite est calculé à l'aide du logiciel SHOMAR du SHOM à Saint-Pierre, à l'heure du pic estimé de la houle lors de l'événement ; ce niveau de marée est ensuite ramené au zéro IGN89 par l'intermédiaire des références altimétriques présentées au Tableau 19.
- La surcote atmosphérique est prise en compte à partir des données disponibles pour l'événement considéré.

La prise en compte de l'élévation du niveau marin due au changement climatique se décline au travers des deux scénarios décrits précédemment : le scénario de référence et le scénario à échéance 100 ans.

Au final, les niveaux considérés sont donc les suivants :

Événement de référence (secteurs)	Marée prédite (SHOMAR, /ZH)	Surcote atmosphérique	Niveau marin du scénario de référence (/0 IGN89)	Niveau marin du scénario à échéance 100 ans (/0 IGN89)
Cyclone Hollanda	+0,86 m (11/02/1994 à 09h00 TU)	+0,48 m	+0,99 m	+1,39 m

Tableau 19 - Niveaux marins retenus pour la simulation de submersion

Stratégie de modélisation : Méthode adoptée pour les simulations

Localisation de la simulation

Petite-Île est majoritairement composée de côtes rocheuses mais présente une plage de sable corallien. Le transect pour la simulation de la submersion a été réalisé sur cette dernière (Figure 42).

⁸ Ce niveau est exactement à +0,32 m IGN89 à St Leu et à 0,366 m IGN89 à Saint-Pierre.

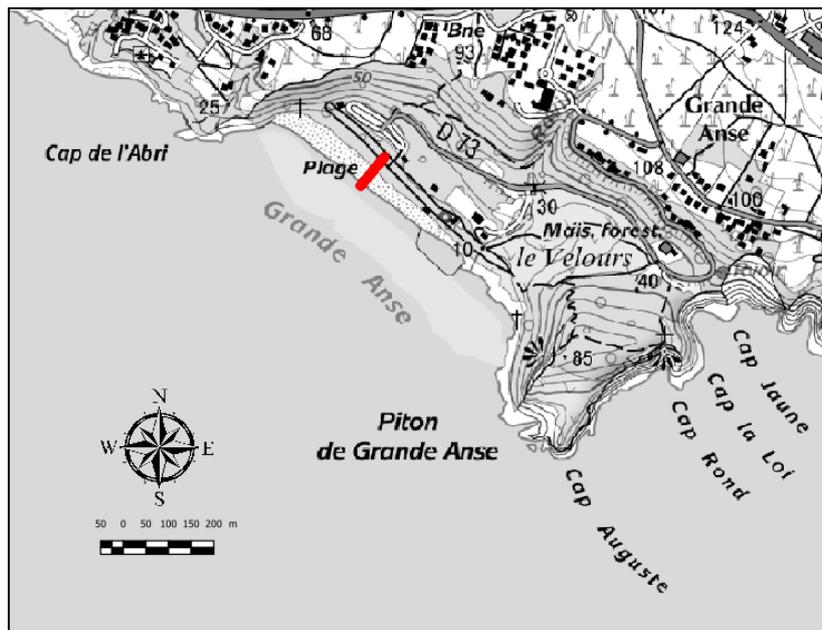


Figure 42 – Localisation du transect de la simulation 1D à Petite-Île (Profil 7) en rouge (Fond SCAN25 ©IGN, 2015)

Méthode adoptée pour les simulations en 1D

La méthode mise en œuvre s'appuie sur les résultats de l'étude HOULREU du BRGM (grilles R2O et R2S à résolution 90 m, Pedreros *et al.*, 2009). Pour les simulations, compte-tenu des incertitudes et afin de simplifier la démarche, les simulations ont été menées directement à partir des houles de référence publiées par Lecacheux *et al.* (2012) suite à l'étude HOULREU : les caractéristiques des houles au large pour chaque événement avaient été corrigées pour estimer les caractéristiques des vagues équivalentes orthogonales à la côte au large. L'utilisation de ces résultats permet de simuler la propagation des vagues depuis le large jusqu'à la côte directement en 1D avec le code SWAN.

La démarche pour les simulations 1D de la submersion peut finalement être fragmentée en 3 principales étapes, toutes étant menées en régime stationnaire, éventuellement suivies d'une quatrième étape (simulation en régime instationnaire) suivant les résultats obtenus :

- **propagation du spectre des vagues du large à la côte avec le code SWAN** en 1D, en conditions « maximisantes » (associant pic des vagues et niveau d'eau maximal, même si les deux phénomènes ne se sont pas produits simultanément lors de l'événement historique de référence, le cyclone Hollanda) à partir du calcul des houles équivalentes au large orthogonales à la côte (Lecacheux *et al.*, 2012) ;
- **génération de séries temporelles** au-delà de la zone de déferlement (à une profondeur inférieure à 1m) pour générer des données d'entrée pour le modèle vague-à-vague SURFWB ;
- **simulation de la submersion en 1D avec le code SurfWB sur une durée de 30 minutes** (en conditions maximisantes), ce qui correspond à une centaine de vagues afin d'obtenir un nombre de vagues représentatif des phénomènes ;
- selon les résultats sur 30 minutes :

- si aucun franchissement n'est constaté pour les conditions « maximisantes », ce résultat constitue le résultat final et permet de déterminer le run-up maximal atteint par les vagues ;
- si par contre un franchissement est constaté, il est nécessaire pour quantifier le volume d'eau à terre, d'effectuer des **simulations en conditions instationnaires** (i.e. dont les conditions en termes de niveau d'eau et de caractéristiques des vagues évoluent au cours du temps) ; ces simulations permettent d'accéder aux instants auxquels le franchissement débute et s'achève, et aux débits franchissants ainsi qu'aux vitesses et hauteurs d'eau associées.

Simulations SWAN en 1D

Les calculs sont tout d'abord menés à l'aide du code SWAN en 1D (Booij *et al.*, 2004), en conditions stationnaires dans des conditions « maximisantes ». Le code SWAN permet alors de propager les spectres de houles depuis le large jusqu'à la côte.

Les simulations des houles du cyclone Hollanda menées lors de l'étude HOULREU (résolution de 90 m, grilles de calcul notées R2O et R2S dans Pedreros *et al.*, 2009) et modifiées par Lecacheux *et al.* (2012) pour calculer les houles de référence au large orthogonales à la côte, sont exploitées suivant les 2 scénarios envisagés (scénario de référence et scénario à échéance 100 ans).

Ces caractéristiques des houles de référence au large sont utilisées comme forçages pour SWAN sur les profils (à des profondeurs de l'ordre de 60 m), moyennant l'utilisation de spectres de Jonswap. La propagation des spectres depuis le large jusqu'à la côte est menée à une résolution de 1 m le long du profil, et permet de connaître les principales caractéristiques des vagues le long du profil dans les deux scénarios étudiés, et notamment :

- Les spectres des vagues et les hauteurs significatives et périodes associées ;
- Les hauteurs significatives des vagues ;
- Le set-up (surcote induite par le déferlement des vagues).

Les caractéristiques des houles de référence au large exploitées suivant les 2 scénarios envisagés sont présentées dans le Tableau 20 suivant. Ces caractéristiques ont été utilisées comme forçages pour SWAN sur le profil.

Lieu	Segment identifié par Lecacheux et al. (2012)	HS (m)	Tp (s)
Petite-Île	45	10,74	12,38

Tableau 20 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : caractéristiques des vagues équivalentes au large orthogonales à la côte utilisées en forçage du profil (d'après Lecacheux et al., 2012)

L'analyse des résultats permet d'identifier les zones de déferlement des vagues. Une extraction des spectres est réalisée après cette zone pour le profil 7 pour les deux scénarios, afin de réaliser le chaînage avec le code SurfWB (qui ne prend pas en compte le phénomène de déferlement).

Génération d'une série temporelle

Les caractéristiques des spectres issues des calculs menés sous SWAN (hauteurs significatives et périodes-pic des vagues) sont ensuite utilisées pour reconstituer des séries temporelles de vagues conformes à ces caractéristiques au-delà de la zone de déferlement (à une profondeur inférieure à -1m NGR), pour chaque profil et pour chaque niveau d'eau considéré. Les séries temporelles ont été reconstituées sur des durées de 30 minutes, de manière à assurer un nombre de vagues supérieur à 100 pour une représentativité suffisante. Ces vagues sont ensuite utilisées avec le code SurfWB (Marche et al., 2007) pour simuler la propagation des vagues après le déferlement.

Les caractéristiques des spectres sont utilisées pour reconstituer des séries temporelles de vagues conformes à ces caractéristiques, pour chacun des 2 scénarios.

Chaque série temporelle est ensuite « rétro-analysée » de manière à vérifier la cohérence entre les paramètres issus de SWAN et ceux propres aux séries temporelles générées. Ces comparaisons sont présentées dans le Tableau 21.

	Profil Petite-Île (Scénario référence +20 cm)			Profil Petite-Île (Scénario échéance à 100 ans +60 cm)	
	Hs (m)	Tmoy (s)		Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	2,03	11,62	SWAN	2,25	11,6
Série tempo	1,93	11,48	Série tempo	2,17	11,6
Ecart	0,09	0,14	Ecart	0,07	0

Tableau 21 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée du profil de Petite-Île calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour les 2 scénarios (court-terme et long-terme)

Simulation de la submersion en 1D en conditions stationnaires sur une durée de 30 minutes

Le code SurfWB (Marche *et al.*, 2007) permet de simuler la propagation des vagues depuis le point d'entrée du profil (après déferlement) jusqu'à la côte, puis, par la mise en place de schémas à capture de choc et bien équilibrés (« Well-balanced »), il permet de simuler le comportement des vagues sur le rivage (jet de rive, submersion...). Ce code est utilisé par le BRGM en une dimension ou en deux dimensions pour simuler des submersions générées soit par des tempêtes ou cyclones (tempête de 1982 à Palavas-les-Flots : Pedreros *et al.*, 2011 ; cyclones tropicaux en Polynésie Française : Pedreros *et al.*, 2010) soit par des tsunamis (tsunami de l'aéroport de Nice en 1979 : Le Roy *et Pedreros*, 2011).

En une dimension, le code SurfWB prend en compte une friction au fond homogène par l'intermédiaire d'un coefficient de Manning. La valeur retenue dans cette étude est $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$, correspondant à un fond naturel relativement irrégulier (quelques pierres, algues...).

Les résultats obtenus par ces simulations permettent de connaître à tout instant la surface libre de l'eau le long du profil observé (cf. Figure 43), et d'en tirer des animations retraçant les mécanismes mis en jeu. Les résultats permettent également de connaître, pour chaque profil et chaque niveau d'eau, les caractéristiques globales de la simulation (setup, cotes maximales et minimales de l'eau le long du profil, courants maximaux en flux et en reflux) (Figure 44).

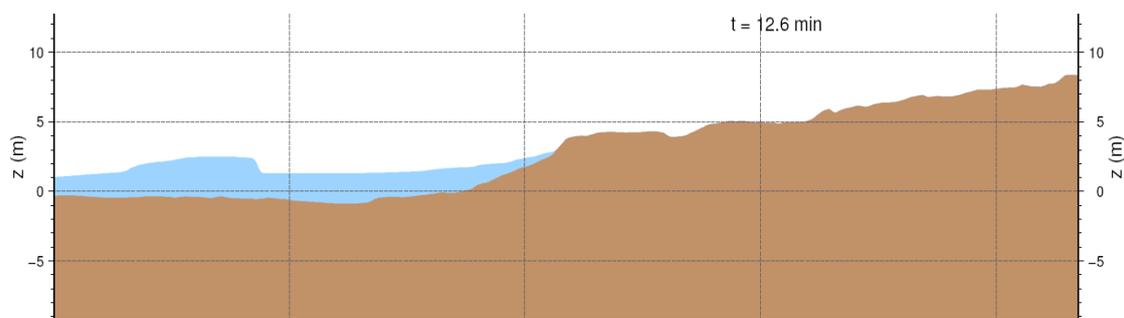


Figure 43 - Exemple d'un aperçu de la propagation des vagues (Profil 8 St Joseph)

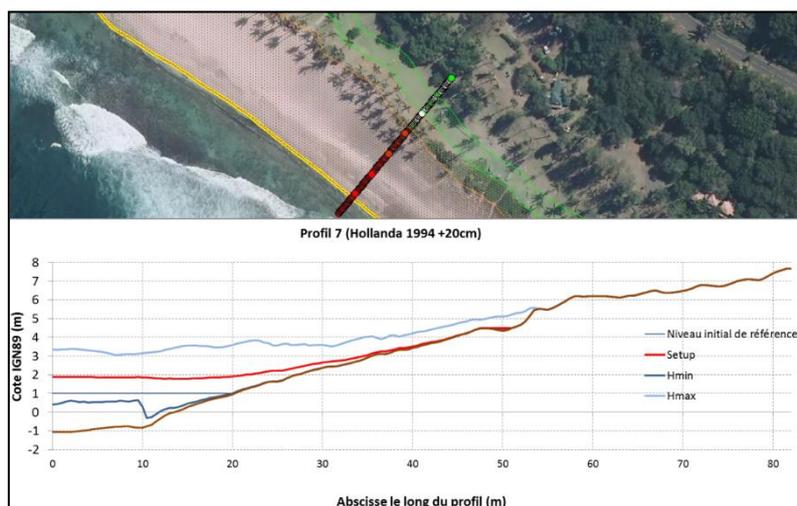


Figure 44 - Profils de plage, setup, Hmin et Hmax avec simulation du cyclone Hollanda + 20 cm profil 7 Petite-Île

S'il n'y a pas de franchissement pour ces conditions maximisantes, alors ces résultats constituent le résultat final des simulations, fournissant le run-up maximal atteint par les vagues.

5.3.4. Résultat des simulations 1D des houles cycloniques de référence à Petite-Île

Simulations de submersion en conditions stationnaires sur 30 minutes

Les simulations de submersion en 1D ont été menées en utilisant des séries temporelles de 30 minutes reconstituées à partir des spectres de houles calculés par le code SWAN, en conditions maximisantes. Les niveaux d'eau utilisés sont de 0,99 m pour le scénario de référence et de 1,64m pour le scénario à échéance 100 ans.

Sur Petite-Île, (Figure 45), la simulation sur 30 minutes montre l'altitude maximum du run-up obtenu. Il s'agit du résultat final de cette modélisation.

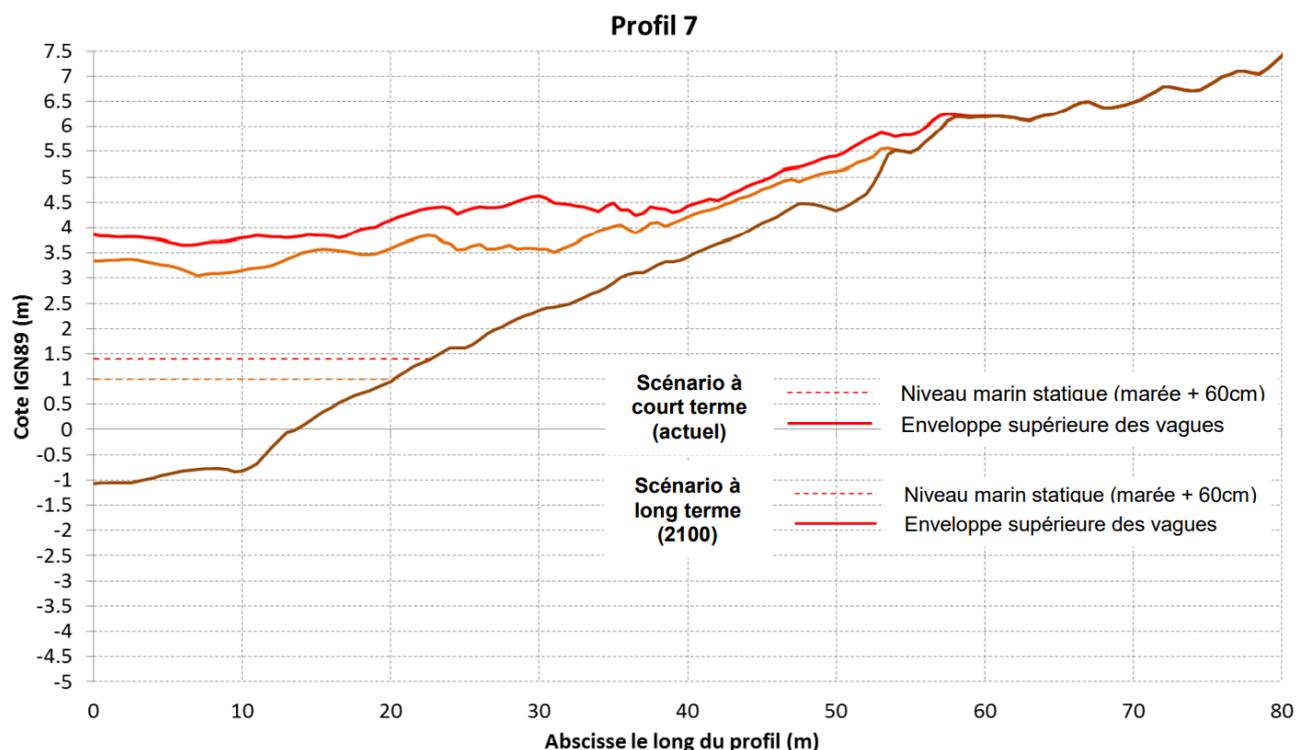


Figure 45 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 7 pour les 2 scénarios pour 30 minutes simulées

Il apparaît que la submersion est soumise à un contrôle topographique assez marqué, avec un écart relativement faible entre les scénarios à court-terme et à long-terme (Figure 45). Dans le scénario à court-terme, les vagues peuvent directement atteindre les premiers arbres, situés à environ 50 m du trait de côte. Dans le scénario à long-terme les vagues peuvent dépasser de quelques mètres cette première ligne d'arbres.

Synthèse

Le Tableau 22 synthétise les résultats obtenus pour chaque scénario en termes de cote moyenne atteinte par les vagues (reflétant ainsi le niveau moyen de l'eau) et de cote maximale atteinte à terre correspondant au jet de rive des vagues les plus fortes.

Profil	Scénario à court-terme		Scénario à long-terme	
	Altitude moyenne atteinte à terre par les vagues (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte à terre par les vagues (m, IGN89)	Altitude moyenne atteinte à terre par les vagues (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte à terre par les vagues (m, IGN89)
7 (Petite-Île)	4,5	5,5	4,9	6,2

Tableau 22 - Événement de référence « cyclone Hollanda » : synthèse des résultats obtenus pour le profil 7 pour chaque scénario.

5.3.5. Données historiques et validation

Les sources d'information exploitées dans le cadre de cette étude concernant les événements de référence sont les suivantes :

- Le recensement détaillé (typologie) et géolocalisé (couche SIG) des dégâts liés aux houles australes de 2007 (Hydretude, 2007) ;
- Prise de contact avec les services techniques communaux ;
- Visites et enquêtes de terrain sur les différents sites sensibles ;
- Revue de presse « dans la tourmente » de la DEAL.

L'ensemble des informations recueillies et géolocalisables sont synthétisées dans l'annexe 3.

5.3.6. Zonage cartographique de l'aléa submersion marine

Qualification de l'aléa

La qualification de l'aléa repose sur la prise en compte de la dynamique de submersion de la manière suivante (Tableau 23):

		Dynamique de submersion		
		Lente	Moyenne	Rapide
Hauteur d'eau (m)	H<0,5	Faible	Modéré	Fort
	0,5<h<1	Modéré	Modéré	Fort
	H>1	Fort	Fort	(Très) Fort

Tableau 23 - Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (Guide PPRL, MEDDTL, 2014)

En première approche l'aléa est défini à minima par les éléments quantifiés issus de la modélisation numérique de submersion. Ces éléments sont ensuite complétés par des considérations et analyses décrites dans le chapitre suivant.

Traitements et zonages cartographiques

Le zonage est cartographié sous SIG à partir :

- Des données historiques recueillies ;
- Des données issues des modélisations pour le scénario de référence (hauteur et vitesse d'écoulement).

Les résultats des modèles sont traités sous SIG par le croisement des informations de vitesse et de hauteur d'eau pour qualifier l'aléa selon les critères énoncés dans le Tableau 23.

Une analyse de la cohérence de ce premier résultat est ensuite menée en le confrontant avec :

- Les données historiques connues sur le site ;
- Une analyse experte du modèle numérique de terrain pour comprendre les modes d'écoulement des submersions.

Les résultats ainsi obtenus et validés sur le profil 1D sont ensuite étendus et spatialisés suivant une approche iso-altimétrique. L'expertise permet de définir l'emprise et la cohérence de cette spatialisation suivant les typologies des littoraux (plages, talus) et leurs caractéristiques morphologiques (altitude du cordon, points d'entrée d'eau préférentiels, « cuvettes ») identifiées à partir du MNT, des orthophotographies et des reconnaissances de terrain.

A titre d'exemple, pour une zone où les observations historiques font état de dégâts sur le muret d'une habitation en haut du cordon sédimentaire, il est considéré :

- Un aléa fort dans l'espace situé entre la mer et le muret (dynamique de submersion la plus forte) ;
- Un aléa modéré dans la zone franchissable en arrière du muret (dynamique de submersion altérée). A défaut d'information historique disponible, une bande de 10 m de large est ici considérée ;
- Un aléa faible dans la zone de stagnation potentielle de l'eau (dynamique de submersion résiduelle). A défaut d'information historique disponible, une bande de 10 m de large est également ici considérée, celle-ci étant étendue sur les secteurs de stagnation identifiés.

Enfin, un zonage complémentaire suivant la même qualification est réalisé pour l'aléa submersion marine à l'échéance 2100. Il se base sur les écarts des sorties de la modélisation en termes de limite du jet de rive entre les deux scénarios de niveau de la mer (+20 cm pour l'aléa actuel et +60 cm pour l'aléa 2100). Lorsqu'un écart est constaté (< 1 m d'altitude dans la plupart des cas), une bande d'environ 5 m à 10 m de distance est rajoutée en plan en arrière du zonage de référence. Cette distance est adaptée par catégorie d'aléa selon la configuration morphologique du site.

Résultats cartographiques

Pour l'aléa submersion marine, le niveau d'intensité de l'aléa est évalué selon les deux scénarios donnant l'aléa de référence et l'aléa à échéance 100 ans (ou à l'horizon 2100).

Pour chacun des deux scénarios, le niveau d'intensité de l'aléa est décliné en trois niveaux de gradation : faible, modéré et fort, chaque niveau étant associé à des couleurs (respectivement vert, orange et rouge).

Il en résulte la superposition d'un grand nombre d'informations sur les cartes d'aléa submersions marine. Les informations concernant les deux scénarios ci-dessus sont différenciées par l'usage de surfaces colorées pour l'aléa de référence, et de lignes discontinues pour l'aléa à échéance 100 ans (dit aléa 2100).

Les résultats sont présentés sous la forme de deux types de cartes :

- une carte de synthèse au 1/10 000 présentant les modes de submersions, les particularités hydro-morphologiques (point d'entrée d'eau préférentiel, embouchures, dépressions arrière-littorales), les secteurs non soumis à une interaction avec l'évolution du trait de côte et les données historiques disponibles (Figure 46) ;

Modes de submersion marine

L'ensemble de la zone est soumise à une dynamique de franchissement par la houle

Particularités hydromorphologiques

▲ Embouchure de cours d'eau : zone sensible par effet de concomitance des aléas inondation

Interactions avec l'évolution du trait de côte

Les submersions marines sont soumises à une interaction avec l'évolution du trait de côte sur l'ensemble de la zone à l'exception des secteurs présentant les symboles ci-dessous :

- Secteurs non soumis à l'interaction

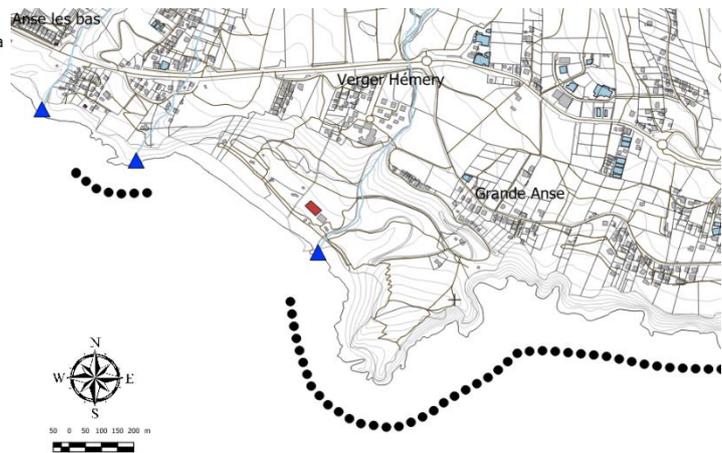


Figure 46 - Extrait de la carte de synthèse de l'historique des dégâts liés à la submersion marine sur la commune de Petite-Île (cf. Annexe 3)

- une carte de zonage au 1/5 000 de l'aléa de référence et de l'aléa à échéance 100 ans (ou aléa 2100) (Figure 47).

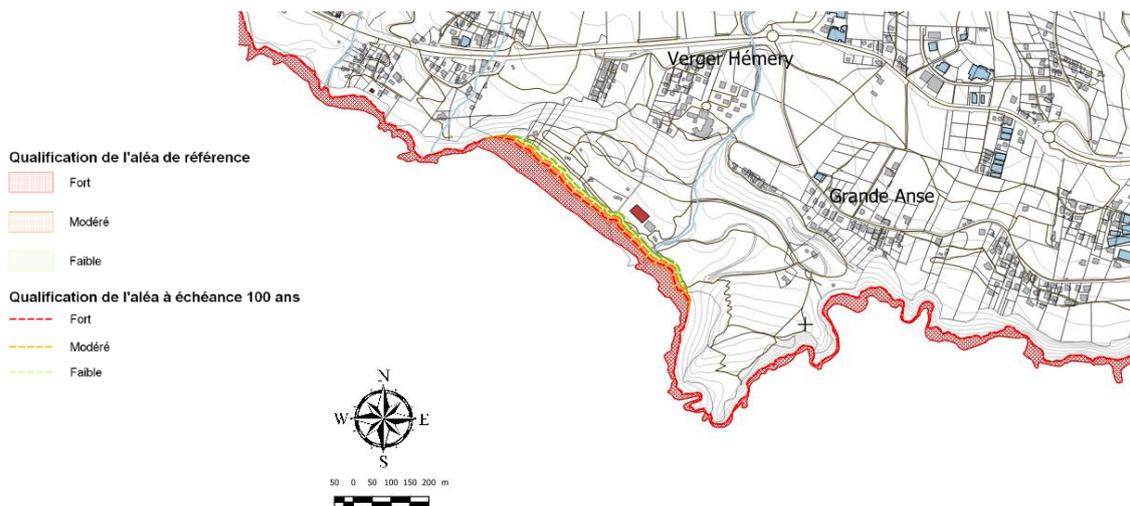


Figure 47 - Extrait de la carte d'aléa submersion marine de la commune de Petite-Île au 1 : 5000

6. Elaboration du zonage réglementaire

6.1. METHODOLOGIE

L'élaboration du zonage réglementaire constitue l'ultime étape cartographique du Plan de Prévention des Risques naturels littoraux. Il permet, en croisant les différentes données d'aléas et d'enjeux à disposition, de définir les secteurs au sein desquels les constructions seront autorisées, interdites ou soumises à prescriptions.

La version finale du guide méthodologique d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (DGPR, mai 2014), précise à ce sujet que *le zonage réglementaire traduit de façon cartographique les choix issus de l'évaluation des risques et de la concertation menée avec l'ensemble des acteurs de la gestion du risque. [...] Il a pour but de définir, dans les zones directement exposées aux risques et le cas échéant, dans les zones non directement exposées, une réglementation homogène comprenant des interdictions et des prescriptions réglementaires.*

La circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux et ses annexes définissent que *le PPRL devra prendre en compte deux aléas distincts, l'aléa de référence [...] et un aléa à l'horizon 2100, avec une progressivité de la réglementation entre les deux conditionnée par le caractère urbanisé ou non de la zone considérée.*

L'élaboration de la cartographie réglementaire du présent PPRL est donc complexe dans la mesure où elle prend en considération cinq types d'information distincts :

1. Deux types d'aléas littoraux : recul du trait de côte et submersion marine ;
2. Deux temporalités pour chacun des deux aléas considérés : l'aléa de référence et l'aléa à horizon 2100 ;
3. Le caractère urbanisé ou non de l'espace étudié.

Un groupe de travail partenarial DEAL/Services techniques de plusieurs collectivités a été mis en place au premier semestre 2015 pour élaborer la trame d'un règlement-type « PPRL littoral » réunionnais. Ce règlement-type a servi de base au projet PPR littoral de la commune de Petite-Ile.

6.1.1. Les espaces urbanisés et non-urbanisés

La prise en considération des espaces urbanisés et non-urbanisés est essentielle dans le cadre de l'élaboration d'un document de risques (Figure 48). Elle a pour vocation de :

1. Ne pas aggraver les risques dans les secteurs non-anthropisés et soumis à un ou plusieurs aléas ;
2. Permettre un développement raisonné des espaces urbanisés soumis à un degré d'aléa faible à modéré, dans la mesure où la protection des biens et des personnes exposées à certains aléas est rendue possible par la mise en place d'un certain nombre de prescriptions.

La délimitation de ces espaces a été faite en intégrant différentes données à disposition, et notamment :

3. Le Schéma de Mise en Valeur de la Mer (SMVM du 22 novembre 2011) élaboré par la Région Réunion, notamment les espaces naturels remarquables du littoral ;
4. Les zones de coupure d'urbanisation du Schéma d'Aménagement Régional (SAR du 22 novembre 2011) élaborée par la Région Réunion ;
5. Les zones naturelles délimitées dans les documents d'urbanismes communaux (Plan Local d'Urbanisme / Plan d'Occupation des Sols) ;
6. La limite des 50 pas géométriques ;

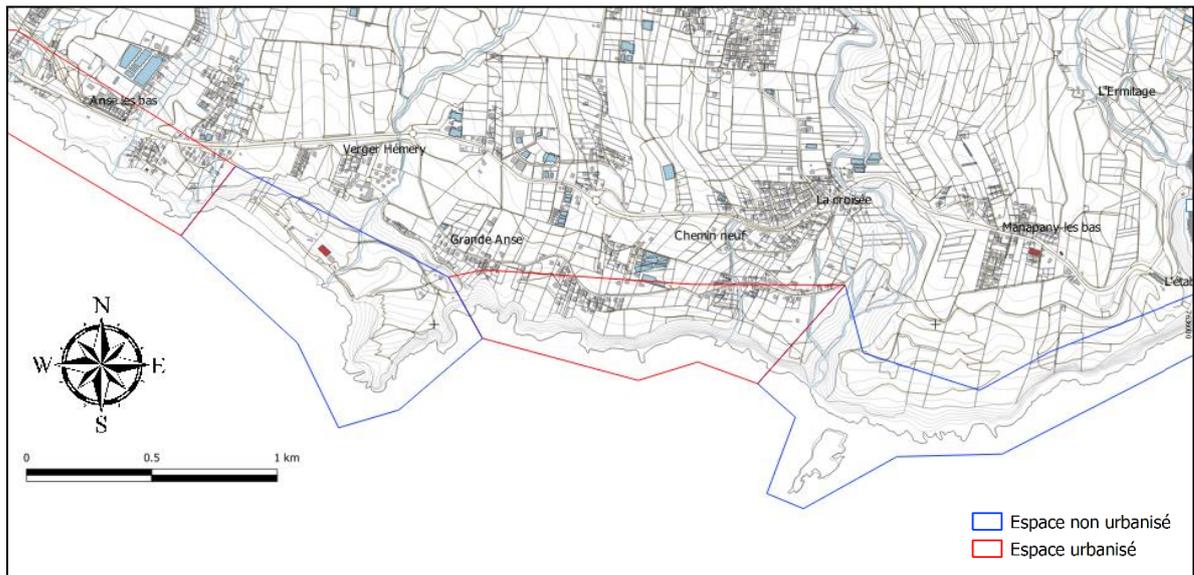


Figure 48 - Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Petite-Île

6.1.2. La submersion marine

La traduction réglementaire de l'aléa submersion marine passe par le croisement cartographique :

1. Des données d'aléa de référence et d'aléa 2100 dans un premier temps ;
2. De la donnée issue du croisement de ceux aléas avec les espaces urbanisés/non-urbanisés dans un second temps.

Le guide méthodologique national rappelle à ce titre les principes généraux de prévention dans les zones soumises à un risque de submersion, et à intégrer dans l'approche territorialisée sur l'île de La Réunion :

3. « Les espaces non urbanisés soumis au risque d'inondation, quel que soit son niveau, restent préservés de tout projet d'aménagement afin de ne pas accroître la présence d'enjeux en zone inondable ;
4. les espaces déjà urbanisés ne doivent pas s'étendre en espace inondable peu ou pas urbanisé, et les secteurs les plus dangereux (zone d'aléa fort) sont rendus inconstructibles ;

5. *D'une manière générale la vulnérabilité des espaces urbanisés ne doit pas être augmentée ;*
6. *La prise en compte du réchauffement climatique dans l'aléa horizon 100 ans n'a pas pour conséquence directe de rendre inconstructible les secteurs concernés (sauf rare exception essentiellement liée à la topographie du lieu [...]). Dans ces zones, le périmètre et la nature des mesures de réduction de vulnérabilité à prescrire (hauteur de plancher, espace refuge...) seront définis à partir de l'aléa horizon 100 ans. Cependant, dans le respect des principes guidant la réalisation des PPR, dans quelques cas limités, l'inconstructibilité sera la règle ou à étudier. Plus précisément, il s'agit d'un terrain situé dans la zone d'aléa 2100 (modéré ou fort), en zone naturelle, et dans une zone non soumise à l'aléa de référence ».*

A partir de ces dispositions générales et en tenant compte des spécificités communales de Petite-Île, il a été décidé de distinguer les zones réglementaires suivantes :

Principes d'inconstructibilité liés à la submersion :

En espace urbanisé, un principe d'inconstructibilité s'applique à toutes les zones d'aléa fort ou modéré de référence.

En espace non-urbanisé, un principe d'inconstructibilité s'applique à toutes les zones concernées par un aléa, qu'il soit actuel ou à horizon 2100, à l'exception des secteurs d'aléa nul de référence et faible à horizon 2100.

Un principe de constructibilité avec prescription s'applique sur les autres secteurs (Tableau 24 & Tableau 25)

Espaces Non urbanisés		ALEA 2100		
		Faible	Modéré	Fort
ALEA DE REFERENCE	Nul	Constructible avec prescriptions	Inconstructible	Inconstructible
	Faible	Inconstructible	Inconstructible	Inconstructible
	Modéré		Inconstructible	Inconstructible
	Fort			Inconstructible

Tableau 24 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés

Espaces urbanisés		ALEA 2100		
		Faible	Modéré	Fort
ALEA DE REFERENCE	Nul	Constructible avec prescriptions	Constructible avec prescriptions	Constructible avec prescriptions
	Faible	Constructible avec prescriptions	Constructible avec prescriptions	Constructible avec prescriptions
	Modéré		Inconstructible	Inconstructible
	Fort			Inconstructible

Tableau 25 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés

6.1.3. Le recul du trait de côte

Concernant le recul du trait de côte, la nature même de l'aléa justifie une classification réglementaire plus immédiate de l'aléa. On peut en effet considérer que tout terrain soumis à l'érosion littorale est voué à disparaître, raison pour laquelle l'aléa RTC est toujours affecté du code degré "fort". Logiquement, l'inconstructibilité est donc la règle pour l'aléa 2100 sans prise en compte du changement climatique. Le guide méthodologique national est d'ailleurs particulièrement explicite à ce sujet :

« Pour ces types d'aléas, la prévention des risques consiste à ne pas augmenter les enjeux dans les zones qui seront impactées par l'aléa à échéance 2100. Ces zones doivent donc être classées en zone d'aléa fort et être rendues strictement inconstructibles. Le zonage ainsi opéré ne peut être adapté afin d'en diminuer les conséquences en termes de prescriptions. Ce principe conduit donc à maintenir les zones d'aléa fort en zone rouge dite inconstructible. »

De plus, dans les zones soumises à un recul du trait de côte lié au réchauffement climatique (élévation du niveau de la mer), des prescriptions peuvent être édictées afin d'éviter l'implantation d'équipements et d'infrastructures structurants ou sensibles, ainsi que les zones de grands projets urbains de type ZAC. Ces mesures permettent de faciliter la mise en œuvre des actions préconisées par la stratégie de gestion intégrée du trait de côte. »

Concernant l'aléa RTC avec prise en compte du changement climatique, il a été décidé au vu des spécificités territoriales réunionnaises et des caractéristiques spatialement limitées de l'aléa sur la commune de Petite-Île de ne pas proposer de traduction réglementaire. Cet aléa n'a donc qu'un caractère purement informatif à l'attention des décideurs locaux et porteurs de projets collectifs afin de les alerter sur le caractère non-opportun de développement urbain dans ces secteurs, notamment vis-à-vis de l'implantation de grands projets urbains.

In fine, on considère un **principe d'inconstructibilité** dans les secteurs affectés par l'aléa recul du trait de côte à 100 ans sans prise en compte du changement climatique.

6.2. TRADUCTION REGLEMENTAIRE DES DEUX ALEAS

Le zonage réglementaire final (Figure 48) est la transcription du croisement entre les études techniques (qui ont notamment conduit à l'élaboration des cartes d'aléas) et l'identification des enjeux du territoire en termes d'interdictions, de prescriptions et de recommandations (Tableau 26 & Tableau 27).

La DEAL Réunion et les partenaires que sont les collectivités locales ont exprimé la volonté lors du groupe de travail constitué au premier semestre 2015, de disposer d'un règlement unique croisant les aléas recul du trait de côte et submersion marine, avec ou sans changement climatique. Cette méthodologie a été souhaitée à l'instar des règlements de PPR dits « multirisques » (inondation et mouvement de terrain), principalement déployés, à La Réunion depuis 2012.

Concernant la commune de Petite-Ile, le PPR ne prévoit pas de délimitation de zones non directement exposées. Parmi les zones exposées aux risques, le PPR distingue in fine deux zones :

- Une zone **très exposée** aux aléas submersion marine et/ou recul du trait de côte, appelée **zone rouge (R)**, au principe d'inconstructibilité à l'avenir ;
- Une **zone moins exposée à l'aléa submersion marine**, appelée **zone bleue (B)**, au principe de constructibilité sous conditions.

Le règlement du PPR littoral de la commune de Petite-Île définit des règles d'interdiction et d'autorisation spécifiques aux aléas considérés. En tant que de besoin, il convient de retourner aux cartes d'aléas pour disposer des règles applicables à la parcelle et aux projets de construction concernés.

Transcription réglementaire des aléas		SUBMERSION MARINE				
		Fort réf.	Modéré réf.	Faible réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Nul réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Nul réf ET Faible 2100
RECU DU TRAIT DE COTE	Fort	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Fort 2100 ou Nul	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Bleu

Tableau 26 : Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces non-urbanisés

Transcription réglementaire des aléas		SUBMERSION MARINE			
		Fort réf.	Modéré réf.	Faible réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Nul réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100
RECU DU TRAIT DE COTE	Fort	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Fort 2100 ou Nul	Rouge	Rouge	Bleu	Bleu

Tableau 27 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés

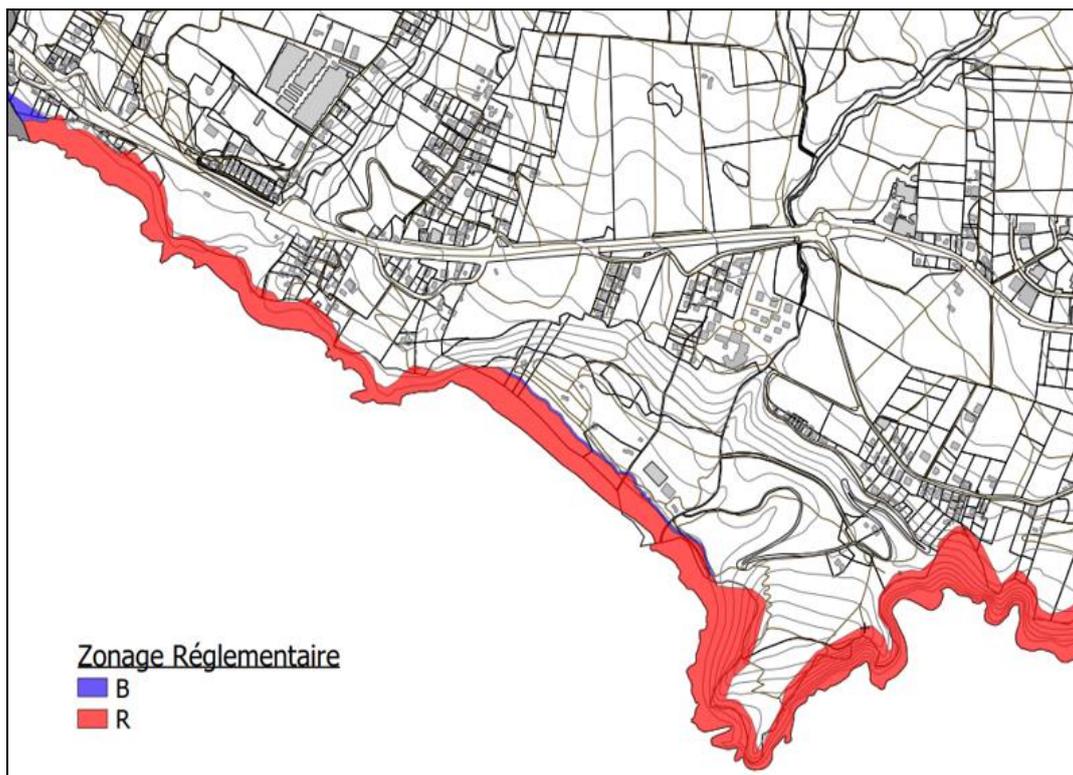


Figure 49 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Petite-Île

7. Bilan de la concertation

8. Lexique des sigles et termes techniques

Sigles

CC	Changement Climatique
DSAS	Digital Shoreline Analysis system
GEDC	Guide d'Estimation des Débits de Crue
HS	Hauteur significative
H ^{max}	Hauteur maximale
LIDAR	Light Detection And Ranging
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NGR	Nivellement Général de La Réunion
ONERC	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
PAC	Porter A Connaissance
PLU	Plan Local d'Urbanisme
POS	Plan d'Occupation des Sols
PPRn	Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles
PPRL	Plan de Prévention des Risques Littoraux
RD	Route départementale
RN	Route Nationale
RTC	Recul du Trait de Côte
SIG	Système d'Information Géographique
SWAN	Simulating WAVes Nearshore
SWASH	Simulating WAVes till SHore
WLR	Weight Linear Regression
ZAC	Zone d'Aménagement Concerté
ZH	Zéro Hydrographique

Organismes / Administrations

BCT	Bureau Central de Tarification
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CIVIS	Communauté Intercommunale des Villes Solidaires
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
EMZPCOI	Etat-Major de Zone de Protection Civile – Océan Indien
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
MEDDE	<i>Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie</i>
MEDDTL	Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Termes techniques

Accrétion (ou engraissement ou accumulation) : Progression de la ligne de rivage par accumulation de sédiments.

Aléa : Phénomène naturel (ex : mouvement de terrain, submersion, inondation, etc.) d'une intensité donnée avec une probabilité d'occurrence/apparition.

Aléa de référence : Au sens du guide national, l'aléa de référence désigne le phénomène naturel engendré par l'évènement de référence du site concerné. Les événements retenus pour la détermination de l'aléa de référence submersion marine intègrent au niveau moyen de la mer une marge d'élévation du niveau de la mer de 20 cm.

Aléa 2100 : Au sens du guide national, l'aléa 2100 désigne le phénomène naturel engendré par l'évènement de référence du site concerné auquel une hypothèse d'élévation du niveau marin de 60 cm dont 20 cm sont déjà intégrés au niveau d'eau de l'évènement de référence.

Cartographie réglementaire des risques naturels : Volet essentiel de la politique de lutte contre les catastrophes naturelles visant à déterminer les zones exposées et à définir les mesures de prévention nécessaires.

Catastrophe naturelle : Phénomène ou conjonction de phénomènes dont les effets sont particulièrement dommageables.

Cellule sédimentaire (ou unité sédimentaire) : Cellule du littoral indépendante du point de vue des transits sédimentaires.

Dérive littorale : Flux de sédiments sensiblement parallèle au rivage, en proche côtier, résultant de différentes causes : vagues, courants, vent.

Désordres : Expression des effets directs et indirects d'un phénomène naturel sur l'intégrité et le fonctionnement des milieux.

Enjeux : Personnes, biens, activités, moyens, patrimoine, etc., susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. Les enjeux s'apprécient aussi bien pour le présent que le futur.

Embouchure : Point le plus en aval d'un réseau hydrographique, où passent toutes les eaux de ruissellement drainées par le bassin.

Érosion (ou démaigrissement) : Perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement de l'estran ou de la plage.

Estran : Espace compris entre le niveau des plus hautes et des plus basses mers connues ou zone de balancement des marées.

Falaise : Escarpement vertical ou subvertical.

Hauteur significative : hauteur caractéristique de l'état de mer, estimée par une analyse statistique des vagues (moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée finie), ou par une analyse spectrale (à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale).

Houle : Oscillation régulière de la surface de la mer, observée en un point éloigné du champ de vent qui l'a engendrée.

Jet de rive : Masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut d'un estran par l'action de déferlement des vagues (En anglais : swash).

Ouvrage de protection côtier : Structure côtière construite et dimensionnée ayant pour objectif d'atténuer les impacts de phénomènes naturels sur un secteur géographique particulier appelé zone protégée. Il répond à une vocation initiale de fixation du trait de côte, de lutte contre l'érosion, de soutènement des terres, de réduction des franchissements, de dissipation de l'énergie de la houle ou d'obstacle à l'écoulement.

Phénomène naturel : Manifestation, spontanée ou non, d'un agent naturel.

Prévention : Ensemble des dispositions visant à réduire les impacts d'un phénomène naturel : connaissance des aléas, réglementation de l'occupation des sols, mesures actives et passives de protection, information préventive, prévisions, alerte, plans de secours, etc.

Risque naturel : Pertes probables en vies humaines, en biens et en activités consécutives à la survenance d'un aléa naturel (risque = aléa X vulnérabilité).

Run-up : Altitude maximale atteinte par le jet de rive.

Servitude réglementaire : Mesures d'interdiction, de limitation ou de prescription relatives aux constructions et ouvrages, définies dans certaines zones par un arrêté réglementaire.

Set-up (ou wave set-up): cf. Surcote liée aux vagues.

Submersion : Action de submerger/d'inonder. Par convention, on emploiera de manière indifférenciée les termes inondation et submersion.

Surcote : Différence positive entre le niveau marégraphique observe/mesure et le niveau de marée prédite.

Surcote liée aux vagues : Surcote locale provoquée par la dissipation d'énergie liée au déferlement des vagues.

Surcote météorologique : Surcote provoquée par le passage d'une dépression et prenant en compte les effets du vent, de la pression (surcote barométrique inverse) et des effets dynamiques liés au déplacement de l'onde de surcote.

Trait de côte : défini, en matière de cartographie marine et terrestre, comme la ligne portée sur la carte séparant la terre et la mer. L'évolution de la position du trait de côte permet de rendre compte de la dynamique côtière. Différentes définitions, ou plutôt différents indicateurs de sa position, coexistent et peuvent être adoptées pour tenir compte de la diversité des morphologies du littoral.

Vulnérabilité : Exprime au sens le plus large, le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les personnes, les biens et les activités. On peut distinguer la vulnérabilité économique et la vulnérabilité humaine.

9. Principaux textes officiels

9.1. LEGISLATION - REGLEMENTATION

1. Loi n° 87.565 du 22 juillet 1987 modifiée, relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs ;
2. Loi n° 95.101 du 2 février 1995 dite loi Barnier, relative au renforcement de la protection de l'environnement, et notamment son titre II sur les dispositions relatives à la prévention des risques naturels (transposée dans les articles L.562.1 à L.562.9 du code de l'Environnement) ;
3. Décret d'application n° 95.1089 du 5 octobre 1995 relatifs aux plans de prévention des risques naturels prévisibles ; modifié par le décret n°2005.3 du 04 janvier 2005 ;
4. Loi n°2003.699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages (Journal Officiel du 31 juillet 2003).
5. Décret d'application n°2012.765 du 28 juin 2012 relatif à la procédure d'élaboration, de révision et de modification des PPR naturels ;

9.2. PRINCIPALES CIRCULAIRES

1. La circulaire interministérielle (Intérieur - Equipement - Environnement) du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables ;
2. La circulaire du ministère de l'Environnement du 19 juillet 1994 relative à la relance de la cartographie réglementaire des risques naturels prévisibles ;
3. La circulaire interministérielle (Equipement - Environnement) du 24 avril 1996 relative aux dispositions applicables au bâti et aux ouvrages existants en zones inondables ;
4. La circulaire interministérielle (Equipement - Environnement) du 30 avril 2002 relative à la politique de l'Etat en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines.
5. La circulaire du 21 janvier 2004 relative à la maîtrise de l'urbanisation et l'adaptation des constructions en zones inondables ;
6. La circulaire du 03 juillet 2007 relative à la consultation des acteurs et à la concertation avec la population pour l'élaboration des PPR ;
7. La circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPR naturels littoraux ;
8. La circulaire du 28 novembre 2011 relative à la procédure d'élaboration, de révision et de modification des PPR naturels.

9.3. PUBLICATION DE GUIDES

1. Guide général « Plans de Prévention des Risques (PPR) naturels prévisibles » (paru à la documentation Française – 1997) ;
2. Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL – Analyse et cartographie des aléas littoraux – Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – Novembre 2011 – 90 p.
3. Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, DGPR, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie – Mai 2014 – Version finale -- 169 p.
4. Références Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée – SHOM, Service hydrographique et océanologique de la Marine. Édition 2011

10. Bibliographie

Aunay B., S. Bès de Berc, E. Chateauminos, A. Rey, L. Schuller, G. Thirard, C. Vincent (2014) – Impacts du cyclone BEJISA sur l'île de la Réunion. Compte rendu des observations réalisées en janvier 2014. Rapport final. Rapport BRGM/RP-63149-FR. 93 p., 24 fig., 2 tabl., 2 ann ;

Bachelery, Mairine, Nehlig, Odon et al, (2006), Carte géologique au 1/100 000 de la commune de Saint-Pierre - © BRGM (BRGM, FEDER, Région Réunion, Univ. de La Réunion) ;

BCEOM, SOGREHA, (1992) Guide d'Estimation des Débits de Crues de La Réunion de 1992 ;

Billard G. (1974) - Carte géologique de la France - La Réunion. Echelle 1/50 000 en collaboration avec P.M. Vincent. Carte (4 feuilles) et notice explicative. Éditions du BRGM.

Booij N., Haagsma I.J.G., Holthuijsen L.H., Kieftenburg A.T.M.M., Ris R.C., Van der Westhuysen A.J., and Zijlema M. (2004) – Swan Cycle III version 40.41. User's Manual, 115 p. ;

Chateauminos E., De La Torre Y., Le Roy S. Et Pedreros R. – Collab. Druon J. (2013) – Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Littoraux des communes du Sud-Ouest de la Réunion. Rapport final. BRGM/RP-62172-FR, 69 p et 4 annexes hors-texte.

Chateauminos, Buttarazi I., Le Moigne B., Salomero J., Thirard G. – OBSCOT (2014) – Observation et gestion de l'érosion côtière à La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-66592-FR, 77 p., 3 annexes.

Cazes-Duvat V. et Paskoff R., 2004. Les littoraux des Mascareignes entre nature et aménagement, L'Harmattan, 186 p ;

De La Torre Y. (2004) – Synthèse morphodynamique des littoraux de La Réunion, état des lieux et tendances d'évolution à l'échelle de l'île. BRGM/RP53307-FR, 118 p., 59 ill., 6 ann.

De La Torre Y. (2012), Guide de Gestion de l'érosion du littoral de La Réunion.

De La Torre Y., Chateauminos E. collab. Battiau-Queney Y., Clus-Auby C. (2013) – OBSCOT 2013 – Observation et gestion de l'érosion côtière à La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-62170-FR, 60 p., 3 annexes.

De La Torre Y. et Louzé J., collab. Dewez T. (2008). Méthodologie pour l'évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion. Phase 2. BRGM/RP-56589-FR, 36 p + annexes ;

Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) et Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE) (2014) – Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169p., 72 ill., 30 encarts. ;

Gillot,P.Y.,and P.Nativel (1982),KGA chronology of the ultimate activity of Piton des Neiges volcano, Reunion Island, Indian ocean, Journal, of, Volcanology, and, Geothermal, Research, 13(1G2),131G146. ;

Himmelstoss (2009) [DSAS v4 manual - USGS Woods Hole Coastal and Marine Science.](#)

Hydretudes (2007), PPRI Saint-Pierre – Rapport Houle Australe 12 Mai 2007, référence : R04-531

Kluska,J.GM.(1997),Evolution magmatique et morphostructurale du Piton des Neiges au cours des derniers 500 000 ans, 93pp,Université Paris XI,Orsay,Paris. ;

Le Roy S. et Pedreros R., Monfort D. (2012) – ALDES : Simulations numériques du tsunami en Méditerranée occidentale. Rapport BRGM/RP-61473-FR, 95 p., 62 ill. ;

Le Roy S. et Pedreros R. avec la collaboration de Monfort D. (2011) – ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979. Rapport BRGM/RP-60353-FR, 80 p., 61 ill. ;

Lecacheux S., Pedreros R., Le Cozannet G., Thiébot J., De la Torre Y. et Bulteau T. (2012) – A method to characterize the different extrem waves for islands exposed to various wave regimes: a case study devoted to Reunion Island. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, pp 2425-2437. ;

Marche F., Bonneton P., Fabrie P. and Seguin N. (2007) – Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 53: 867-894. ;

Météo France, 2007. Note de synthèse sur le risque lié à la surcote cyclonique à La Réunion, 8p ;

Météo France, 2009. Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion ;

Pedreros R. & Garcin M. (2012) – Le Phénomène de la submersion marine in « Gestion des risques naturels, Leçons de la tempête Xynthia » p.47-56 Ed. QUAE Versaille ;

Pedreros R., Krien Y., Poisson B. (2010) – Programme ARAI 2. Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie Française. Rapport BRGM/RP-58990-FR, 64 p., 43 fig., 4 tabl.

Pedreros R., Lecacheux S., Le Cozannet G., Blangy A et De La Torre Y. avec la collaboration de Quetelard H. (Météo France) (2009) – « HOULREU » : Quantification de la houle centennale de référence sur les façades littorales de la Réunion. BRGM/RP-57829-FR, 119 p., 93 fig., 14 tab.

Soler O., Météo-France, 1997. Atlas climatique de La Réunion, [http://www.meteo.fr/temps/domtom/La Reunion/#](http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/#) ;

Stockdon H. F., Holman R. A., How P. A., Sallenger A. H. Jr. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coastal Engineering*, 53, pp. 573-588. ;

Torres-Freyermuth, A., Mariño-Tapia, I., Coronado, C., Salles, P., Medellín, G., Pedrozo-Acuña, A., Silva, R., Candela, J., and Iglesias-Prieto, R.: Wave-induced extreme water levels in the Puerto Morelos fringing reef lagoon, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3765-3773, doi:10.5194/nhess-12-3765-2012, 2012

Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Engng.*, 58: 992-1012.



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

BRGM Réunion
5 Rue Sainte Anne
97400 SAINT DENIS
Tél. : 02 62 21 22 14