



DEPARTEMENT DE LA REUNION

Commune de Saint-Paul

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX

« Submersion marine et recul du trait de côte »

NOTE DE PRESENTATION

Novembre 2018

APPROBATION



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 PPR 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 PPR 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.

Avertissement sur la mise à jour du document

Des modifications concernant la partie technique de l'étude (cf. paragraphes 5 et 6) ont été apportées au document soumis à l'enquête publique. Ces modifications impliquent une correction du zonage cartographique et sont présentées par secteur dans le rapport BRGM consultable en Annexe 7 du dossier PPRL (Salomé J., Belon R., 2018).

Sommaire

1. Introduction	13
1.1. ORGANISATION DE LA GESTION DES RISQUES	13
1.2. PREVENTION DES RISQUES NATURELS.....	14

1.3. PLAN DE PREVENTION DES RISQUES (PPR) NATURELS.....	15
1.4. CATASTROPHES NATURELLES MAJEURES A LA REUNION	16
2. Présentation du PPR.....	17
2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DU PPR	17
2.2. PROCEDURE REGLEMENTAIRE	18
2.2.1. Secteurs géographiques concernés	18
2.2.2. État des démarches menées	18
2.3. ASSURANCES ET INFRACTIONS AU PPR	20
2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur.....	20
2.3.2. Infractions au PPR et sanctions.....	23
2.4. EXPROPRIATION ET MESURE DE SAUVEGARDE	23
2.5. RESPONSABILITES	24
2.5.1. Etablissement du PPR.....	24
2.5.2. Autorisation d'occuper le sol.....	24
3. Présentation de la commune	25
3.1. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE.....	25
3.1.1. Situation géographique.....	25
3.1.2. Contexte géologique.....	26
3.1.3. Contexte géomorphologique littoral	30
3.1.4. Contexte climatique	36
3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE	42
4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels.....	47
4.1. PHENOMENES HISTORIQUES.....	47
4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELS	49
4.3. CARACTERISATION DES ALEAS LITTORAUX	50
4.3.1. Définitions et notions générales.....	50
4.3.2. Aléa recul du trait de côte (RTC)	51
4.3.3. Submersion marine	57
5. Caractérisation et cartographie de l'aléa recul du trait de côte.....	65
5.1. CADRE METHODOLOGIQUE NATIONAL	65
5.2. ESTIMATION DU REcul DU TRAIT DE COTE A 100 ANS	66
5.2.1. Préparation des photographies aériennes	66
5.2.2. Définition et numérisation des traits de côte	66

5.2.3. Calcul du recul du trait de côte à 100 ans	67
5.3. ZONAGE DE L'ALEA REcul DU TRAIT DE COTE	71
5.3.1. Zonage du recul à échéance 100 ans	71
5.3.2. Limite du recul à échéance 100 ans avec prise en compte du changement climatique	72
5.3.3. Résultats cartographiques	72
6. Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine	75
6.1. CADRE METHODOLOGIQUE NATIONAL	75
6.2. CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE	77
6.2.1. Méthodologie et scénarios	77
6.2.2. Localisation des simulations	81
6.2.3. Données disponibles.....	82
6.2.4. Simulation 1D des houles australes de mai 2007 (profils 2-1 à 5-3).....	85
6.2.5. Simulation 1D du cyclone Dina (profils 1-1 et 1-2 et ville de Saint-Paul en 2D) 100	
6.2.6. Données historiques et validation	111
6.3. ZONAGE CARTOGRAPHIQUE DE L'ALEA SUBMERSION MARINE	113
6.3.1. Qualification de l'aléa	113
6.3.2. Traitements et zonages cartographiques	113
6.3.3. Résultats cartographiques	115
7. Elaboration du zonage réglementaire	117
7.1. METHODOLOGIE.....	117
7.1.1. Les espaces urbanisés et non-urbanisés	117
7.1.2. La submersion marine	119
7.1.3. Le recul du trait de côte	122
7.2. TRADUCTION REGLEMENTAIRE DES DEUX ALEAS.....	123
7.3. ZONAGE REGLEMENTAIRE : CAS PARTICULIER CONSERNANT LE REcul DES RESTAURANTS DE L'HERMITAGE.....	125
8. Lexique des sigles et termes techniques	127
Principaux textes officiels	131
8.1. LEGISLATION - REGLEMENTATION	131
8.2. PRINCIPALES CIRCULAIRES	131
8.3. PUBLICATION DE GUIDES.....	132
9. Bibliographie	133

10. Annexe : Bilan de la concertation..... 137**Liste des figures**

Figure 1 : Délimitation du territoire communal de Saint-Paul (Fond ©IGN scan100®-2010).....	25
Figure 2 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de la commune de Saint-Paul (Billard, 1974)	26
Figure 3 : Perspective morpho-géologique schématique de La Réunion (Raunet, 1991)	27
Figure 4 : Carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000 (source : C.I.R.A.D. (Raunet, 1991), fond : ©IGN Scan100® - 2010).....	30
Figure 5 : Réseau hydrographique de Saint-Paul (source : BDtopo2012®, fond ©IGN scan100® - 2010)	31
Figure 6 : Facies littoraux des plages coralliennes de la commune de Saint-Paul (De La Torre, 2004)	32
Figure 7 : Répartition des morphotypes sur le littoral Sud de la commune de Saint-Paul.....	33
Figure 8 : Répartition des morphotypes sur le linéaire côtier entre Saint-Gilles et le Cap La Houssaye.	34
Figure 9 : Photographie aérienne des côtes rocheuses du Cap La Houssaye (De La Torre, 2004)	34
Figure 10 : Photographie aérienne du linéaire côtier de la baie de Saint-Paul (De La Torre, 2004)	35
Figure 11 : Répartition des morphotypes du linéaire côtier de la baie de Saint-Paul (De La Torre, 2004)	36
Figure 12 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (©Météo France 2010)37	
Figure 13 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010).....	38
Figure 14 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France) L'œil est passé à peine à 30km des côtes, ce qui correspond au rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) a dépassée largement les 200km/h et les vagues ont atteint les 15m 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 : Urbanisation de la baie de Saint-Paul entre 1950 et 2012 (photographies aériennes IGN)	43
Figure 18 : Urbanisation de Saint-Gilles entre 1950 et 2012 (photographies aériennes IGN)....	43
Figure 19 : Extrait de la carte des enjeux de la baie de Saint-Paul (Annexe 5 du dossier PPRL)44	
Figure 20 : Extrait de la carte des enjeux à Saint-Gilles (Annexe 5 du dossier PPRL)	45
Figure 21 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012) .	52
Figure 22 – Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012)	52

Figure 23 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)	53
Figure 24 - Les manifestations de l'érosion sur les côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)	54
Figure 25 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)	55
Figure 26 : Erosion à proximité de la passe de l'Hermitage (De La Torre, 2004)	56
Figure 27 : Photographie du secteur du débarcadère après le passage de GAMEDE (2007) (photo BRGM)	57
<i>Figure 28 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).</i>	58
Figure 29. Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M., 2012)	59
Figure 30 - Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois, 2014)	60
Figure 31 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)	60
Figure 32 : Cartographie de la topographie du littoral de la baie de Saint-Paul (Litto3d, IGN-SHOM – fond : orthophotographie 2012, IGN)	61
Figure 33 : Cartographie de la topographie du littoral du secteur situé au nord de la passe de l'Hermitage (Litto3d, IGN-SHOM – fond : orthophotographie 2012, IGN)	62
Figure 34 : Photographie aérienne des impacts de la houle cyclonique et d'une zone de franchissement sur la baie de Saint-Paul (SOGREAH, 2007)	63
Figure 35 : Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral de St Paul	67
Figure 36 : Implantation des profils au sud de la baie de St Paul (sur orthophoto IGN)	68
Figure 37 : Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)	68
Figure 38 : Exemple d'artefact (en pointillé noir trait de côte 100Tx en « dent de scie », en couleurs les différents traits de côte historiques) généré par les profils au sud de la Rivière des Galets	69
Figure 39 : Exemple de recul lié à un événement tempétueux majeur en centre-ville de St Paul (cyclone Gamède) (De La Torre, 2004)	71
Figure 40 : Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte	73
Figure 41 : Exemple de représentation du zonage « aléa recul du trait de côte » avec en trait rose la position du trait de côte en 2008 (haut de plage), en trait gris la limite administrative de la commune côté mer, en pointillé rouge le recul du trait de côte à	74
Figure 42 : Présentation schématique des niveaux d'eau de l'évènement submersion marine par débordement selon les 2 scénarios PPRL	78
Figure 43 : Schémas de la qualification des degrés d'aléa débordement	78
Figure 44 : Comparaison des régimes de houles en termes de hauteur de vague (graphiques du haut), période au large (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) sur la commune de St Paul (segments 61 à 69 encadrés en pointillés rouge) – (Lecacheux et al., 2012)	80
Figure 45 : Localisation des simulations dans la zone d'étude de Saint-Paul : zones homogènes en bleu, profils pour simulations 1D en vert	81
Figure 46 : Principales étapes nécessaires à la construction du MNE	83
Figure 47 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (MEDDTL, 2012)	85

Figure 48 : Aperçu de la propagation des vagues le long du profil 1-1	86
Figure 49 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs significatives des vagues (Hs) calculées avec le code SWAN à une résolution de 20 m (scénario à court-terme à gauche, scénario à long-terme (2100) à droite).....	87
Figure 50 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Setup induit par les vagues calculés avec le code SWAN à une résolution de 20 m (scénario à court-terme à gauche, scénario à long-terme à droite).....	88
Figure 51 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Déferlement des vagues calculé avec le code SWAN à une résolution de 20 m (scénario à court-terme à gauche, scénario à long-terme (2100) à droite) : la teinte rouge indique le taux de vagues déferlées, entr	89
Figure 52 : Comparaison des spectres calculés par SWAN en entrée du profil 3-1 pour les 2 valeurs de niveau considérées	90
Figure 53 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Exemple de caractéristiques globales d'une simulation sur le profil 2-2 pour le scénario à long-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux	93
Figure 54 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2-2 pour le scénario à long-terme	94
Figure 55 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2-3 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	94
Figure 56 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2-4 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	95
Figure 57 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 3-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	96
Figure 58 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 3-2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	96
Figure 59 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 3-3 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	97
Figure 60 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 4-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	97
Figure 61 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 5-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	98
Figure 62 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 5-2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	99
Figure 63 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 5-3 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	99
Figure 64 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-1 pour le scénario à court-terme	102
Figure 65 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-2 pour le scénario à court-terme	102
Figure 66 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-1 pour le scénario à long-terme	103
Figure 67 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-2 pour le scénario à long-terme	103
Figure 68 : Comparaison des spectres calculés par SWAN en entrée du profil 1-1 pour les 2 valeurs de niveau considérées	104

Figure 69 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 1-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	106
Figure 70 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 1-2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme	107
Figure 71 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Implantation des deux grilles SWASH sur la baie de Saint-Paul et forçage avec les données de vagues issues de SWAN (les vecteurs indiquent la direction de propagation des vagues)	108
Figure 72 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Champ de vagues à l'instant 14.5 minutes (calcul réalisé entre les instants 0 et 30 minutes du modèle), grille de Saint-Paul sud.....	109
Figure 73 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Limite de submersion et runup sur la baie de Saint-Paul pour le scénario à court-terme (situation « actuelle »).....	110
Figure 74 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Limite de submersion et runup sur la baie de Saint-Paul pour le scénario à long-terme (situation 2100)	111
Figure 75 : Ecart maximal constaté entre le run-up simulé en 1D (scénario 2100) et le runup observé (profil 5-1 pour l'évènement des houles australes de mai 2007).....	112
Figure 76 : Ecart entre le runup simulé en 2D (en trait rouge pour le scénario actuel, en tirets rouge pour le scénario 2100) et le runup observé (point vert) au Sud de la baie de St Paul. En triangle rouge, les points d'entrée d'eau préférentiels.	112
Figure 77 : Confrontation de la topographie et des données historiques pour le zonage de l'aléa submersion marine (exemple sur le secteur de La Saline)	114
Figure 78 : Extrait de la carte de synthèse des modes de submersion et des observations de l'aléa submersion dans le secteur de St Gilles les bains	115
Figure 79 : Extrait de la carte de zonage de l'aléa submersion dans le secteur de la Saline les bains	116
Figure 80 : Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Saint-Paul	118
Figure 81 : Localisation de l'espace urbanisé protégé par la barrière récifale (Scan 25 - IGN 2012)	121
Figure 82 : Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés situés en arrière de la barrière récifale.....	122
Figure 83 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Saint-Paul.....	125

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evénements historiques majeurs survenus à La Réunion.....	16
Tableau 2 : Evolution de la population de Saint-Paul (source : ©I.N.S.E.E.).....	42
Tableau 3 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelles sur la commune de Saint-Paul (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 30/06/2014)49	
Tableau 4 : Liste des cyclones notables selon Météo-France	50
Tableau 5 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)	55
Tableau 6 : Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude)	65
Tableau 7 : Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées.....	66

Tableau 8 : Caractéristiques du recul du trait de côte par cellule hydrosédimentaires avec en rouge les secteurs modifiés (la rivière des galets en fait également partie)	70
Tableau 10 : Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude)	76
Tableau 11: Références altimétriques maritimes pour les sites de la Pointe des Galets et de Saint-Leu : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et zéro IGN8.....	84
Tableau 12 : Niveaux marins retenus pour les simulations de submersion	85
Tableau 13 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à court-terme	91
Tableau 14 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à long terme	91
Tableau 15 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Synthèse des résultats obtenus sur les zones 2 à 5 pour chaque profil et chaque scénario	100
Tableau 16 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à court-terme	105
Tableau 17 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à long-terme	105
Tableau 18 : Cyclone Dina (22h00) : Synthèse des résultats obtenus pour chaque profil de la zone 1 et chaque scénario.....	107
Tableau 19 : Détail des deux grilles de calcul SWASH.....	109
Tableau 20 : Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (MEDDTL, 2011)	113
Tableau 21 : Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés	120
<i>Tableau 22 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés</i>	120
Tableau 23 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces non-urbanisés	123
Tableau 24 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés.....	124
Tableau 25 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés situé en arrière du récif frangeant. .	124

Préambule

Ce dossier est le **Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) « submersion marine et recul du trait de côte » de la commune de Saint-Paul**. 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 Saint-Paul et les phénomènes naturels qui la concernent, ainsi que les règles méthodologiques adoptées ;
 - une cartographie du zonage réglementaire à l'échelle du 1/5 000ème sur l'ensemble du linéaire côtier communal ;
 - 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.

Saint-Paul, commune peuplée de 104 634 habitants (population recensée par l'INSEE en 2014), est affectée par des phénomènes d'érosion littorale et de submersion marine, comme en témoignent les cartes de phénomènes historiques (annexes 1 et 3 du dossier PPRL), 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 Saint-Paul.

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 par le décret du 11 octobre 1990 et par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003. Cette dernière loi prévoit 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 1.1). Les inondations consécutives à la tempête Xynthia de février 2010 en métropole l'ont également mis en exergue.

La commune de Saint-Paul est concernée par cette politique de prévention, comme le front de mer de la baie ou encore l'Hermitage qui cumulent une évolution économique et démographique récente avec des aléas littoraux avérés liés à des épisodes météo-marins de forte intensité. Il y a donc nécessité pour la sécurité de la population 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 du code de l'environnement :

« Dans les communes sur le territoire desquelles a été prescrit ou approuvé un Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles, le maire informe la population au moins une fois tous les deux ans, par des réunions publiques communales ou tout autre moyen approprié, sur les caractéristiques du ou des risques naturels connus dans la commune, les mesures de prévention et de sauvegarde possibles, les dispositions du plan, les modalités d'alerte, l'organisation des secours, les mesures prises par la commune pour gérer le risque, ainsi que sur les garanties prévues à l'article L. 125-1 du code des assurances. Cette information est délivrée avec l'assistance des services de l'Etat compétents, à partir des éléments portés à la connaissance du maire par le représentant de l'Etat dans le département, lorsqu'elle est notamment relative aux mesures prises en application de la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs et ne porte pas sur les mesures mises en œuvre par le maire en application de l'article L. 2212-2 du code général des collectivités territoriales ».

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

« Le plan communal de sauvegarde 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. Il peut désigner l'adjoint au maire ou le conseiller municipal chargé des questions de sécurité civile. Il doit être compatible avec les plans d'organisation des secours arrêtés en application des dispositions des articles L.741-1 à L.741-5.

Il est obligatoire dans les communes dotées d'un Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles approuvé ou comprises dans le champ d'application d'un plan particulier

d'intervention. Le plan communal de sauvegarde est arrêté par le maire de la commune. [...] La mise en œuvre du plan communal ou intercommunal de sauvegarde relève de chaque maire sur le territoire de sa commune.

Un décret en Conseil d'État précise le contenu du plan communal ou intercommunal de sauvegarde et détermine les modalités de son élaboration. »

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. Le PPRL de la commune de Saint-Paul est l'un des premiers PPR littoraux soumis à la concertation du public à La Réunion.

Sont donc pris en compte dans la présente élaboration du Plan de Prévention des Risques littoraux de la commune de Saint-Paul 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

Il est possible que ce tableau (*Tableau 1*) ne soit pas exhaustif, l'idée étant de rappeler que les phénomènes de catastrophes naturelles sont bien présents à La Réunion.

<p>1875</p> <p>Salazie, Grand-Sable : 63 personnes ensevelies par un glissement</p>	<p>Février 1998</p> <p>Tempête Anacelle : 1 mort ; dégâts importants</p>
<p>Février 1932</p> <p>Cyclone : 90 morts, plus de 41 000 sinistrés, plus de 100 millions de francs de dégâts</p>	<p>Janvier 2002</p> <p>Cyclone Dina : 2 morts, dégâts très importants</p>
<p>Janvier 1948</p> <p>Cyclone : 165 morts ; dégâts énormes</p>	<p>Mars 2006</p> <p>Tempête tropicale modérée Diwa : 4 morts, pluies importantes</p>
<p>Février 1962</p> <p>Cyclone Jenny : 36 morts ; dégâts importants</p>	<p>Février 2007</p> <p>Cyclone Gamède : 2 morts, dégâts importants</p>
<p>Janvier 1966</p> <p>Cyclone Denise : 3 morts ; dégâts importants</p>	<p>Mai 2007</p> <p>Violente houle australe impactant le littoral Sud-ouest : 2 morts, dégâts importants dans les ports</p>
<p>Janvier 1980</p> <p>Tempête Hyacinthe : 25 morts ; 1 milliard de francs de dommages</p>	<p>Janvier 2014</p> <p>Cyclone Béjisa : 1 mort, 16 blessés, dégâts importants dans l'Ouest</p>
<p>Février 1987</p> <p>Tempête Clotilda : 9 morts ; dégâts très importants (109 millions de francs sur St Denis)</p>	
<p>Janvier 1989</p> <p>Cyclone Firinga : 4 morts ; dégâts très importants</p>	
<p>Janvier 1993</p> <p>Cyclone Colina : 2 morts ; dégâts importants</p>	

Tableau 1 : Evénements 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 :

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

- 1°) de délimiter les zones exposées aux risques dites « zones de danger » 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 ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles pourraient y être autorisées, prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités ;*
- 2°) de délimiter les zones dites « zones de précaution » 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° du présent article ;*
- 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 de l'enquête publique.

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° 2015-1084/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 Saint-Paul, 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 : Réunion de présentation aux communes de l'arrondissement préfectoral de Saint-Pierre de la méthode de caractérisation des aléas littoraux ;
- **19 mai 2014 : Porter à Connaissance** du Préfet au Maire de Saint-Paul des projets de **des cartes d'aléas** pour prise en compte dans la délivrance des actes d'urbanisme ;

- Premier semestre 2015 : Animation par la DEAL Réunion d'un groupe de travail réunissant plusieurs services de communes réunionnaises afin d'élaborer les grandes lignes du « règlement-type PPR littoral réunionnais » (trois réunions en mars, avril et mai 2015) ;
- **25 juin 2015 : Arrêté Préfectoral n°2015-1082/SG/DRCTCV** prescrivant un PPR submersion marine et érosion du trait de côte sur la commune de Saint-Paul ;
- 25 avril 2017 : présentation du projet de PPR Littoral ;
- 5 octobre 2017 : Réunion d'association avec les services techniques de la mairie.
- 15 novembre 2017 : Réunion en mairie de Saint-Paul avec les élus référents.
- 17 novembre 2017 : Réunion avec les services techniques de la Communauté d'agglomération du Territoire de la Côte Ouest (TCO) ;
- 14 décembre 2017 : Présentation du projet de PPR en Commission Aménagement du TCO

Après la phase d'élaboration, le dossier est soumis à des consultations 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.

Les consultations officielles des différents services se sont déroulées du 23 novembre 2018 au 23 janvier 2018.

Conformément à l'article R.123-8 du code de l'environnement, un bilan de la concertation mise en œuvre dans le cadre de l'élaboration du projet de PPR est annexé à la présente note. Ce bilan rappelle quelles ont été l'association et la concertation menée tout au long de l'élaboration du projet de PPR.

Après cette phase de consultation officielle, 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. 123-6 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. 123-17.

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 ».

L'arrêté préfectoral n°230/SG/DCL/BU du 09 février 2018 a prescrit l'ouverture d'une enquête publique au titre du Code de l'environnement, sur le territoire de la commune de Saint-Paul concernant le projet d'élaboration du plan de prévention des risques naturels prévisibles relatif aux aléas recul du trait de côte et submersion marine, au titre du code de l'environnement.

Préalablement au lancement de l'enquête publique, trois réunions d'information et d'échanges avec le public, organisées par l'État, maître d'ouvrage du projet de PPR, se sont tenues les 27 février 2018, le 1^{er} mars 2018 et 2 mars 2018 respectivement à la salle du conseil municipal, la mairie annexe de Saint Gilles les Bains et à la mairie annexe de la Saline Les Bains. En présence du maître d'ouvrage représenté par le DEAL, ainsi que du BRGM. Y ont été conviés les représentants de la mairie et le commissaire-enquêteur.

L'enquête publique est prévue du 05 mars 2018 au 12 avril 2018 inclus (39 jours consécutifs), sous la supervision de Monsieur Hubert DI NATALE, commissaire-enquêteur. Les pièces du dossier de PPR ainsi que des registres d'enquête sont mis à disposition du public à l'Hôtel de Ville ainsi qu'à la mairie annexe de Saint-Gilles-les-Bains et en mairie annexe de la Saline-les-Bains. Le commissaire enquêteur tiendra notamment 15 permanences pendant la durée de l'enquête afin de recueillir les observations du public.

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 (...) les dommages matériels non assurables 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 :

- les inondations (cours d'eau sortant de leur lit) ;
- les ruissellements d'eau, de boue ou de lave ;
- **les glissements ou effondrements de terrain** ;
- la subsidence (effondrement de terrain consécutif à la baisse de la nappe phréatique) ;
- les séismes ;
- **les raz-de-marée (ou submersion marine)** ;
- 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.460.1, 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.460.1 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. 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

Saint-Paul, chef-lieu de cinq cantons, se situe dans le Nord-Ouest de l'île de La Réunion, sur les pentes externes ainsi que sur la bordure littorale du massif volcanique ancien du Piton des Neiges. Cette commune s'étend sur une superficie de 241,28 km², soit plus de 10,4 % de la surface totale de l'île de La Réunion. Avec 106 193 habitants (2012) et une densité de 440 habitants par km², la ville de Saint-Paul observe une augmentation de sa population de l'ordre de 1,7% depuis le début des années 2000.

La zone étudiée s'étend sur une superficie de 210 km² (territoire communal, hors cirque de Mafate), soit plus de 8.3 % de la surface totale de l'île de la Réunion.

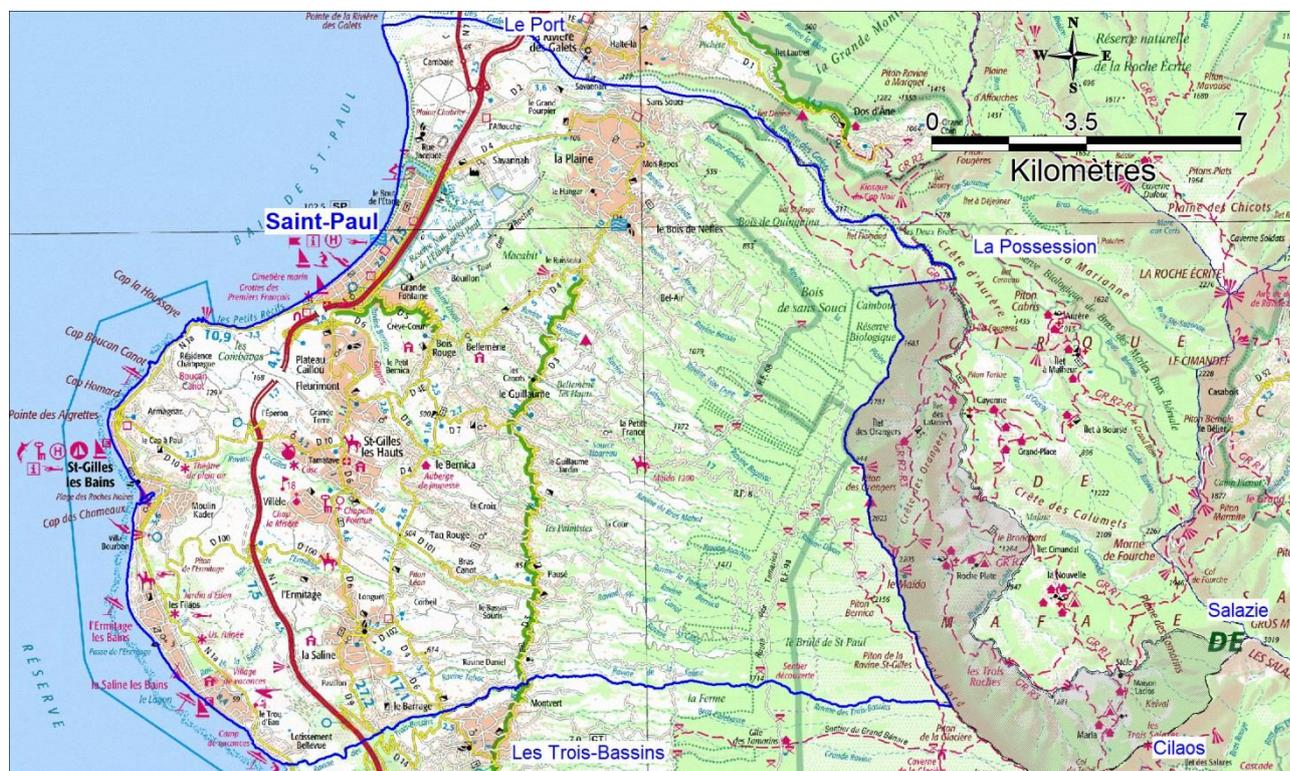


Figure 1 : Délimitation du territoire communal de Saint-Paul (Fond ©IGN scan100®-2010)

Le zone d'étude s'étend entre le littoral à l'ouest et le rempart du cirque de Mafate à l'est ; et entre la Rivière des Galets au Nord et la Ravine des Trois-Bassins au Sud.

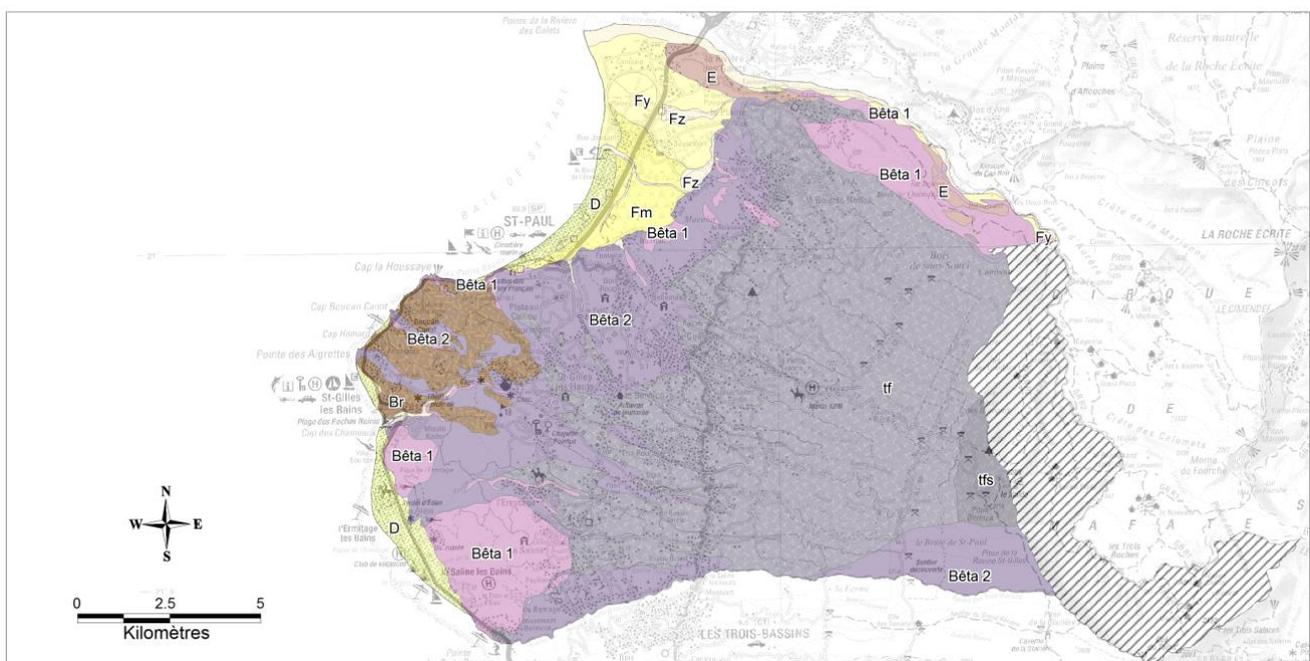
La commune de Saint-Paul est limitrophe avec les communes du Port, de La Possession, de Cilaos et de Trois Bassins.

La commune de Saint-Paul est incluse au sein du territoire de la côte ouest (TCO).

3.1.2. Contexte géologique

Le secteur d'étude s'inscrit dans le contexte géologique du massif du Piton des Neiges. Ce dernier a été caractérisé par des périodes d'activités éruptives importantes (épanchements de coulées de lave et/ou de mise en place de formations pyroclastiques), séparés par de longues périodes de calme au cours desquelles les roches massives et les dépôts pyroclastiques (projections volcaniques émises lors d'une activité explosive du volcan) ont été soumises à l'érosion. La dernière période d'activité du Piton des Neiges est datée d'environ 12 000 ans (Deniel C., Kieffer G. & Lecointre J., 1992).

Des vallées se sont formées, des reliefs se sont individualisés. Des dépôts alluvionnaires et des brèches de pente, de remaniement, ont comblé les dépressions. Lors de la reprise de l'activité volcanique, des coulées de lave se sont épanchées sur les flancs du massif volcanique en empruntant d'abord les vallées.



Légende :

- Alluvions récentes (Fz)
- Alluvions anciennes (Fy)
- Sables et galets de plage (D)
- Alluvions (Fm) arines (MF)
- Dépôts de glissements en masse, de coulées de débris, éboulis (E)
- Tufs soudés du Maïdo et de la Roche Ecrite (Tfs)
- Tufs en épandages (Tf)
- Brèches d'avalanches de débris de Saint-Gilles (Br)
- Coulées (basalte, hawaïtes, mugéarites) (Beta2)
- Coulées basaltiques à olivine (Beta1)

Figure 2 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de la commune de Saint-Paul (Billard, 1974)

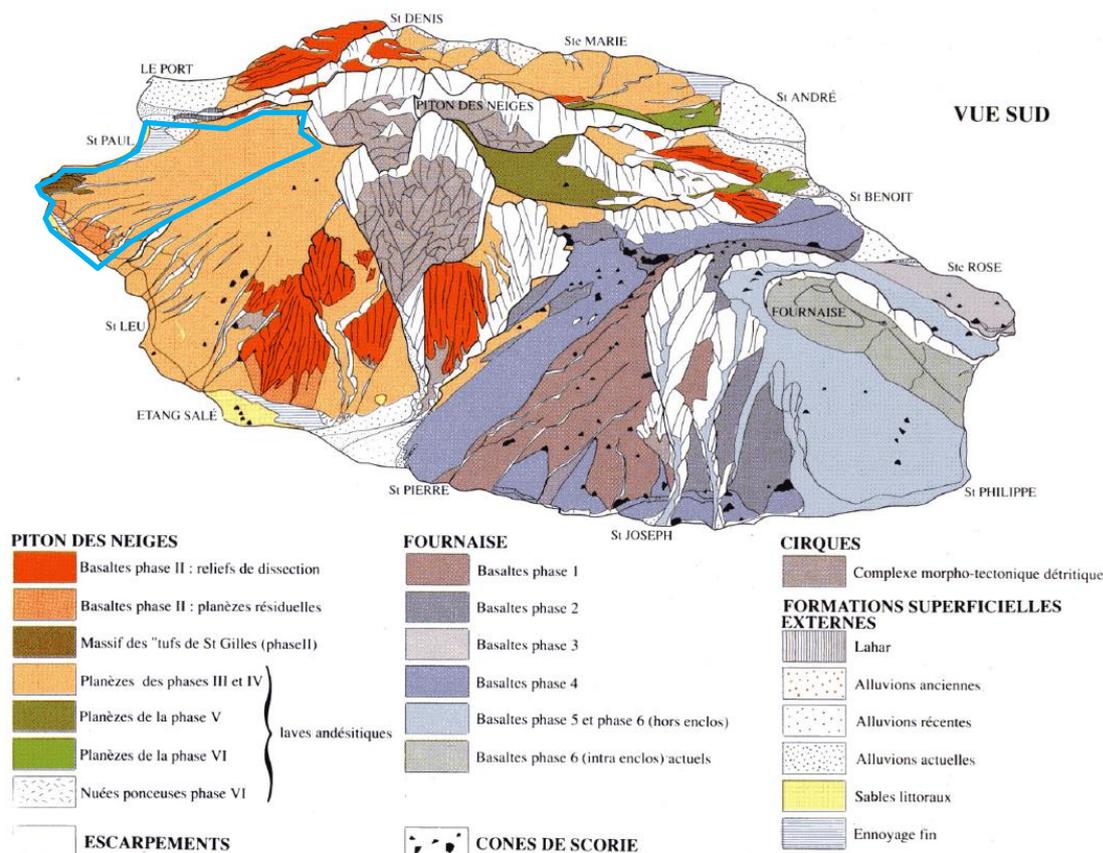


Figure 3 : Perspective morpho-géologique schématique de La Réunion (Raunet, 1991)

Les principales formations qui se distinguent sur le secteur d'étude sont les suivantes :

Les formations volcaniques

- **Les séries anciennes : Coulées basaltiques à olivine (Beta1)**

En se référant à la carte géologique à l'échelle du 1/50 000 (Billard, 1974), au niveau de l'encaissement de la Rivière des Galets et de la ravine des Trois-Bassins, affleurent des terrains relativement anciens plus ou moins altérés (altération climatique et hydrothermale), issus de la phase II d'activité du Piton des Neiges (entre 2,1 et 0,43 millions d'années). Ces coulées basaltiques à olivine constituent la série des océanites du Piton des neiges. Des affleurements dans les pentes dominant le secteur de la Saline sont également présents. L'altération hydrothermale s'est traduite par l'apparition de minéraux secondaires (zéolites, en particulier). La transformation poussée des laves liées à cette altération (argilisation) leur confère une perméabilité faible.

Ces formations géologiques sont constituées par une alternance de coulées de lave et de niveaux scoriacés de nature basaltique (structure en « mille-feuilles »). L'épaisseur des coulées et des lits de scories est très variable, allant du mètre à la dizaine de mètres. Ces formations présentent un pendage de quelques degrés vers la mer. Des filons intrusifs de lave sub-verticaux (dykes) recoupent en de nombreux endroits ces formations.

Ces séries anciennes sont également constituées par de puissantes coulées de lave massive, mise en place dans d'anciennes vallées et pouvant atteindre plus de 10 m d'épaisseur.

Mais comme la mise en place de ces formations volcaniques s'est faite au cours de plusieurs périodes d'activité, séparées par des périodes de calme éruptif, on rencontre fréquemment, en intercalation dans la succession stratigraphique des formations volcaniques, d'anciens sols, des niveaux détritiques, des coulées de boue indurées, etc.

- **Les séries récentes : *Coulées (basaltes, hawaïtes, mugéarites) (Beta2)***

Les formations plus récentes sont issues de la phase III et IV de l'activité du massif du Piton des Neiges, (entre 350 000 et 12 000 ans).

La phase III est caractérisée par des coulées de lave à phénocristaux de feldspath et leurs produits d'altération et de remaniement. Ces coulées sont des leuco-basaltes et des andésites alcalines (hawaïtes, mugéarites). Elles se présentent généralement sous forme d'empilement de bancs compacts de laves d'épaisseur métrique à décimétrique et de bancs de scories d'épaisseur métrique. Ce faciès est également connu à la Réunion sous le nom de roche pintade.

La phase IV est marquée par des coulées basaltiques et andésitiques (hawaïtes, mugéarites), constituées par des éléments rocheux divers (ponce noire, lave aphyriques ou à phénocristaux de feldspath et d'olivine) plus ou moins abondants de taille millimétrique à centimétrique, parfois décimétrique, fortement cimentés par des produits cendreux.

- **Les formations tardives : *Tufs (ts et tfs)***

Les tufs en épandage sont les formations prédominantes sur la commune, on les retrouve principalement dans les hauts de la commune, fréquemment au-delà de 500 m NGR.

Ces tufs pyroclastiques sont issus de la phase IV (entre 230 000 et 12 000 ans) de l'activité du massif du Piton des Neiges. Ces formations sont constituées par des éléments rocheux divers (ponce noire souvent dominante, basaltes à olivine, laves aphyriques ou à phénocristaux de feldspath, trachyte, roche grenue) plus ou moins abondants, de taille millimétrique à centimétrique, parfois décimétrique, fortement cimentés par des produits cendreux. Des bombes de lave vitreuse sombre se rencontrent parfois au sein de ces terrains.

Dans la région du Maïdo, affleure une couche métrique de tufs soudés (tfs). La roche à l'allure d'une lave bréchoïde dont les éléments ont une taille centimétrique.

Les formations superficielles

Sur le territoire de la commune de Saint-Paul, on note la présence de différentes formations superficielles (alluviales et détritiques notamment). On distingue parmi elles :

Les formations alluviales :

- *des alluvions fluviales (Fz, Fy)*, on les rencontre principalement à l'exutoire des principales ravines transitant sur le secteur d'étude, notamment au niveau de Cambaie (dépôt de la Rivière des Galets). Il s'agit d'un mélange hétérogène de sables fins à grossiers, de graviers, de galets et de blocs basaltiques et andésitiques dont la taille peut atteindre le m³. L'épaisseur de ces formations est variable. Elle peut atteindre plusieurs dizaines à centaine de mètres.
- *des alluvions fluvio-marines (Fm)*, comprenant des argiles, des silts, des limons, des sables et des galets basaltiques et andésitiques. Leur épaisseur atteint plusieurs décimètres. La zone de l'Étang Saint-Paul est notamment composée de ces formations.

- *de sables dunaires (D)*, composés de débris de laves, d'olivine, d'augite, et de titanomagnétite. Dans les dépressions inter dunaires, ces sables n'ont que quelques mètres d'épaisseur et présentent une certaine cohésion. On les retrouve principalement dans le secteur des plages de La Saline et l'Hermitage et au niveau du centre-ville de Saint-Paul.

Les formations détritiques :

- *des dépôts de glissement en masse, de coulées de débris, des éboulis (E)*. On rencontre les éboulis (anciens ou récents) essentiellement au pied des remparts, sur les versants encaissés des ravines, notamment au niveau de l'encaissement de la Rivière des Galets, sur des pentes où à la base des escarpements. Ils sont généralement constitués par un mélange hétérogène d'éléments fins et d'éléments grossiers de taille décimétrique à métrique. La pente des talus varie de 40 à 45°. Ce sont des dépôts de faible volume pour lesquels le mode de mise en place est principalement gravitaire. Leur épaisseur est très variable, allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Le dépôt d'une coulée de débris significative est identifié sur le secteur d'étude au niveau de la rive gauche de la Rivière des Galets (à l'amont de la RN1).
- *Des brèches d'avalanche de débris de Saint-Gilles (Br)* : ces brèches volcaniques que l'on retrouve au niveau du Cap La Houssaye (Cap Champagne) notamment sont issus d'événements cataclysmiques sous forme d'avalanches de débris ayant dévalé les pentes du Piton des Neiges il y a plus de 300 000 ans. Leur mise en place s'est faite en plusieurs étapes. Localement, il est possible d'observer le contact entre ces ensembles d'épaisseur pluridécamétrique et d'extension hectométrique. Une brèche volcanique est une roche constituée pour 50 % au moins d'éléments anguleux (fragments de lave basaltique) de diamètre supérieur à 2 mm et pouvant atteindre plusieurs mètres, pris dans un ciment de cendres et de lapillis.

Les produits de l'altération ou les formations remaniées :

- *des colluvions*. Il s'agit de formes d'accumulation avec une matrice argilisée et comportant des blocs basaltiques généralement de taille réduite, issue d'anciens glissement (ponctuel ou en masse).
- *des altérites*. 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 est plus ou moins développée (avec de fortes variations spatiales) mais peut descendre 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.

Les sols

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.

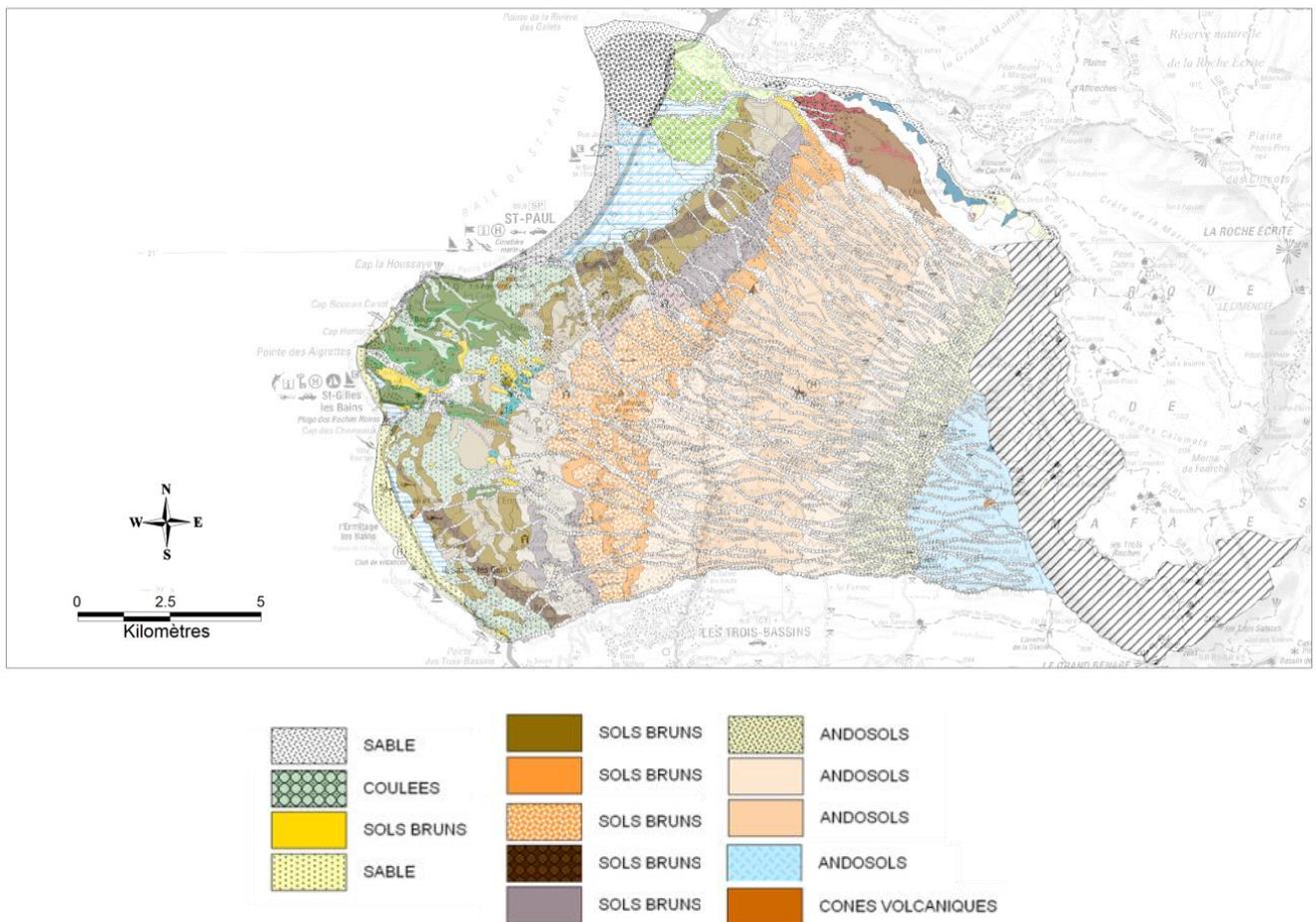


Figure 4 : Carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000 (source : C.I.R.A.D. (Raunet, 1991), fond : ©IGN Scan100® - 2010)

D'après la Figure 4, quatre grands ensembles se distinguent sur le territoire communal de Saint-Paul :

- en zone littorale, au niveau des cônes de déjection des ravines et en bordure des cours d'eau, on trouve des sables et des galets reposant sur des coulées ;
- du Cap la Houssaye à la pointe des Aigrettes, des sols bruns peu épais et caillouteux, jusqu'à 200 m d'altitude ;
- Entre 200 et 600 m d'altitude, une bande de sols bruns ferrugineux, caillouteux scindée en deux au niveau du lieu-dit le Bernica par des sols bruns épais sur cendres ;
- des andosols désaturés ou vitriques, généralement très caillouteux, dont l'épaisseur est relativement faible, entre 750 et 2250 m d'altitude ;

3.1.3. Contexte géomorphologique littoral

Généralités

Le territoire de la commune est incisé par des ravines délimitant des plateaux plus ou moins vastes. Ces ravines contribuent aux apports terrigènes (alluvions/colluvions) qui vont être

mobilisés le long du littoral notamment la baie de Saint-Paul qui est alimentée par la rivière des galets. Les principales ravines et rivière présentent sur le secteur d'étude sont, du nord au sud :

- Rivière des Galets (limite Nord du secteur d'étude) ;
- Ravine des Plaines ;
- Ravine Lolotte ;
- Ravine Divon ;
- Ravine Tête Dure ;
- Ravine Bernica ;
- Ravine Saint Gilles ;
- Ravine de l'Hermitage ;
- Fond Maunier ;
- Ravine de la Saline ;
- Ravine des Trois-Bassins (limite Sud du secteur d'étude).

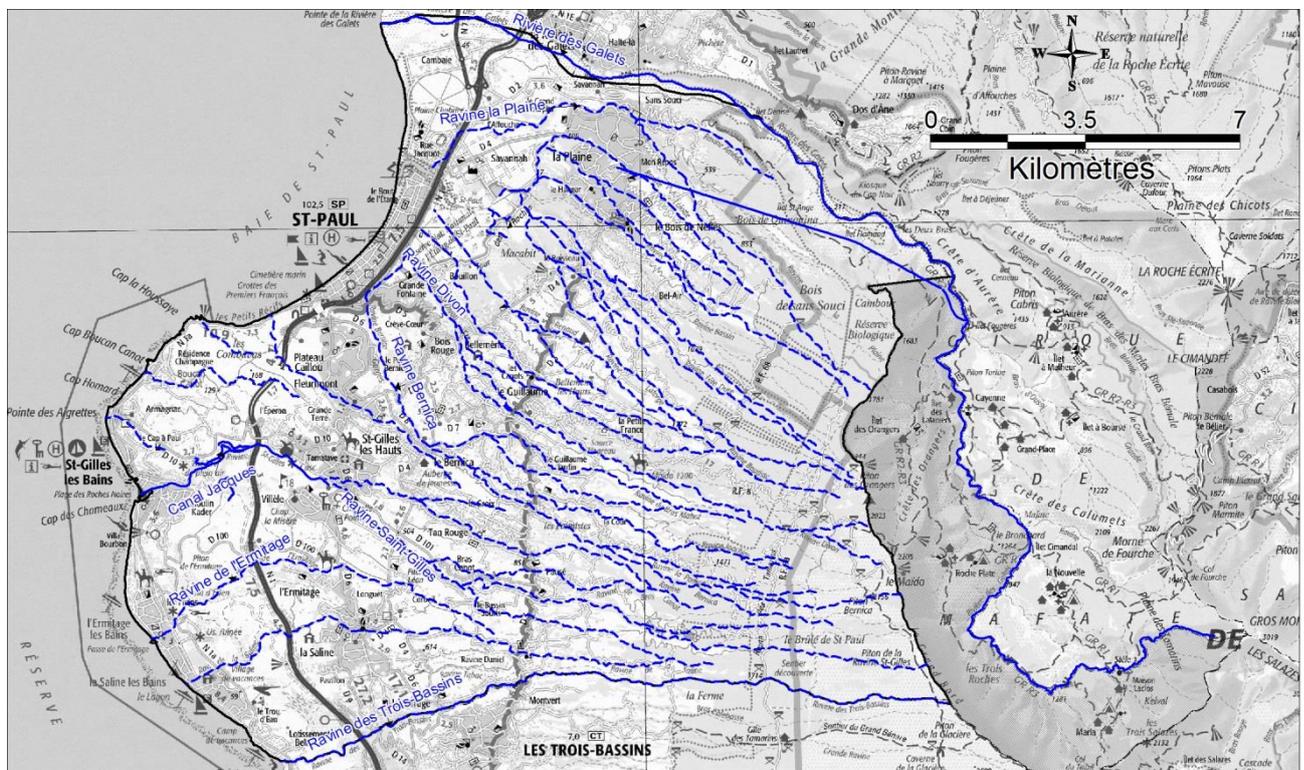


Figure 5 : Réseau hydrographique de Saint-Paul (source : BDtopo2012®, fond ©IGN scan100® - 2010)

Facies littorales et dynamique sédimentaire

Le littoral de Saint-Paul est composé de trois grands ensembles distincts. Un continuum sableux partant du sud de la commune jusqu'à Boucan-Canot. La côte rocheuse du Cap La Houssaye sépare le premier ensemble de la baie de Saint-Paul. Le troisième ensemble s'étend de La Baie de Saint-Paul jusqu'à la rivière des galets.

- **Les plages coralliennes**

Le secteur qui s'étend de la passe de trois-bassins jusqu'au Cap La Houssaye est constitué de nombreuses plages, pour la plupart, de sables coralliens délimitées par des caps rocheux et protégée des houles océaniques par un récif frangeant. L'orientation des côtes est très variable : NE-SO pour le secteur de Cap La Houssaye à la pointe des aigrettes, proche du nord entre le Port de Saint-Gilles et le village de vacances et NO-SE pour les secteurs au sud de la passe de l'Hermitage. Les plages peuvent être très aménagées comme celles de Boucan Canot et de Roches Noires.

Deux types principaux de plages coralliennes se rencontrent dans cette zone. Il s'agit des plages relativement évoluées de La Saline / l'Hermitage et présentant une extension sous-marine appelée à tort « lagon » localement (un lagon est l'espace marin situé entre la terre et un récif barrière, or le récif de La Saline / l'Hermitage est un récif frangeant).



Figure 6 : Facies littoraux des plages coralliennes de la commune de Saint-Paul (De La Torre, 2004)

La figure suivante présente la répartition des morphotypes de côte recensés lors de l'étude MorpholitReu1 (De La Torre, 2004).

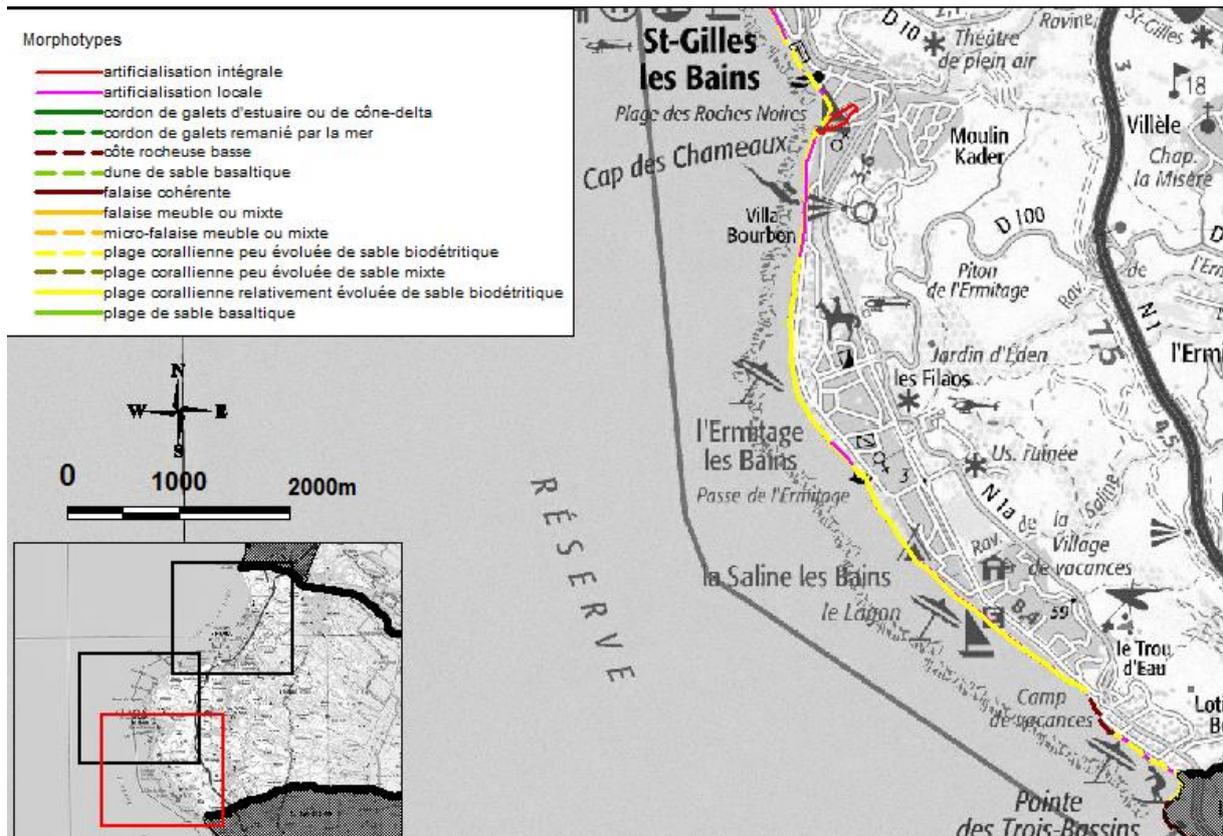


Figure 7 : Répartition des morphotypes sur le littoral Sud de la commune de Saint-Paul

Les plages de St Gilles (de Roches Noires à Boucan Canot) sont moins évoluées et ne possèdent qu'une extension sous-marine limitée aux passes dans le récif au débouché des ravines. De manière générale les plages « peu évoluées » ne présentant pas de dépression d'arrière-récif sont en équilibre grâce au double rôle du récif (protection et alimentation). Les aménagements situés sur le haut de plage (habitations) ne semblent pas perturber cet équilibre.

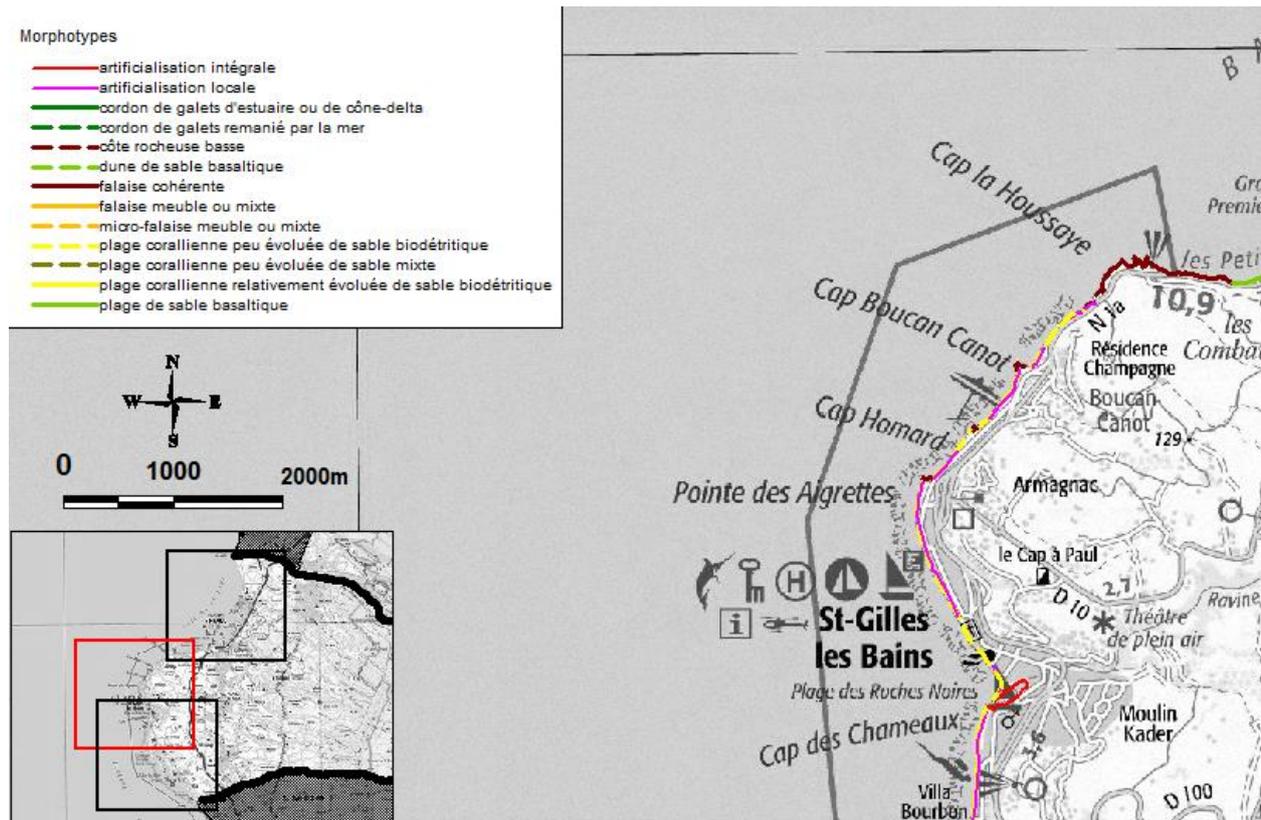


Figure 8 : Répartition des morphotypes sur le linéaire côtier entre Saint-Gilles et le Cap La Houssaye.

La morphologie des plages varie beaucoup selon les secteurs, la largeur allant de 5 à 50 m, certaines portions présentant des bermes (parfois végétalisées) et localement des beachrocks.

- **Les côtes rocheuses du Cap La Houssaye**

Les côtes rocheuses du Cap La Houssaye se présentent sous la forme de côtes basses au Sud (plate-forme d'abrasion ou extension terminale des coulées basaltiques) et de falaises vives sous-cavées au Nord.



Figure 9 : Photographie aérienne des côtes rocheuses du Cap La Houssaye (De La Torre, 2004)

- **La Baie de Saint-Paul**

Le secteur est principalement constitué du matériel alluvionnaire issu de la Rivière des Galets (plage de sable volcanique et cordon de galets). La Baie de Saint-Paul est bordée d'une plage de sable basaltique fin, de 30 à 40m de largeur. Elle est surmontée d'une berme de haut de plage localement végétalisée (filaos et Patate à Durand) et ponctuellement entaillées en microfalaise (notamment quand des aménagements sont construits directement sur celle-ci).



Figure 10 : Photographie aérienne du linéaire côtier de la baie de Saint-Paul (De La Torre, 2004)

La granulométrie des sédiments varie selon un gradient Nord-Sud. Alimentée en matériel alluvial par la Rivière des Galets, la baie connaît un tri granulométrique des galets aux sables dont la transition se situe approximativement au niveau de l'Etang St Paul. Le cordon de galet bien alimenté (jusqu'à 50 m de large) descend de l'embouchure de la rivière. Le cône-delta présente de larges chenaux avec des îlots végétalisés.

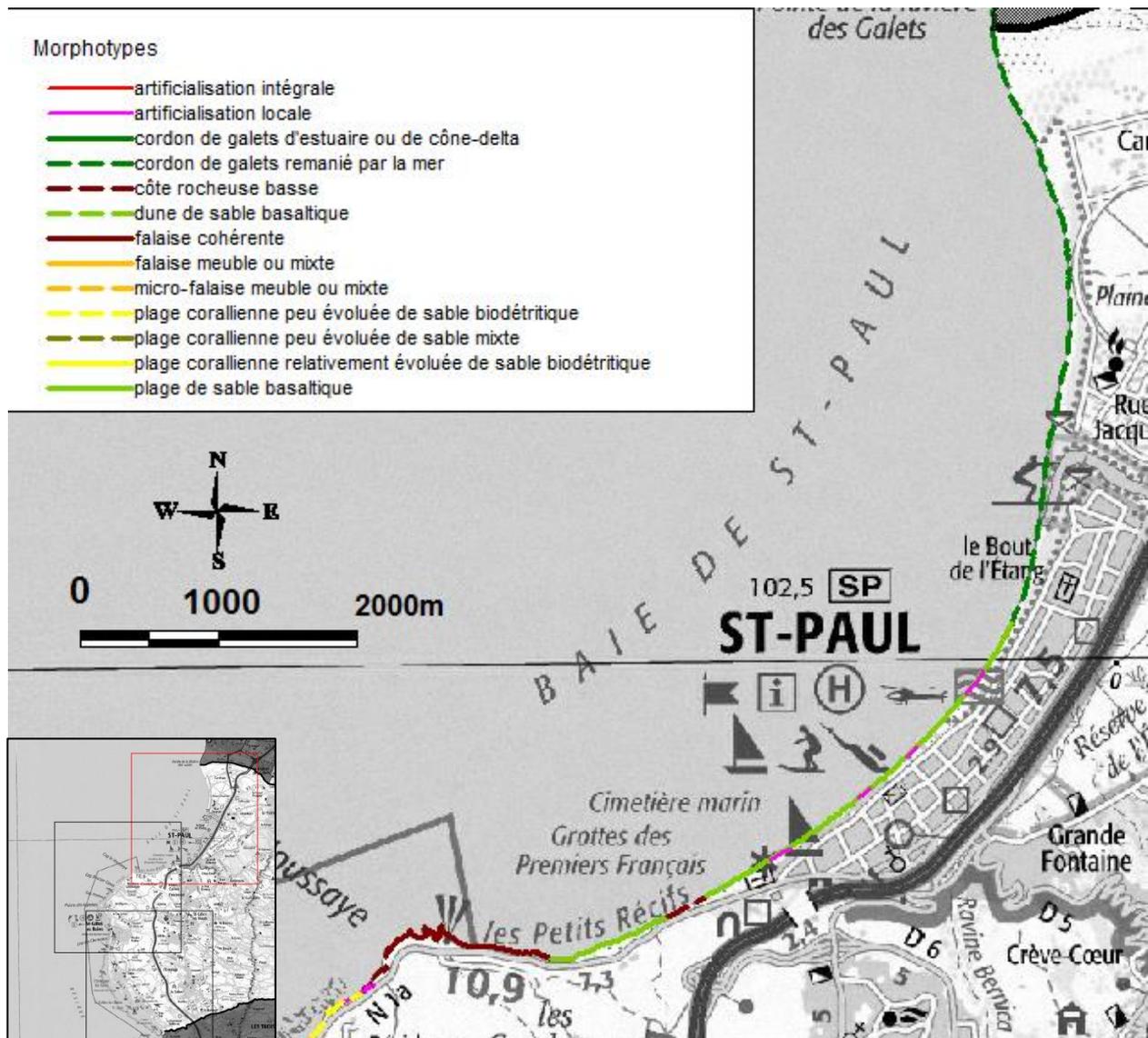


Figure 11 : Répartition des morphotypes du linéaire côtier de la baie de Saint-Paul (De La Torre, 2004)

3.1.4. 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 Saint-Paul, 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 détient les records mondiaux de pluviométrie cumulée pour des durées allant de 3 h (500 mm) à 12 jours (6 000 mm).

La Réunion est soumise à une variation temporelle des pluies. On distingue deux saisons :

- la saison des pluies, de décembre à avril,
- la saison sèche, de mai à novembre.

Pendant la saison sèche, les températures sont douces et les pluies peu abondantes. Sur la côte ouest, la pluviométrie des mois de juillet à octobre est très faible voire quasi nulle (moins de 100 mm mensuels). A l'Est, la pluviométrie reste tout de même importante et varie entre 100 mm à 300 mm par mois, notamment au niveau du volcan où la moyenne du mois le plus sec atteint 700 mm environ.

L'augmentation des précipitations pendant la saison des pluies est importante : à l'Ouest, la pluviométrie moyenne mensuelle se situe entre au moins 100 mm et 300 mm (sauf sur le littoral). Les températures sont plus élevées.

Selon les cartes d'isohyètes mensuelles de Météo France pour la période de 1970 à 2009, le mois de février est le mois le plus arrosé sur l'ensemble de l'île.

Située sur la côte « sous le vent », la commune de Saint-Paul affiche des valeurs de pluviométrie bien moindre que les territoires de la côte « au vent ». Les précipitations moyennes annuelles dans le secteur de Saint-Paul ne dépassent pas **1500 mm** en altitude (Atlas climatique de la Réunion, Météo France 2000, cf. Figure 12).

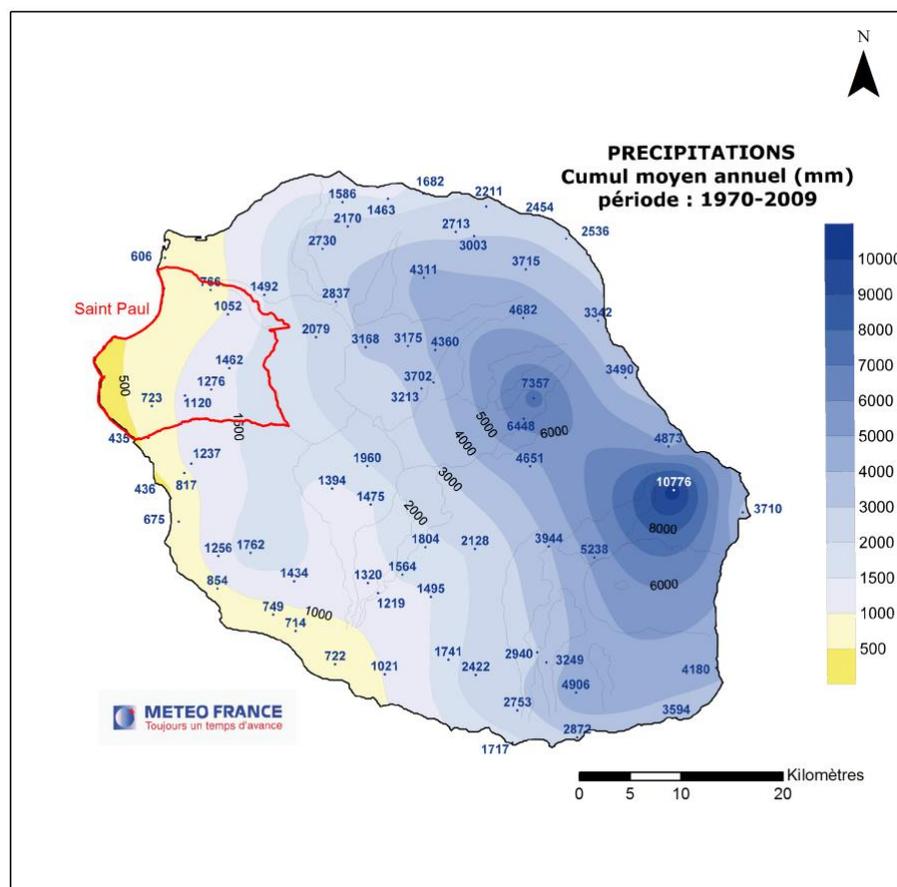


Figure 12 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (©Météo France 2010)

Météo France Réunion a réalisé une carte de zonage pluviométrique en 2010, tenant compte du relief (cf. Figure 13), qui qualifie les secteurs soumis à un régime pluviométrique similaire à proche. La commune de Saint-Paul est concernée par les régions 1 et 2 :

- La région 1 correspond à la bande littorale qui s'étend de Saint-Denis à Grands Bois (région 1) qui est la plus sèche de l'île toute l'année. Les précipitations s'y produisent essentiellement en saison des pluies et sont d'autre part très tributaires des événements cycloniques qui n'interviennent pas forcément tous les ans.
- La région 2 regroupant les hauts de l'Ouest, les cirques de Mafate et de Cilaos, et la Plaine-des-Cafres est très sèche de mai à octobre, mais elle bénéficie de précipitations nettement plus abondantes en saison des pluies.

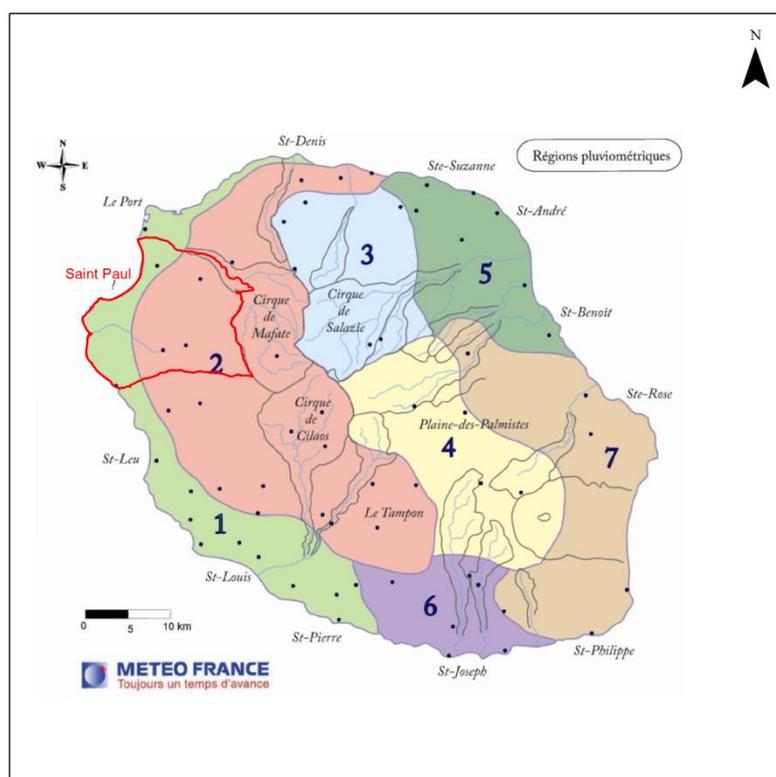
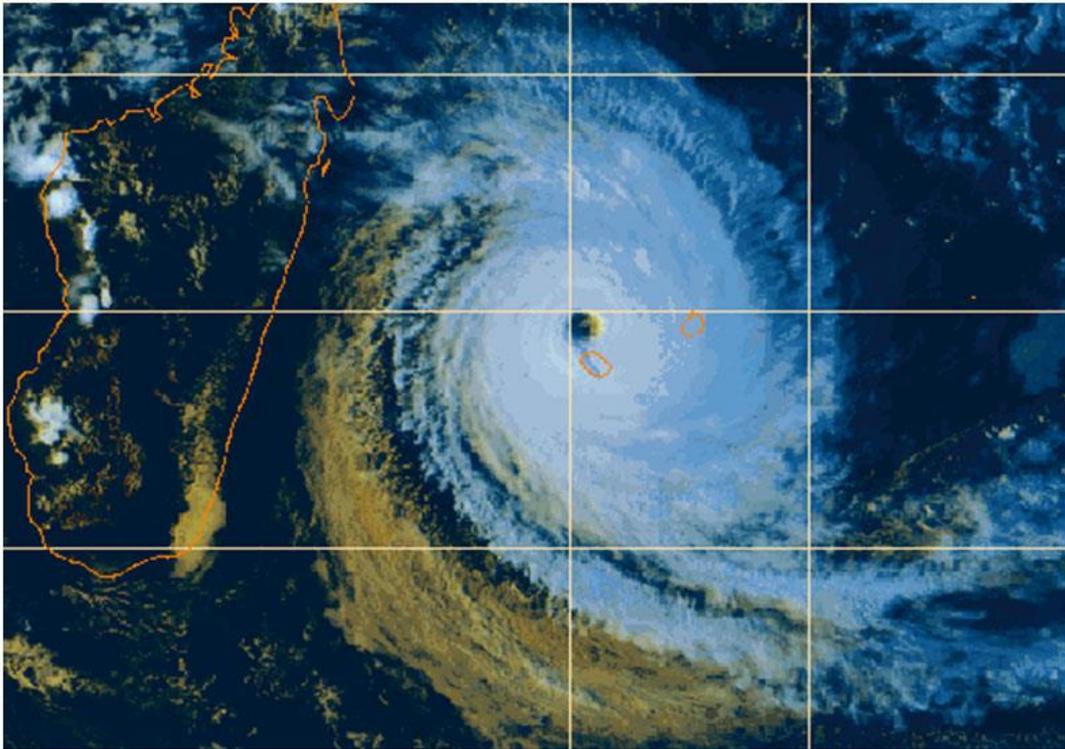


Figure 13 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)

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 est passé à peine à 30km des côtes, ce qui correspond au rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) a dépassée largement les 200km/h et les vagues ont atteint les 15m 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 publique de prévention soit en place sur l'île, le caractère imprévisible de la trajectoire des cyclones peut rendre difficile la gestion des risques. A La Réunion, le dernier cyclone à avoir fortement impacté le littoral réunionnais 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.

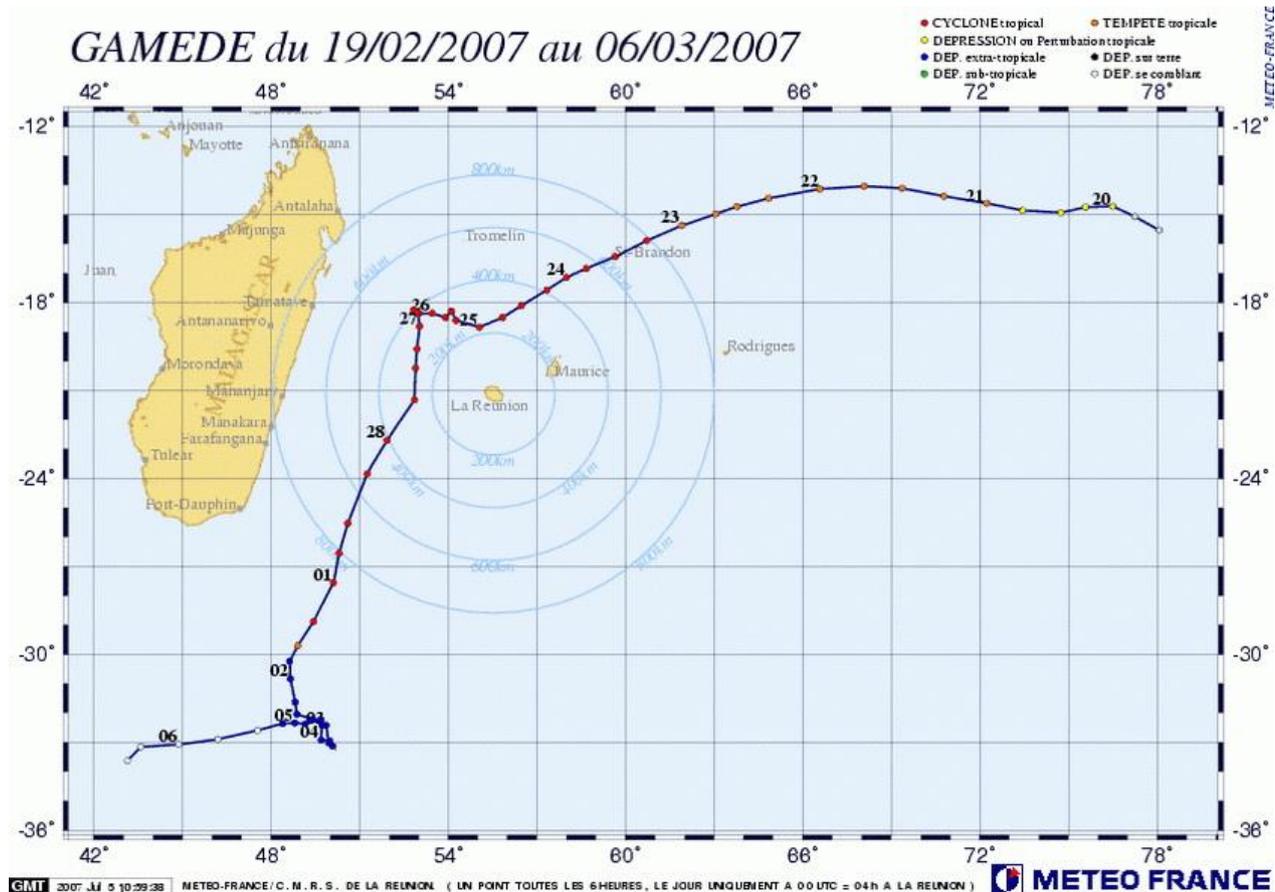


Figure 15 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)

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, bord de rempart, etc...).

Depuis, un système d'alerte cyclonique et des normes de construction 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 recevant du public. Les effets de cette consolidation progressive du parc immobilier réunionnais se fait malgré tout ressentir ces dernières décennies, bien que des cyclones tels que Clotilda (1987), Firinga (1989), Dina (2002), Gamède (2007), ou Béjisa (2014) aient engendré des dégâts considérables sur les biens et les personnes.

Les houles australes

La commune de Saint-Paul n'est pas seulement soumise à l'influence cyclonique estivale, et sont également concernées par les risques hivernaux et la survenue des grandes houles australes.

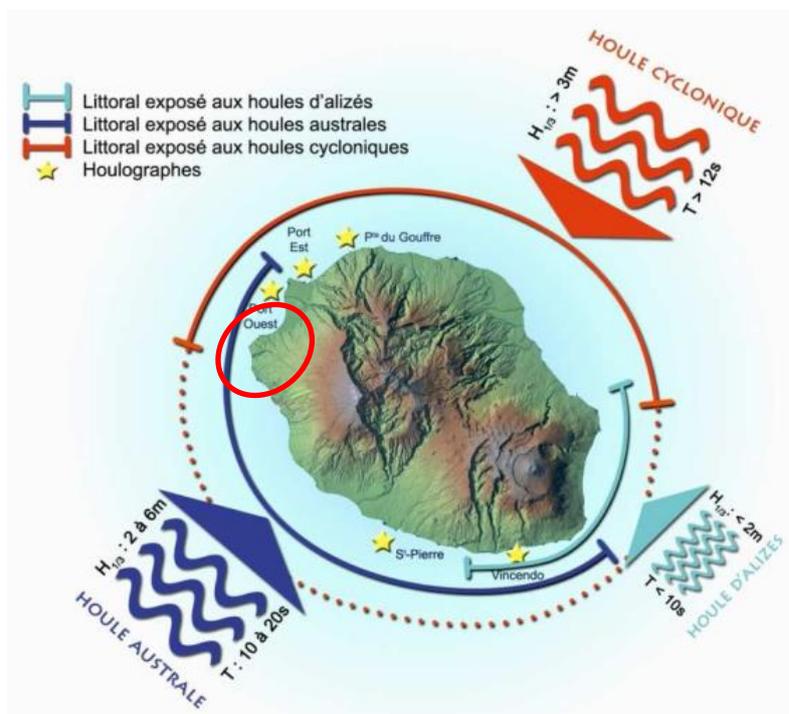


Figure 16 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).

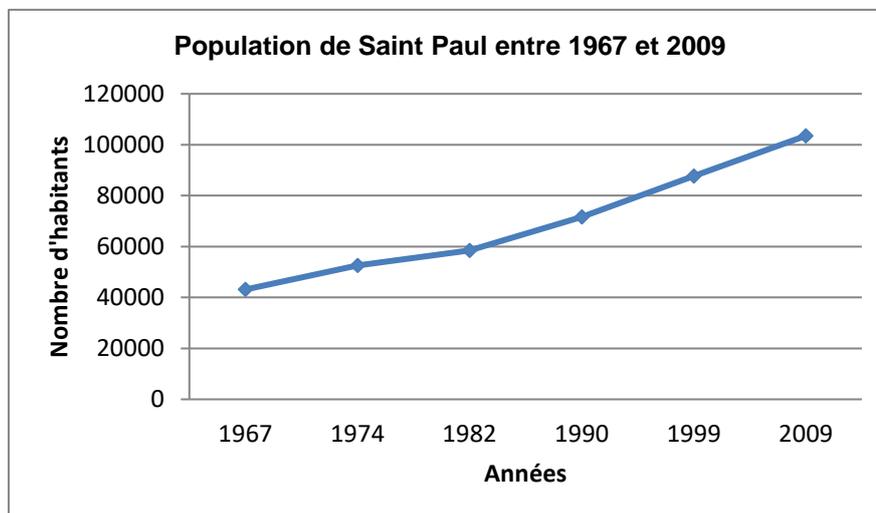
Les houles australes, de périodes relativement longues (périodes comprises entre 10 et 20 secondes), présentent des hauteurs moyennes de l'ordre de 3 à 4 m et affectent principalement les communes du Sud et de l'Ouest de l'île. Elles proviennent de tempêtes formées à 3 000 km au large, dans la zone tempérée de l'hémisphère Sud (plus précisément entre les 40^e et 50^e 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, atteignant une valeur maximale de 11,3 mètres (6,4 m de hauteur significative¹) à 19h selon les données du houlographe de Saint Pierre.

De par leur exposition à ouest, les littoraux de Saint-Paul sont soumis aux houles australes et aux houles cycloniques qui parviennent jusqu'à La Réunion.

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.

3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE

Évaluée à 43 129 personnes en 1967, la population de Saint-Paul a connu depuis une régulière augmentation, s'établissant selon l'estimation de l'I.N.S.E.E. à environ 103 498 en 2009 (soit un accroissement démographique de près de 140% en près de 40 ans).



	1967	1974	1982	1990	1999	2009	2012
Population	43 129	52 554	58 412	71 669	87 629	103 498	106 193
Densité moyenne (hab/km ²)	178,8	217,8	242,1	297	363,2	429	440

Tableau 2 : Evolution de la population de Saint-Paul (source : ©I.N.S.E.E.)

La densité démographique lors du recensement de 2009 était de 429 hab. /km² (contre 326,1 hab. /km² sur l'ensemble de l'île de La Réunion). Lors des dernières évaluations de 2012, la densité aurait encore progressé pour atteindre 440 hab. /km².

La commune de Saint-Paul se divise en deux secteurs urbains se développant en bordure de la R.N. 1, le long du littoral :

- centre-ville de Saint-Paul ;
- de « Boucan Canot » au « lotissement de Bellevue » (Pointe de Trois bassins)

Pour la totalité de la commune, le parc de logement s'établissait en 2009 à 38 331 unités (constitué à 90% de résidences principales), soit une augmentation de 86% depuis le recensement de 1990, illustrant ainsi une forte pression foncière existant sur la commune de Saint-Paul.

Saint-Paul a ainsi connu une croissance urbaine considérable à partir des années 1960, ce qui a contribué à une fixation du trait de côte par l'intermédiaire d'aménagements multiples (murs, digues, cales d'accès, etc.). Cette forte croissance n'est pas sans poser la question de l'exposition aux risques pour les populations concernées et récemment implantées.

La figure suivante présente deux photographies aériennes qui comparent le centre-ville de Saint-Paul et de Saint-Gilles entre 1950 et de nos jours.



Figure 17 : Urbanisation de la baie de Saint-Paul entre 1950 et 2012 (photographies aériennes IGN)



Figure 18 : Urbanisation de Saint-Gilles entre 1950 et 2012 (photographies aériennes IGN)

Outre le bâti, les principaux enjeux qui ont été répertoriés et cartographiés 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.1, D.101, D.100, D.5, D.6, D.3, D.10) ;
- 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.

Outre l'occupation du sol par l'activité agricole qui représente un enjeu économique, le milieu physique naturel représente un enjeu environnemental à travers les espaces remarquables du littoral.

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

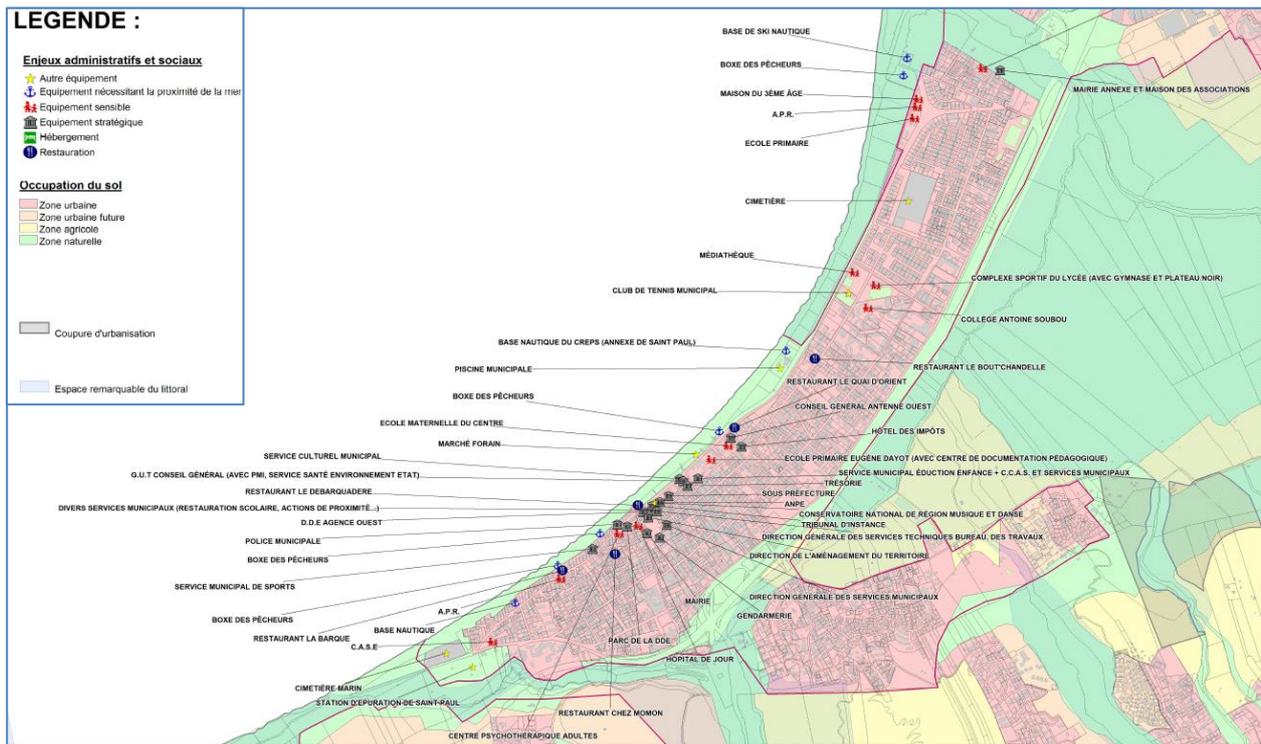


Figure 19 : Extrait de la carte des enjeux de la baie de Saint-Paul (Annexe 5 du dossier PPRL)

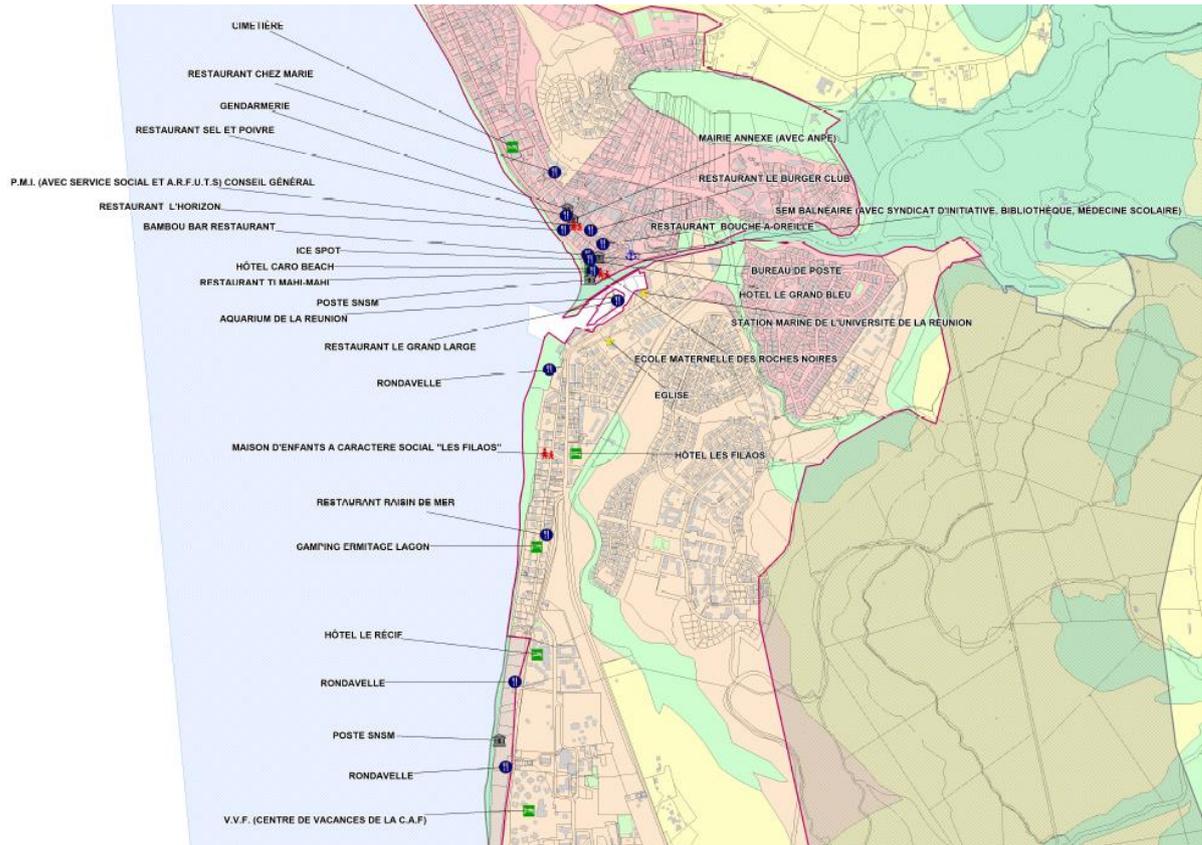


Figure 20 : Extrait de la carte des enjeux à Saint-Gilles (Annexe 5 du dossier PPRL)

4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels

4.1. PHENOMENES HISTORIQUES

Les données historiques sont disponibles sur la commune de St Paul, en particulier le recensement détaillé (typologie) et géolocalisé (couches SIG) des dégâts liés aux houles cycloniques de GAMEDE et des houles australes de 2007 (Sogreah, 2007). Ces informations sont reportées sur la cartographie présentée en annexe 3 du dossier PPRL.

En plus de cette base de données, un recensement des événements historiques a été mené. Cette connaissance historique est principalement issue de l'analyse d'archives, notamment des revues de presse (revue de presse de l'ex DDE : « Saint-Paul dans la tourmente », de témoignages et des articles de journaux. La liste des événements marquant est présentée dans l'encart suivant.

« A Saint-Paul, il fallait d'urgence évacuer tout le front de mer menacé par une forte marée de tempête », Témoignages, 16 février 1987 (Clotilda)

« La mer en furie a achevé de détruire le wharf et le môle. Le poste de douane, envahi par les lames a été enlevé et projeté en morceaux sur les rails. De nombreux filaos renversés sur la route. On travaille au rétablissement de la circulation », Le Peuple, 14 mars 1928

« Par suite fort raz de marée cette nuit, sévissant encore à présent, partie avant pont débarcadère présente inclinaison à 10 degrés environ, échelle brisée cette nuit n'a pu être enlevée », Télégramme au Gouverneur, 18 février 1927

« Cyclone de hier soir 7h à ce matin 6h, fortes bourrasques, mer démontée, beaucoup d'eau. Pas de nouvelles des campagnes », Dépêche télégraphique, 3 décembre 1901

« Dans la journée du dimanche 1^{er} février, le temps commença à prendre une vilaine apparence ; vers 3 heures de l'après-midi, la mer devint assez forte pour empêcher les communications avec la terre (...). Rien alors ne faisait pressentir que la violence de la mer dût dépasser celle des raz de marée ordinaires ; mais pendant la nuit du 1^{er} au 2 février les lames déferlèrent avec tant de force que l'inquiétude se fit sentir (...). La mer se déchaîna avec une fureur telle que plusieurs lames vinrent avec force couvrir la plage dans toute son étendue (...). Le sable à chaque coup de mer était enlevé avec une extrême rapidité, de façon que déjà les fondements des magasins de la douane et du port commençaient à se découvrir. C'est à ce moment que le caporal du génie Buissière (...) fût entraîné par la mer ; du parc à charbon, ce malheureux fut transporté par les lames de l'autre côté du pont (...). Tout travail devint alors impossible ; je répondis au lieutenant Aubry (...) qu'à mon avis on ne pouvait plus songer à continuer le sauvetage sans exposer certainement la vie des hommes (...). Vers onze heures, le bureau de la douane commençait à s'écrouler et dans l'après-midi, il n'en restait plus le moindre vestige. La partie nouvelle du pont était enlevée ; la moitié du bureau du port tombait et le mât de pavillon s'abattait. A 2 heures, une lame vint jeter en travers de la rue Labourdonnais une des grosses embarcations des marines ; le garde de police Aristole Hortencia n'eut pas le temps de se retirer et fut écrasé entre cette embarcation et un canon-borne (...) ». Témoignage du commissaire de police de Saint-Paul, Le moniteur de la Réunion, 11 février 1863

« Aux Roches Noires, pratiquement tout le sable a été emporté par les vagues et l'eau de la ravine. Il n'y a plus de plage », Témoignages, 16 février 1987 (Clotilda)

« A Saint-Gilles, l'enceinte du nouveau port à bien sûr été submergée », Journal de l'Île de la Réunion, 28 Janvier 1870 (Hermine)

« Le village de Saint-Gilles-les-Bains est presque rasé (...). Les eaux de la ravine de Saint-Gilles ont envahi le quartier, atteignant le niveau de 1m50, détruisant cultures vivrières, volailles et quelques bœufs. La mer a déferlé sur le rivage atteignant la voie ferrée, sur presque tout le parcours du village », Le Progrès, 3 février 1948

« A Saint-Gilles, le centre d'hébergement était situé en plein sur le Port...les pieds dans l'eau pratiquement. Aussi, lorsque les vagues commencèrent à déferler et à porter sur la terre ferme ou carrément au fond de l'eau les bateaux du port, a-t-il fallu déménager en hâte tous les gens recueillis à ce centre marina », Le Quotidien, 29 janvier 1980 (Hyacinthe)

« Le battage des pieux du batardeau a été repris. Cependant, le piqueur Belleme m'a fait connaître ce matin que les hommes refusaient de travailler dans l'eau, le treuil à bras étant couvert de 0m75du fait d'un raz de marée qui sévit en ce moment (...). Aussitôt le raz de marée terminé, je ferai ouvrir un canal dans le banc de sable qui obstrue l'étang afin de faire baisser le niveau de l'eau », Courrier du chef de section de la voie et des bâtiments au directeur du chemin de fer de la Réunion, 13 mai 1931

« Construit en bordure de littoral, l'hôtel le Maharani à Boucan Canot a subi les effets de Gafilo hier. L'eau est montée jusque dans la salle des deux restaurants, provoquant quelques dégâts. (...) "L'eau est passée de partout. Ça a été très surprenant" (...). Depuis samedi, la mer est très agitée sur le littoral Ouest, en raison notamment du passage du cyclone Gafilo. Toute la journée de samedi d'ailleurs, la baignade a été totalement interdite sur la plage de Boucan-Canot. Une interdiction toujours en vigueur hier avec un renforcement de la houle. (...) Vers 14h30 hier (...), une déferlante plus forte que les autres a complètement inondé la salle. "Il y a eu une série de trois vagues. On n'a rien pu faire. On a bien vu une énorme vague chargée de sable arriver. C'était tout noir. L'eau est passée par les fenêtres, le système d'évacuation... il y a avait bien 40cm d'eau dans la salle du restaurant" raconte Martine Vassard, la directrice de l'hôtel Saint-Gillois depuis le mois d'août dernier. (...) Après avoir inondé la salle du restaurant, l'eau est montée jusqu'au niveau de la piscine où jouait un groupe d'enfants. "Quand on a vu la vague arriver, on a plongé dans la piscine pour ne pas être emporté (...) La vague était tellement grosse qu'elle a cassé un palmier. On a même retrouvé un poisson dans le jacuzzi ". Si dans le restaurant on notait surtout la présence de sable et de quelques verres brisés sur le sol, les dégâts semblaient plus importants dans la salle réservée à la cuisine indienne. Plusieurs vitres ont volé en éclats. La vague a même arraché quelques encadrements des fenêtres... » Le Journal de l'Île de la Réunion, mars 2004 (Gafilo)

« La terrasse du restaurant le Toboggan a été rasée de la plage de l'Hermitage. (...) La plage de l'Hermitage ne ressemble plus qu'à un cimetière de souches mortes. (...) Tout cela résulte d'un mini raz de marée qui s'est produit hier matin. "J'étais à côté des pédalos quand je me suis pris une grosse vague en pleine figure (...) J'ai vraiment été surpris par cette lame, c'était impressionnant". Le phénomène a ainsi duré plusieurs heures. La terrasse du Toboggan a complètement été rasée. Celle-ci reposait sur un pan de sable qui s'est littéralement effondré sous le poids des vagues. Les gérants ont mis des heures entières à débarrasser le sable des dizaines de poutres en bois. Le restaurant empiétait largement sur la plage depuis des années déjà. Les éco-gardes du parc marin affirment avoir surpris à plusieurs reprises les responsables du restaurant sinistré en train de prélever du sable pour consolider leur terrasse. "Depuis 5 ans maintenant, on alerte les plagistes sur les dangers liés au prélèvement de sable qui constitue la base même de la plage. Depuis longtemps également, on demande aux responsables du Toboggan de se mettre dans la légalité". Outre les souches, de nombreuses pièces de bois ainsi que des feuilles de tôles étaient éparpillées sur la plage méconnaissable » Le Quotidien, 2 Septembre 2003

« Branle-bas de combat et rassemblement général sur la plage de l'Hermitage. Hier, tous les services qui ont affaire avec le littoral se sont retrouvés sur ces lieux où, quelques heures plus tôt, une houle d'une puissance rare a déferlé. (...) Chacun constate les dégâts et s'étonne de leur ampleur. "C'est

vraiment exceptionnel. Même en saison cyclonique, je n'ai jamais vu ça. L'effet conjugué d'un fort coefficient de marée et de l'équinoxe a été terrible" déclare un agent de l'équipement. Mais ce phénomène, qui en a surpris plus d'un par sa violence, est surtout lié à une puissante dépression située à environ 3 500km de la Réunion, du côté des Kerguelen. C'est avant tout elle qui a généré ces vagues qui ont pu dépasser les huit mètres. (...) Les racines de filaos qui sont apparues depuis hier témoignent que la houle a fortement raviné la plage. Une très grande quantité de sable est partie, à certains endroits sur plus de deux mètres de hauteur. Evidemment, des arbres se sont couchés ; d'autres ont été fragilisés », Le Quotidien, 2 Septembre 2003

L'enquête publique a montré que d'autres événements ont pu avoir lieu. En effet, il semblerait qu'en Mai 1968, de fortes houles australes ont également impacté le secteur situé entre la plage de Boucan Canot et Trou d'eau.

4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELS

Depuis 1993, 11 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur la commune. Le tableau 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	18/01/1993	20/01/1993	18/05/1993	12/06/1993
Inondations et coulées de boue	15/02/1993	17/02/1993	14/06/1993	27/06/1993
Inondations et coulées de boue	10/02/1994	12/02/1994	12/04/1994	23/04/1994
Inondations et coulées de boue	22/01/2002	23/01/2002	05/02/2002	08/02/2002
Inondations par remontées de nappe phréatique	22/01/2002	23/01/2002	05/02/2002	08/02/2002
Mouvements de terrain	22/01/2002	23/01/2002	08/04/2002	18/04/2002
Vents cyclonique	22/01/2002	23/01/2002	05/02/2002	08/02/2002
Inondations et coulées de boue	02/03/2005	02/03/2005	23/09/2005	08/10/2005
Inondations et coulées de boue	17/02/2006	18/02/2006	10/11/2006	23/11/2006
Inondations et coulées de boue	04/03/2006	06/03/2006	10/11/2006	23/11/2006
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	24/02/2007	28/02/2007	23/03/2007	28/03/2007
Inondations et coulées de boue	24/02/2007	26/02/2007	23/03/2007	28/03/2007
Chocs mécaniques liés à l'action des vagues	12/05/2007	13/05/2007	31/03/2008	04/04/2008
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	06/02/2009	08/02/2009	25/06/2009	01/07/2009
Inondations et coulées de boue	04/02/2010	04/02/2010	10/05/2010	13/05/2010
Inondations et coulées de boue	29/01/2011	30/01/2011	30/03/2011	06/04/2011
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	02/01/2014	03/01/2014	13/05/2014	18/05/2014
Inondations et coulées de boue	02/01/2014	03/01/2014	13/05/2014	18/05/2014

Tableau 3 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Saint-Paul (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 30/06/2014)

Les ouvrages généraux de Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998), indiquent les cyclones majeurs ayant concernés La Réunion, et plus ou moins directement la commune de Saint-Paul, depuis 1980 (cf. Tableau 4.).

Cyclones	Passage au plus près des côtes réunionnaises	Pression minimale (hPa)	Vents max (Km/h)	Hauteur de houle
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)	-

Tableau 4 : Liste des cyclones notables selon Météo-France

Cette liste peut être complétée par le cyclone Béjisa de janvier 2014 dont le mur de l'œil est passé à une dizaine de kilomètres de la pointe des Trois-Bassins avec des vents maxi instantanés enregistrés à 178 km/h au gîte de Bellecombe.

4.3. CARACTERISATION DES ALEAS LITTORAUX

4.3.1. Définitions et notions générales

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.

4.3.2. 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 recul. Les côtes à falaises ne peuvent quant à elles que reculer. Leur recul est souvent plus complexe à appréhender du fait de la combinaison des actions continentales (infiltration, ruissellement, etc.) en haut de falaise et des actions directes de la mer. L'évolution du trait de côte dépend de plusieurs paramètres :

- 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.

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

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

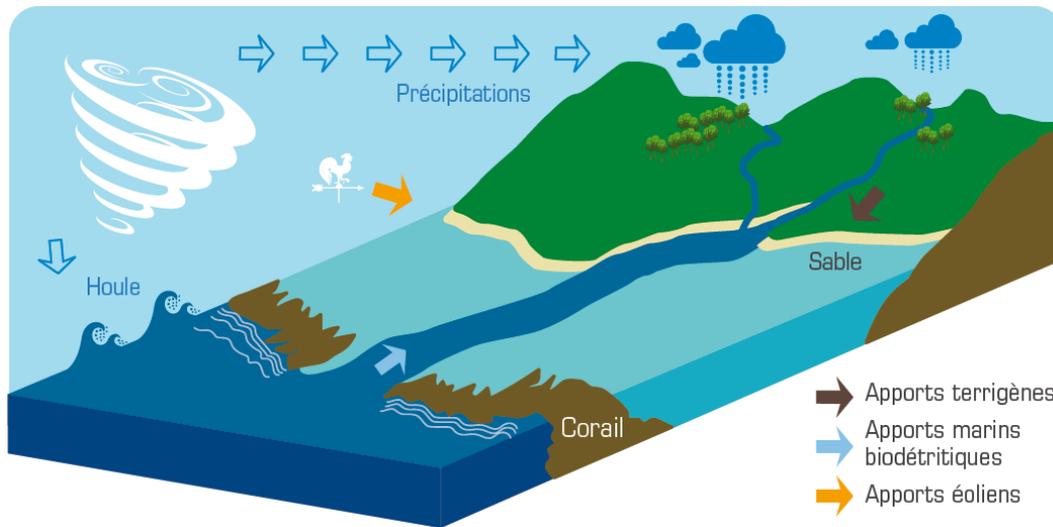


Figure 21 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

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 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 22 – 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).

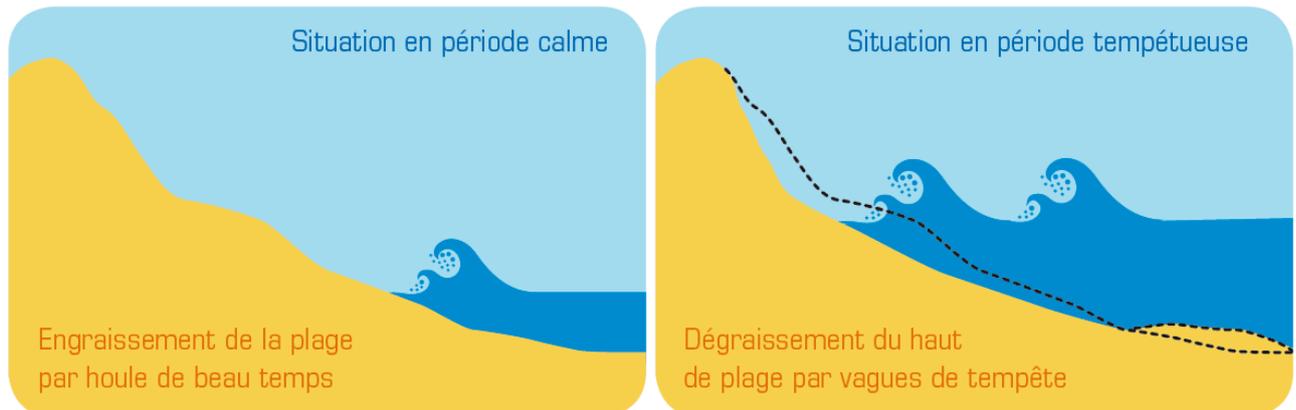


Figure 23 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)

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 (cf. Figure 24) :

- 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).

³ Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs



Figure 24 - Les manifestations de l'érosion sur les côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)

Suite à des évènements 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 », correspondant à la capacité du trait de côte à se recharger naturellement à la suite d'un évènement 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 (cf. Figure 25) :

- Sous-cavage ;
- Fracturation de la roche en partie sommitale et/ou frontale ;
- Eboulements/effondrements de pans de falaises.

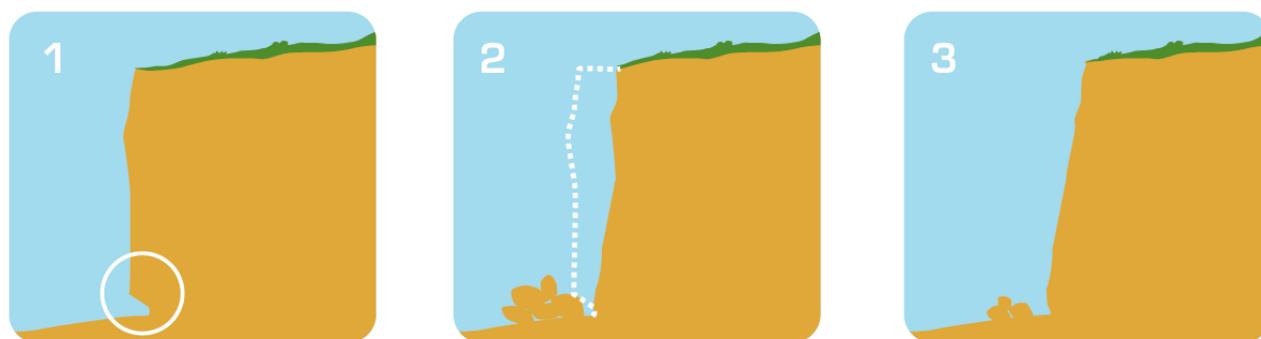


Figure 25 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)

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 5).

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

L'aléa RTC sur les communes de Saint-Paul

La commune de Saint-Paul présente différents rythmes d'érosion sur son linéaire côtier en lien avec la variété des morphotypes de sa cote, l'exposition aux forçages marins et de l'occupation anthropique.

- **Les plages coralliennes**

Ce linéaire de côte est exposé Ouest et Nord-Ouest. Elle est donc exposée à une érosion ponctuelle liée aux épisodes cycloniques et de houles australes, mais également à une érosion chronique liée à des processus multi-facteurs (anthropisation, courant de vidange du lagon). Ce secteur est naturellement protégé par la barrière de corail qui atténue au moins partiellement l'effet érosif de la houle lors des événements énergétiques. Les secteurs situés à proximité de la passe de l'Hermitage subissent une forte érosion en raison de sa plus grande exposition aux tempêtes et de sa forte fréquentation (recul de la végétation à cause du piétinement).



Figure 26 : Erosion à proximité de la passe de l'Hermitage (De La Torre, 2004)

Il en résulte un départ de sable en haut de plage comme en témoignent les racines mises à nu des filaos. Le sable emporté par le courant de vidange de la passe ne peut ensuite pas remonter la plage à cause de l'obstacle que constitue le récif. La résilience est ici quasi-nulle.

- **La côte rocheuse du cap La Houssaye**

Les côtes rocheuses du Sud du Cap La Houssaye sont peu sensibles à l'érosion. Du côté Nord, elles sont le siège d'une lente érosion comme en atteste le sous-cavage des falaises.

- **Baie de Saint-Paul**

Lors d'événements extrêmes de houles australes ou lors de houles cycloniques, des forts courants de retour sont à l'origine de l'érosion ponctuelle de la plage suite à des transits de sédiments de la plage vers les fonds marins. Le transport sédimentaire longitudinal en baie de Saint Paul est principalement régi par les courants de dérive dus aux houles australes et cycloniques. Les houles australes sont principalement à l'origine de la dérive littorale sud-nord alors que les houles cycloniques sont à l'origine de la dérive littorale nord-sud.

A titre d'exemple le cyclone GAMEDE (2007) a engendré de nombreux dégâts sur la baie de Saint-Paul comme en témoigne la photographie suivante.



Figure 27 : Photographie du secteur du débarcadère après le passage de GAMEDE (2007) (photo BRGM).

Si l'érosion du littoral est un phénomène naturel, l'érosion du cordon sédimentaire de la baie de Saint-Paul semble avoir été accélérée par les aménagements anthropiques. Suite à l'urbanisation de l'arrière plage d'une majeure partie de la baie de Saint Paul, zone vulnérable aux aléas côtiers, les ouvrages de protection longitudinaux ont favorisé les pertes de sable lors d'évènements extrêmes et entraîné l'abaissement progressif du profil de plage au niveau des aménagements.

4.3.3. 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 28) 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.

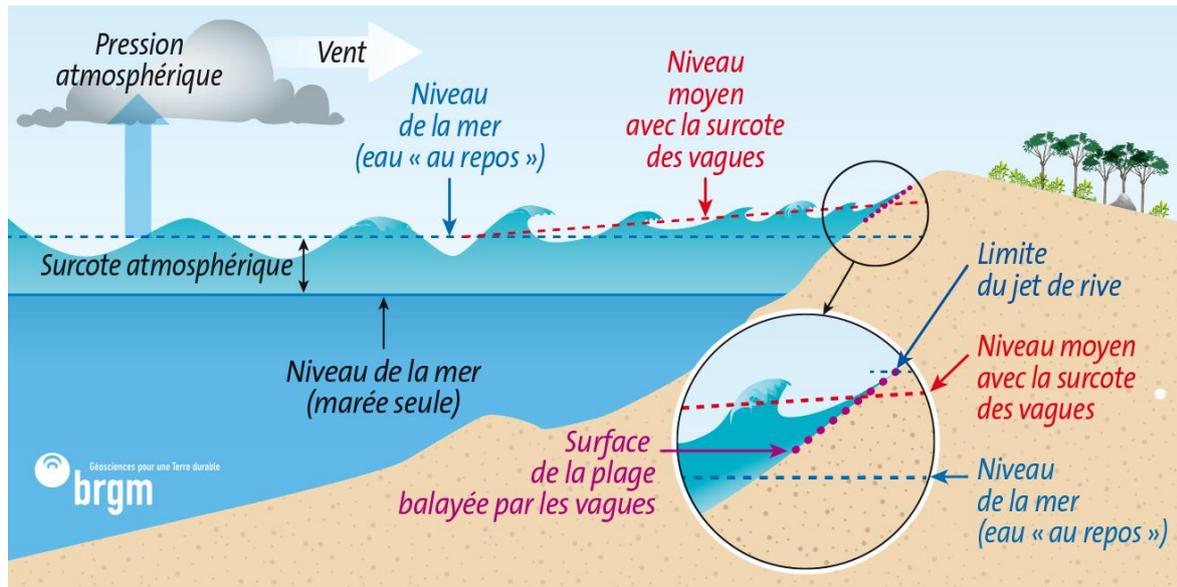


Figure 28 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).

On distingue traditionnellement plusieurs types de submersions marines (cf. Figure 29) :

- ✓ 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).

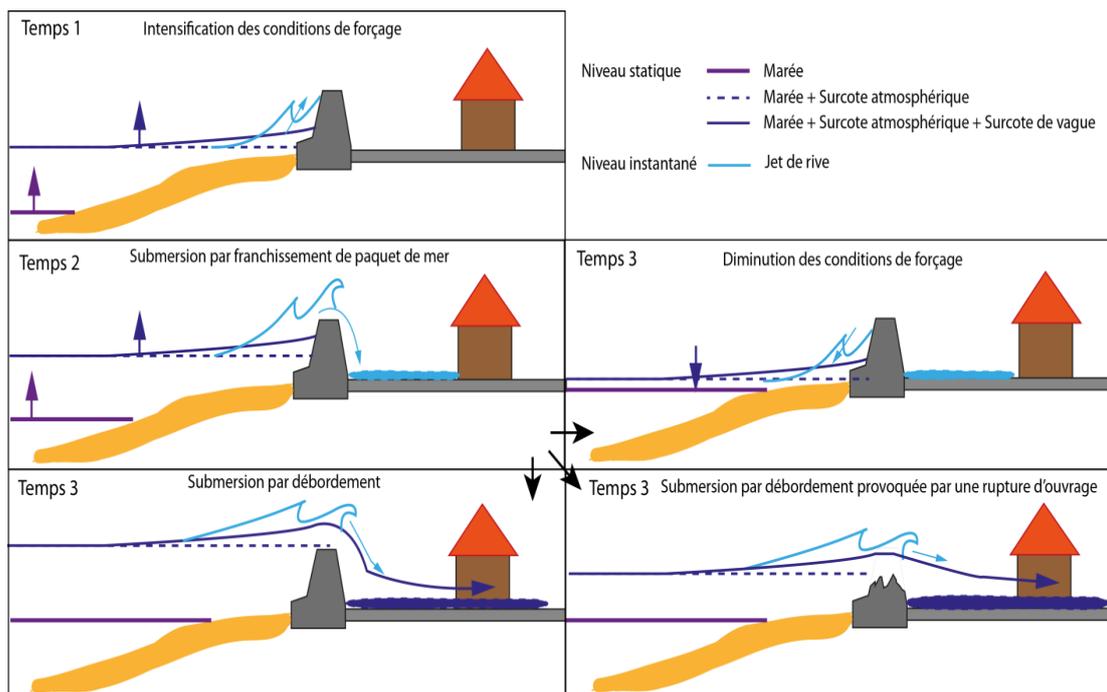


Figure 29. Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M., 2012)

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 30).

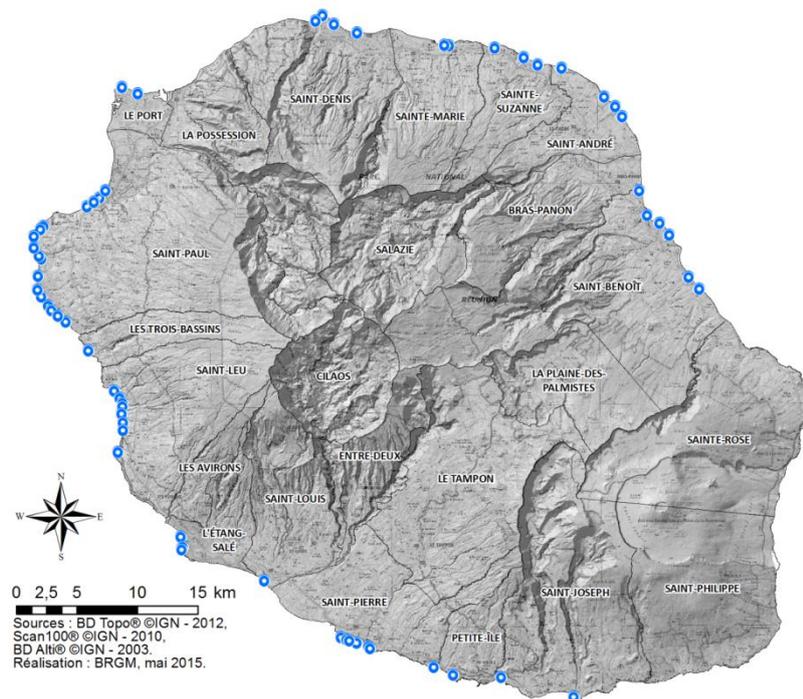


Figure 30 - Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois, 2014)



Figure 31 - 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 Saint-Paul

Le littoral de Saint-Paul est sujet à la submersion marine. Historiquement, plusieurs évènements ont été recensés (Annexe 3 : Carte de synthèse des modes de submersion et des données historiques de l'aléa submersion marine). L'analyse du modèle numérique de terrain (SHOM-IGN, 2012) communal réalisé à partir des données lidar⁴, montre que plusieurs secteurs présentent une importante vulnérabilité à la submersion en raison d'une altitude proche du niveau marin (2m à 3m NGR) en arrière du cordon littoral (Figure 32).

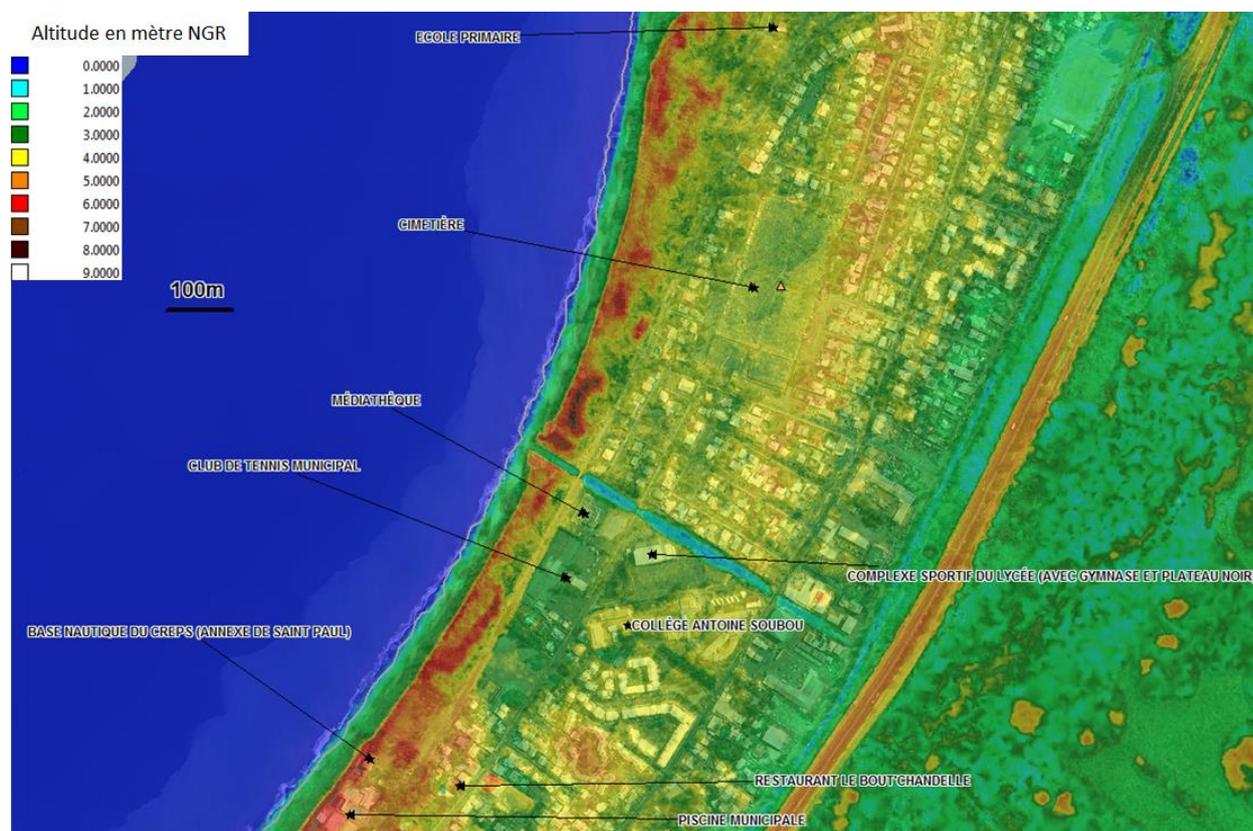


Figure 32 : Cartographie de la topographie du littoral de la baie de Saint-Paul (Litto3d, IGN-SHOM – fond : orthophotographie 2012, IGN)

⁴ Le lidar ou « light detection and ranging » est une technique d'acquisition topographique et/ou bathymétrique de haute densité. La mesure est basée sur le calcul du délai entre l'émission et la réception d'un signal lumineux par technologie laser, la vitesse de la lumière étant une constante connue.

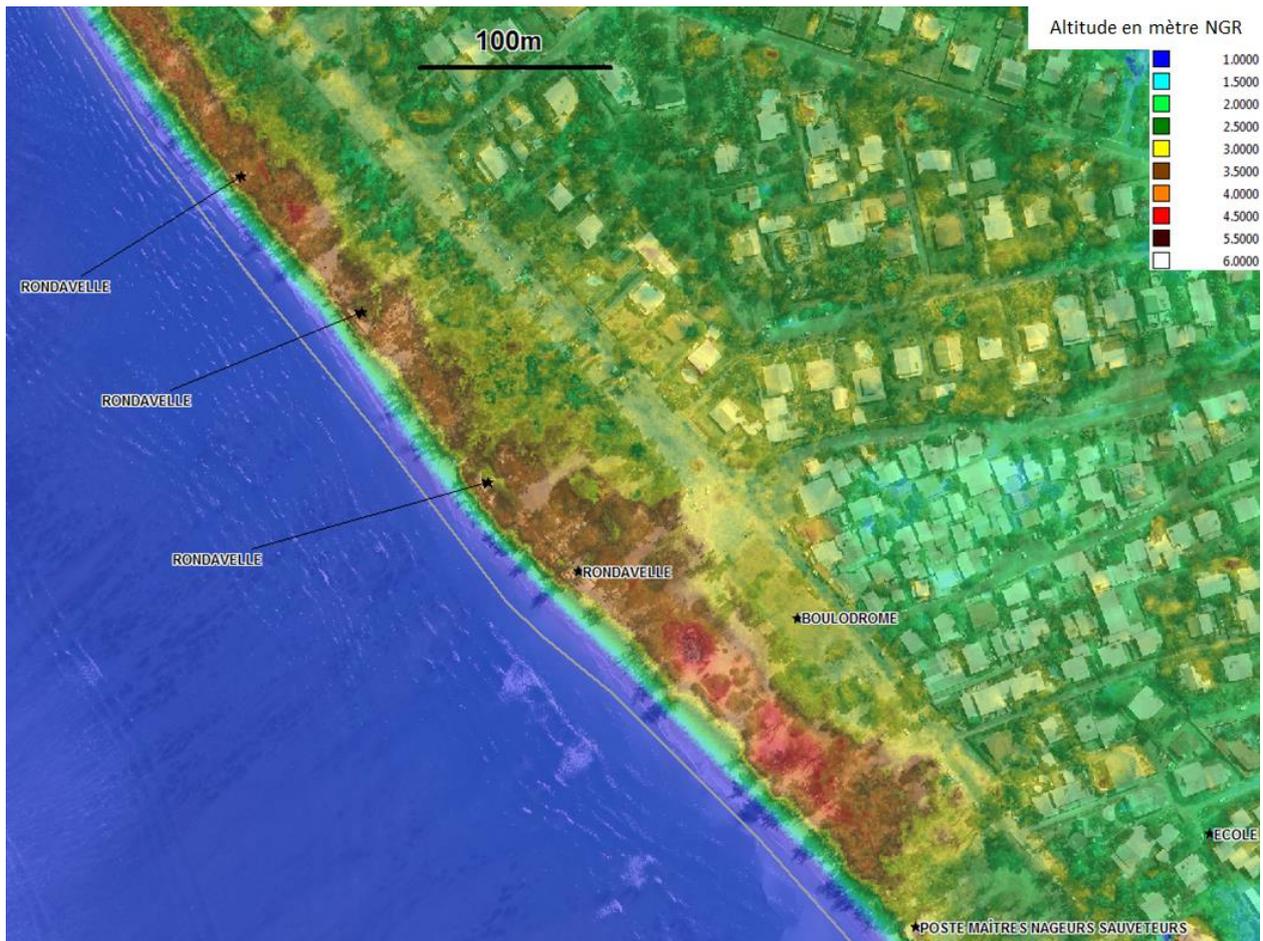


Figure 33 : Cartographie de la topographie du littoral du secteur situé au nord de la passe de l'Hermitage (Litto3d, IGN-SHOM – fond : orthophotographie 2012, IGN)

Les houles du cyclone GAMEDE (2007) et les houles australes de juillet 2007 ont eu un impact important sur le littoral de Saint-Paul comme le montre cette photographie aérienne suite au passage de GAMEDE (2007), (Figure 34).



Figure 34 : Photographie aérienne des impacts de la houle cyclonique et d'une zone de franchissement sur la baie de Saint-Paul (SOGREAH, 2007)

5. Caractérisation et cartographie de l'aléa recul du trait de côte

La caractérisation et la cartographie de l'aléa du présent projet sont inspirés des travaux réalisés en 2012 et sont présentés dans le rapport ALEACOT Saint-Paul (De La Torre Y., 2012).

5.1. CADRE METHODOLOGIQUE NATIONAL

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

- du recul L_{max} lié à événement tempétueux majeur ;
- des ouvrages de protection ;
- du changement climatique.

La méthodologie globale ainsi que les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le tableau suivant et précisés dans les chapitres 2.2 et 2.3 :

Etape 1	Analyse de la cinématique du trait de côte		
Analyse diachronique (100 Tx)	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 événement majeur (L_{max})	Données historiques sur un événement majeur	Modèle numérique (modélisation morphodynamique liée à une tempête spécifique)	Analyse géomorphologique à dire d'expert
Zone soumise à l'aléa	$L_r = 100 \text{ Tx} + L_{max}$		
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 événements 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 100 ans	Prise en compte de l'évolution des zones naturelles adjacentes non protégées (si existantes à échéance 100 ans)	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 cent ans		
Côtes basses meubles sans évolution historique récente	Même règle de trois basée sur les reculs occasionnés lors d'un événement 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 L_{max})		
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 6 : 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. ESTIMATION DU REcul DU TRAIT DE COTE A 100 ANS

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 » (MEDDTL, 2011).

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

- préparation des photographies aériennes ;
- définition et numérisation du trait de côte aux différentes dates ;
- calcul du recul du trait de côte à échéance 100 ans⁵.

5.2.1. Préparation des photographies aériennes anciennes

Les photographies utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes couvrant la commune de Saint Paul de 1966 à 2008 (Tableau 7).

Années	Nature des clichés	Echelle de prise de vue	Résolution image numérique
1966	Noir/Blanc	1 : 50 000	1 pixel = 1 m
1978	Couleur et Noir/Blanc	1 : 20 000	1 pixel = 0.5 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

Tableau 7 : 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 et 2008 sont issues du produit « BD Ortho ». Celles de 1966 et 1978 ont été orthorectifiées spécifiquement pour les besoins du BRGM (De la Torre *et al.*, 2012).

5.2.2. Définition et numérisation des traits de côte

Compte-tenu de la variabilité du littoral et des conditions d'agitation (déferlement des vagues) changeantes d'une date à l'autre, la définition du trait de côte ne peut se suffire au contact terre-mer visible sur les photographies aériennes.

La limite haute du littoral a donc été privilégiée pour matérialiser le trait de côte, à savoir (Figure 35) :

⁵ On parle d'une échéance à 100 ans par simplification. 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 $90 (+/- 2 \text{ ou } 3) \times Tx$. Il est décidé de simplifier et de considérer une formule unique $100.Tx$ pour le recul du trait de côte à échéance 2100.

- la limite de végétation ou le pied des aménagements pour les côtes basses ;
- la partie sommitale du versant pour les côtes à falaise.

Le trait de côte a été numérisé sous SIG par digitalisation à l'écran à une échelle de 1/2500 en prévision d'une restitution cartographique au 1/5000. Le type de limite de trait de côte considéré est renseigné dans les données attributaires de la couche SIG ainsi créée.



Figure 35 : Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral de St Paul

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, ...). Elle est estimée globalement entre 5 et 10m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à 10 m ont été écartés de l'étude.

5.2.3. Calcul du recul du trait de côte à 100 ans

L'utilisation de l'extension d'ArcGis « DSAS » (Thieler *et al.*, 2009) 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. Les taux d'évolution annuels (T_x) à et 100 ans ($100T_x$) sont calculés pour chaque transect, selon plusieurs méthodes statistiques possibles.



Figure 36 : Implantation des profils au sud de la baie de St Paul (sur orthophoto IGN)

Pour la commune de St Paul, les transects sont implantés tous les 100m, soit 226 profils (Figure 36), 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.

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 (Himmelstoss, 2009).

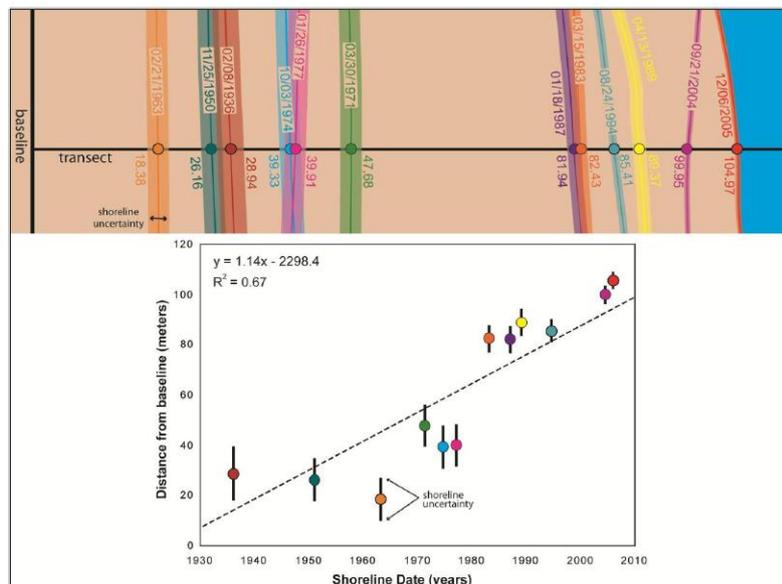


Figure 37 : Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)

Les valeurs obtenues sont ensuite filtrées sous Excel afin de ne retenir que celles exprimant un recul (148 cas sur 226 profils où $T_x < 0$) et ramenées à 100 ans ($100 T_x$).

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 » - Figure 38), il convient de regrouper et moyenner les valeurs au sein de secteurs au comportement morphodynamique homogène.



Figure 38 : Exemple d'artefact (en pointillé noir trait de côte 100Tx en « dent de scie », en couleurs les différents traits de côte historiques) généré par les profils au sud de la Rivière des Galets

Au sein de grandes cellules hydrosédimentaires, 23 secteurs sont ainsi définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral. Les reculs moyens par secteurs (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 : < -0,2 m/an.

Suite à l'enquête publique, des modifications du zonage ont été apportés (cf Annexe 7 du dossier PPRL), les résultats sont présentés dans le Tableau 8 :

Secteurs homogènes	Projet PPRL initial : présenté en enquête publique					Projet PPRL final : version approbation		
	Tx moyen par secteurs	100TX moyen par secteurs	100Tx arrondi /plaffonné	Lmax	Lr	100Tx	Lmax	Lr
Rivière des galets	-0.82	-82	-50	-10	-60	-80	-10	-90
Cambaie-Nord	-0.28	-28	-30	-10	-40	-15	-10	-25
Cambaie-Sud						-40	-10	-50
Etang Saint-Paul	-0.92	-92	-50	-10	-60	-	-	-
Forêt Saint-Paul	-0.56	-56	-50	-10	-60	-55	-10	-65
Centre-ville Est	-0.15	-15	-15	-10	-25	-15	-10	-25
Centre-ville Ouest	-0.29	-29	-30	-10	-40	-30	-10	-40
La Houssaye Est	-0.17	-17	-15	-5	-20	-15	-5	-20
La Houssaye Ouest	-0.12	-12	-10	-5	-15	-10	-5	-15
Eaux blanches	-0.23	-23	-25	-5	-30	-25	-5	-30
Maharadja	0.00	0	0	-5	-5	0	-5	-5
Boucan Canot	-0.13	-13	-15	-5	-20	-15	-5	-20
Homard-Aigrettes	-0.30	-30	-30	-5	-35	-30	-5	-35
Grand Fond	-0.10	-10	-10	-5	-15	-10	-5	-15
Roches Noires	0.25	25	-25	-5	-30	-25	-5	-30
PRA Villa Bourbon	-0.16	-16	-15	-5	-20	-15	-5	-20
Parc Aquatique	0.00	0	0	-5	-5	0	-5	-5
PRA hôtels	-0.18	-18	-20	-5	-25	-20	-5	-25
PRA Les Filaos	-0.56	-56	-50	-5	-55	-55	-5	-60
PR Hermitage sud	-0.16	-16	-15	-5	-20	-15	-5	-20
PRA La Saline	-0.22	-22	-25	-5	-30	-25	-5	-30
CRB Bellevue	-0.08	-8	-10	-5	-15	-10	-5	-15
PRA Bellevue	-0.08	-8	-10	-5	-15	-10	-5	-15
EMB Bellevue	0.00	0	0	-10	-10	0	-10	-10

* Modification en lien avec les remarques de l'ONF (à la suite)
** Modifications en lien avec les ajustements pour les embouchure d'étang et ravine
*** Modifications en lien avec le seuillage de l'alién

Tableau 8 : Caractéristiques du recul du trait de côte par cellule hydrosédimentaires avec en rouge les secteurs modifiés (la rivière des galets en fait également partie)

Il convient en outre de prendre en compte le recul lié à un évènement tempétueux majeur (Lmax). Sur la base des tempêtes et cyclones connus (cyclone Gamède et houles australes de mai 2007 - Figure 39), le Lmax est estimé à -10 m pour les secteurs de cordon sédimentaire exposé au large et à -5m pour les plages protégées par un récif corallien et les falaises (pas de falaise à recul rapide sur la commune de St Paul).



Figure 39 : Exemple de recul lié à un évènement tempétueux majeur en centre-ville de St Paul (cyclone Gamède) (De La Torre, 2004)

5.3. ZONAGE DE L'ALEA REcul DU TRAIT DE COTE

5.3.1. Zonage du recul à échéance 100 ans

La limite du recul à échéance 100 ans 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. Le projet initial prévoyait de plafonner/seuiller à 50 mètres le recul maximum afin de s'affranchir des valeurs exagérées liées à un effet de profil (artefact local faisant remonter la moyenne sur l'ensemble d'un secteur). Après analyse de la position des traits de côte historiques et l'ensemble des valeurs de taux de recul annuel par secteur, il apparaît que pour la commune de Saint-Paul, aucun effet de profil ne soit constaté. Aucun seuillage n'a donc été appliqué.

La largeur de la zone d'aléa résultante ($L_r = 100Tx + L_{max}$) est affectée en arrière du trait de côte le plus récent (2008). Les valeurs par secteurs sont présentées dans le Tableau 8.

La cartographie SIG de ces valeurs est réalisée par l'utilisation de l'outil « buffer » revenant à créer une zone tampon (selon la valeur L_r) sur le secteur considéré à partir du trait de côte de 2008.

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 5m, la zone de transition s'étale sur 50m ; pour 10m/100m ; etc.).

Les aménagements présents sur le littoral de la commune de St Paul se caractérisent par des ouvrages légers de particuliers (murs, palissades) et plus localement par des ouvrages de génie civil (murs de soutènement du « Quai Gilbert » du marché de St Paul et du front de mer des Roches Noires) ou de génie côtier (jetées du port de St Gilles les bains). Ces aménagements ne

constituent des ouvrages de défense au sens du guide, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas été spécifiquement conçus pour lutter contre l'érosion. Pour les plus gros ouvrages, bien qu'ils aient contenu jusqu'ici 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, ces ouvrages n'ont pas été pris en compte pour atténuer le zonage.

5.3.2. Limite du recul à échéance 100 ans avec prise en compte du changement climatique

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

- une simple « 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) ;
- pour les côtes basses meubles ne subissant pas de recul (en accrétion à long terme), en triplant le recul Lmax selon cette même règle de trois ;
- pour les zones non soumises à l'érosion (étangs), en déplaçant le trait de côte à +60cm d'altitude.

Le principe de la règle de trois a donc été appliqué sur l'ensemble de la commune (cartographie avec l'outil *buffer*) à l'exception des zones où la morphologie du littoral change avec notamment le passage d'un cordon sédimentaire à une falaise ou d'une falaise côtière à un massif montagneux, comme c'est le cas au Cap La Houssaye. Dans ce cas, la projection 100Tx*3 revient à faire passer la limite de recul dans le massif montagneux. Etant donné qu'il ne s'agit pas du même type de recul, la limite est ramenée au pied du massif.

5.3.3. Résultats cartographiques

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

- une carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte au 1/10 000 (Annexe 1 – 2 planches hors-texte) contenant les différents traits de côtes historiques, la position des transects, les limites des cellules hydrosédimentaires et des secteurs à comportement homogène ainsi que les classes de vitesses de recul associées (Figure 40).

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.

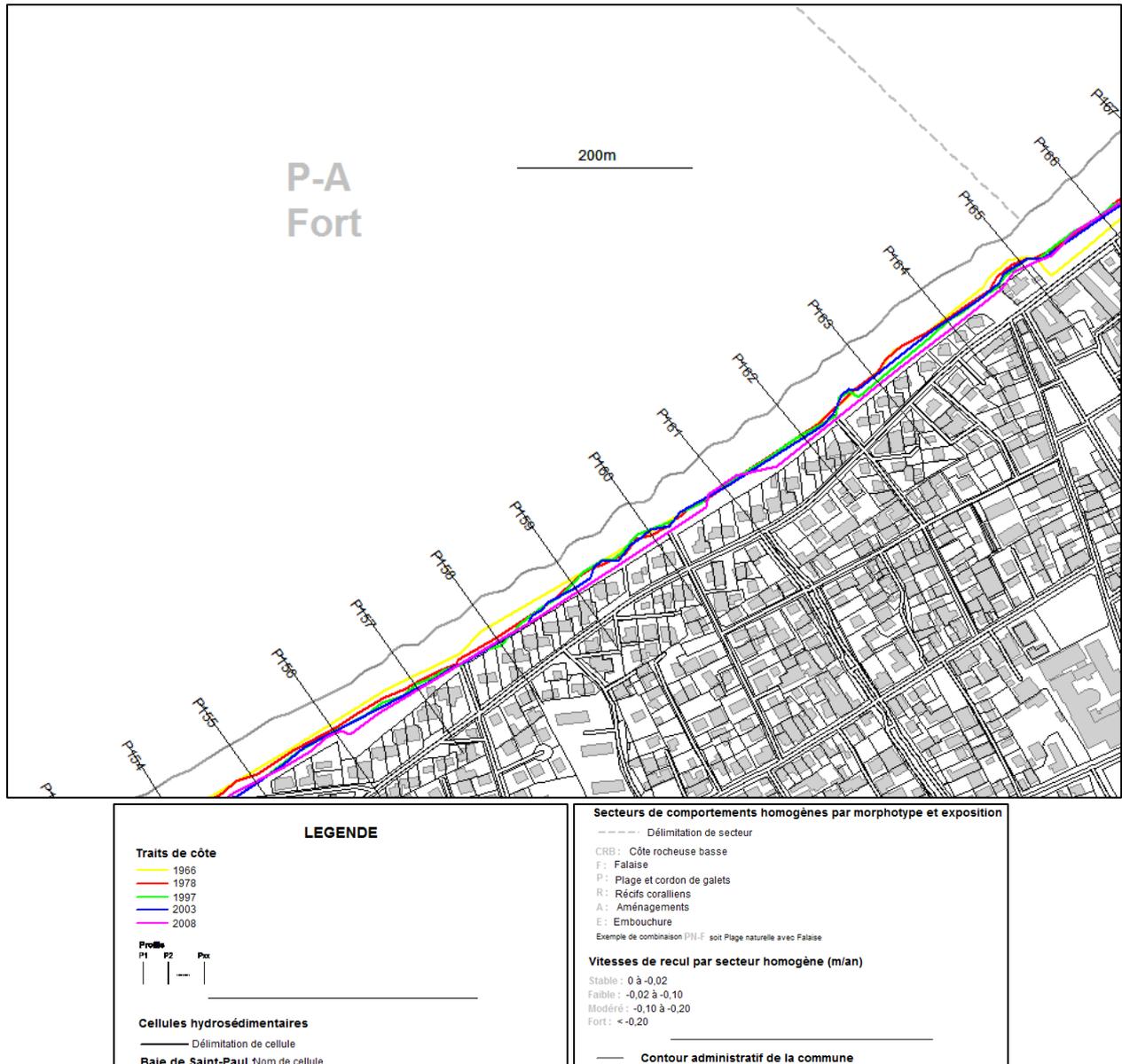


Figure 40 : Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte

- une carte de l'aléa recul du trait de côte au 1/5000 (Annexe 2 – 5 planches hors-textes) contenant le trait de côte de référence (2008), le zonage de l'aléa à échéance 100 ans (qualification en aléa fort uniquement), la limite de l'aléa avec prise en compte du changement climatique (figure suivante).

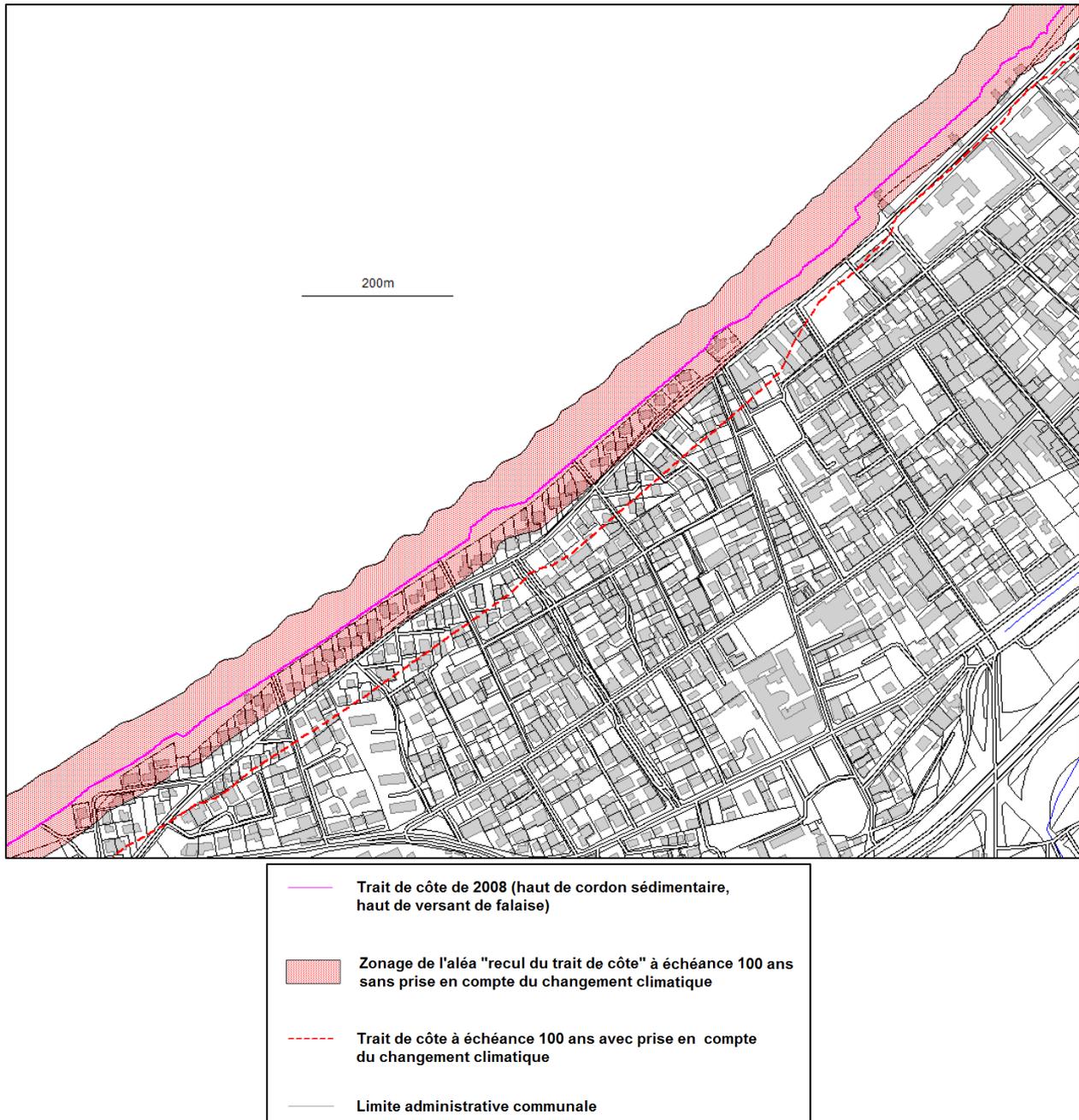


Figure 41 : Exemple de représentation du zonage « aléa recul du trait de côte » avec en trait rose la position du trait de côte en 2008 (haut de plage), en trait gris la limite administrative de la commune côté mer, en pointillé rouge le recul du trait de côte à

6. Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine

Il est rappelé que la caractérisation et la cartographie de l'aléa du présent projet sont inspirés des travaux réalisés en 2012 et sont présentés dans le rapport ALEACOT Saint-Paul (De La Torre Y., 2012).

6.1. CADRE METHODOLOGIQUE 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. 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, ruine) ;
- 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 ainsi que les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le tableau suivant et précisés dans le chapitre 6.2 et 6.3 :

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 9 : Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude)

6.2. CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSION MARINE

6.2.1. Méthodologie et scénarios

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.

Submersion par débordement

Pour la submersion par débordement, la méthode consiste à croiser sous SIG le niveau marin de référence avec la topographie côtière. Dans cette étude, cette méthode se limite à l'intérieur de l'Etang St Paul ainsi qu'à l'intérieur du Port de Saint-Gilles-Les-Bains et relève des traitements cartographiques développés dans le chapitre suivant (6.3).

En effet, la surélévation du niveau de la mer peut générer un phénomène de submersion marine dans les zones basses abritées de la houle comme dans les ports ou les étangs. Cette cartographie est basée sur une projection du niveau d'eau de l'évènement submersion marine par débordement sur la topographie à l'intérieur du port (MNT, Litto3D, SHOM-IGN, 2011).

Ce niveau est basé l'étude BRGM⁷ et est adapté au guide ministériel d'élaboration du PPRL (DGPR, 2014)⁸. Ce niveau est la conjonction d'un niveau d'eau fréquent et d'une surcote atmosphérique centennale liée au passage d'un cyclone. Il correspond à la somme des paramètres suivants (Figure 42) :

- un niveau de marée de 0,50 m NGR qui intègre 0,25 m NGR correspondant à la moyenne des plus hautes pleines mers journalières (PM sup) (SHOM, 2016)⁹ et une marge de sécurité de 0,25 m pour une prise en compte de l'incertitude sur la marée (DGPR, 2014)².
- la surcote atmosphérique centennale liée au passage d'un cyclone (+0,85 m selon Sogreah, 1998¹⁰).
- Une surélévation du niveau marin en lien avec le changement climatique (DGPR, 2016) selon deux scénarios :
 - o Un **aléa de référence actuel** : Une surélévation du niveau marin en lien avec le changement climatique à moyen terme de 0,2 m conformément au recommandation du guide méthodologique ministériel ;
 - o Un **aléa 2100** : Une surélévation du niveau marin en lien avec le changement climatique à échéance 2100 de 0,6 m conformément au recommandation du guide méthodologique ministériel.

⁷ 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 1 et Phase 2. BRGM/RP-56589-FR et BRGM/RP-56365

⁸ 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.

⁹ SHOM (2016), Ouvrage de marée – Références Altimétriques maritimes Ref : X16-HYC

¹⁰ SOGREAH (1998), RN1 – Route du littoral – Etude préalable des risques océanographiques Etape 1 : Analyse de l'existant Rapport 11988/ADI/51 4525 R1

L'ensemble de ces éléments amène à caractériser un niveau marin de **+1,55 m NGR pour l'aléa de référence actuel** et un niveau marin de **+1,95 m NGR pour l'aléa à échéance 2100**.

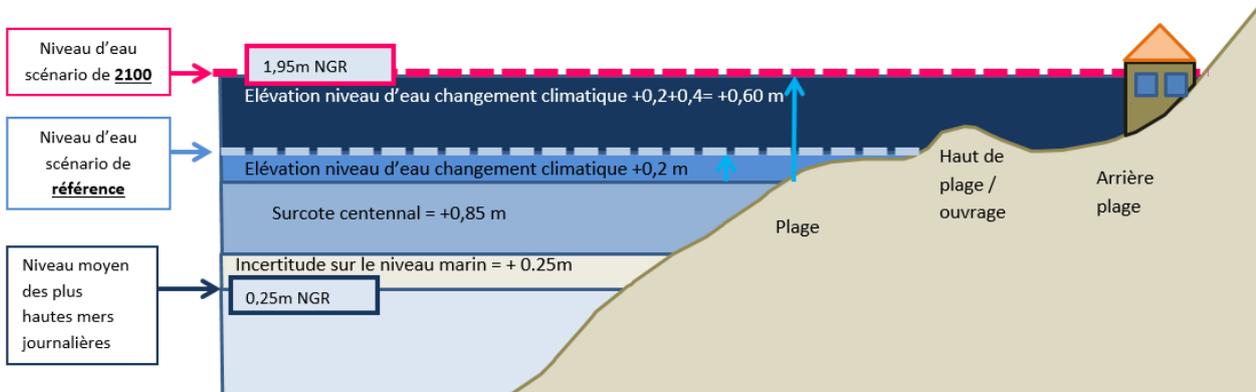


Figure 42 : Présentation schématique des niveaux d'eau de l'évènement submersion marine par débordement selon les 2 scénarios PPRL

Le zonage des degrés d'aléa submersion marine par débordement sont liés aux deux scénarios de submersion confrontés à la topographie locale (MNT Litto3D IGN, 2011). Cet évènement est considéré comme sans agitations par simplification. Il n'y a donc pas de croisement entre les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement. Seul les niveaux d'eau sur la topographie déterminent les degrés d'aléa. Les différents degrés d'aléa sont cartographiés en fonction des hauteurs d'eaux dans le port et selon deux scénarios comme suit (Figure 43) :

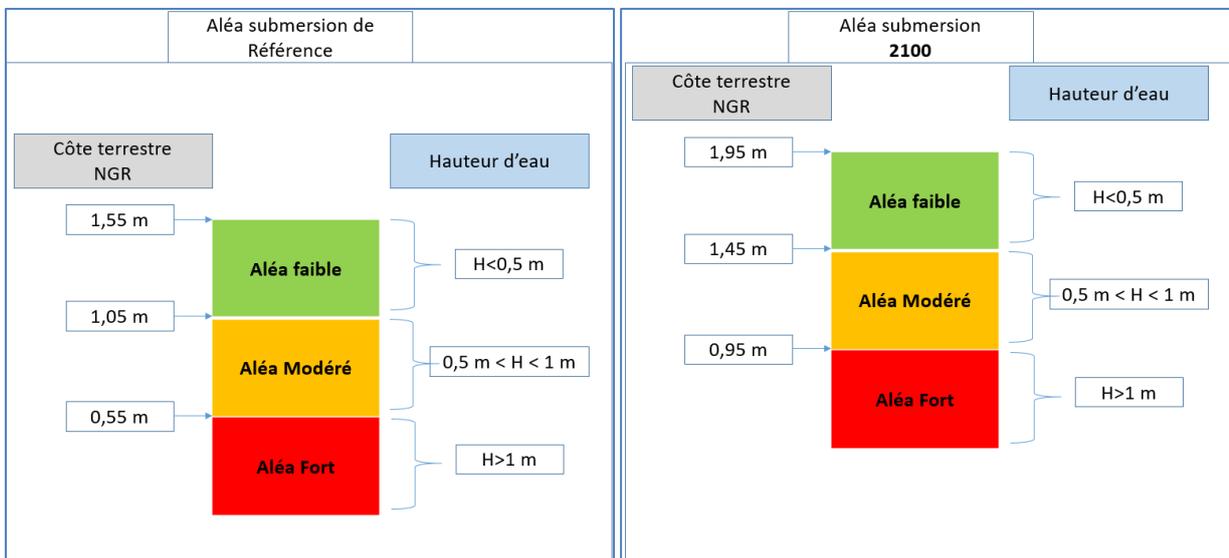


Figure 43 : Schémas de la qualification des degrés d'aléa débordement

Un lissage géométrique est appliqué pour adapter le rendu cartographique à l'échelle 1/5000.

Submersion par franchissements

Pour la submersion par franchissement, plusieurs méthodes d'estimation sont possibles. Les formules empiriques de calcul du run-up¹¹ telle 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 la commune de Saint-Paul. Les simulations de propagation de la houle sont réalisées à partir du couplage du modèle spectral mis en place pour l'étude HOULREU (Pedreros *et al.*, 2009) avec un modèle dit « vague à vague ». Pour des raisons de mise en œuvre des calculs, elles sont réalisées en 2D (en plan) uniquement dans la baie de St Paul et en 1D (profils) sur le reste de la commune.

Les simulations réalisées dans le cadre de cette étude suivent les préconisations du guide méthodologie), notamment en ce qui concerne la prise en compte de 2 scénarios (un scénario à court-terme, prenant en compte une élévation du niveau marin de 20 cm, et un scénario à long-terme, ou à l'horizon 2100, prenant en compte une élévation du niveau marin de 60 cm).

Pour rappel, les calculs de probabilités conjointes (houle/niveau marin extrême, périodes de retour) nécessitent un nombre important d'événements observés. Or, à 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 et imprécis les calculs d'extrêmes par cette approche.

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 des régimes de houles extrêmes (Lecacheux *et al.*, 2012), la houle cyclonique **de Dina (2002) faisant référence au Nord de la Pointe des Aigrettes et les houles australes de mai 2007 au Sud de cette même pointe** (Figure 44).

¹¹ Run-up : altitude maximale atteinte par le jet de rive sous l'action des vagues.

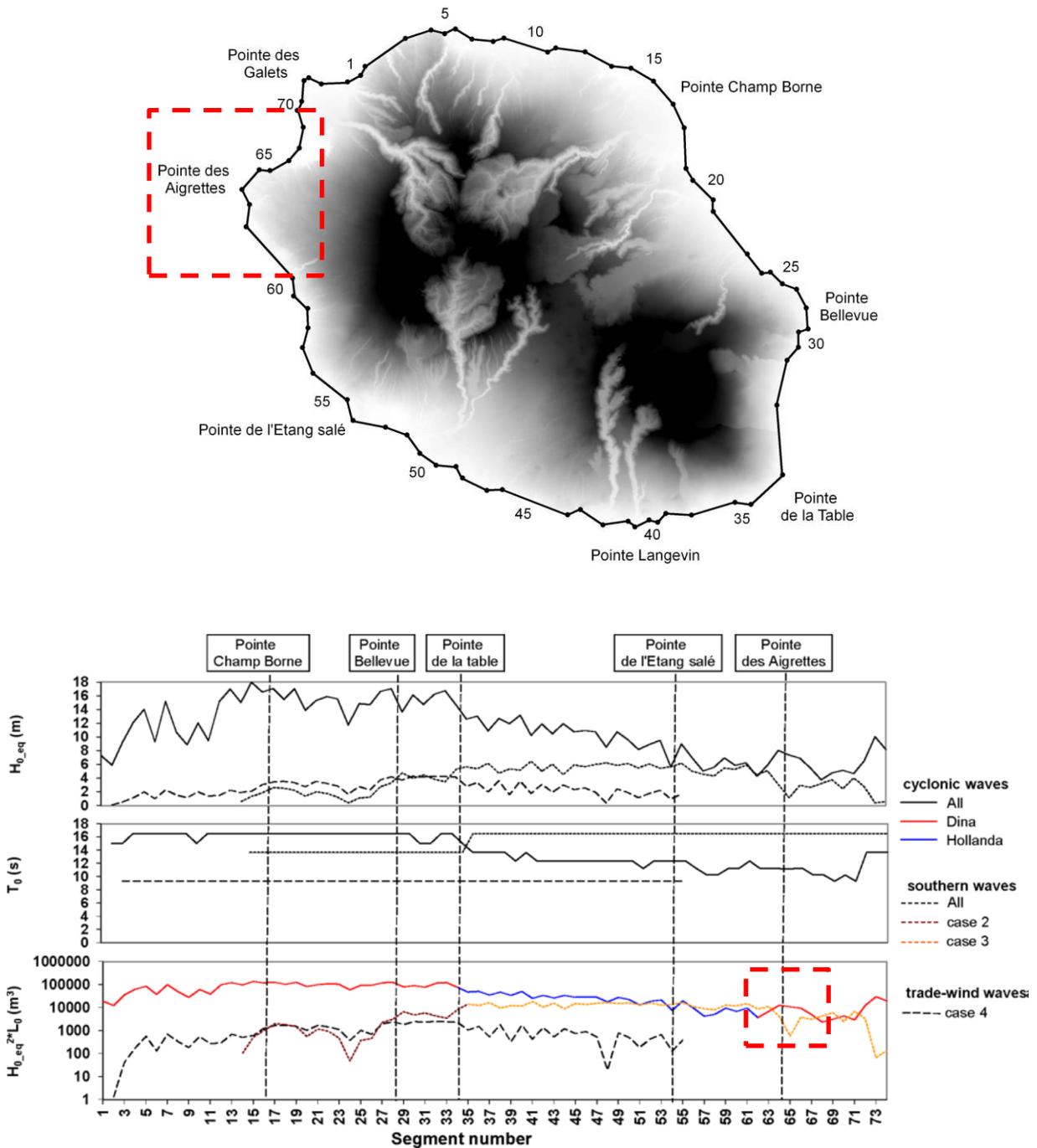


Figure 44 : Comparaison des régimes de houles en termes de hauteur de vague (graphiques du haut), période au large (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) sur la commune de St Paul (segments 61 à 69 encadrés en pointillés rouge) – (Lecacheux et al., 2012)

Il n'y a pas pour Saint Paul d'ouvrages de protection au sens du guide, c'est-à-dire dont la vocation est de lutter contre les submersions marines (ex : digues). Les aménagements présents ne font donc pas l'objet d'une analyse de défaillance spécifique mais sont intégrés dans les simulations comme obstacles à l'écoulement.

Les simulations sont réalisées à morphologie constante. Les « défaillances » des structures naturelles telles que les cordons sédimentaires et les falaises et leur évolution à échéance 100

ans font l'objet d'une adaptation cartographique des sorties du modèle à partir des observations historiques (cf. chapitre 3.3).

6.2.2. Localisation des simulations

Compte-tenu des enjeux sur la commune de Saint-Paul et de la lourdeur des calculs en modélisation 2D, il a été choisi d'effectuer ce type de simulation sur le centre-ville de Saint-Paul, le reste de la commune étant couvert par des simulations en 1D plus aisées à mettre en œuvre. Pour cela, le sud de la commune de Saint-Paul a été divisé en 5 zones supposées homogènes vis-à-vis de leur exposition à la submersion marine, sur lesquelles ont été répartis 13 profils utilisés pour les simulations numériques (Figure 45).

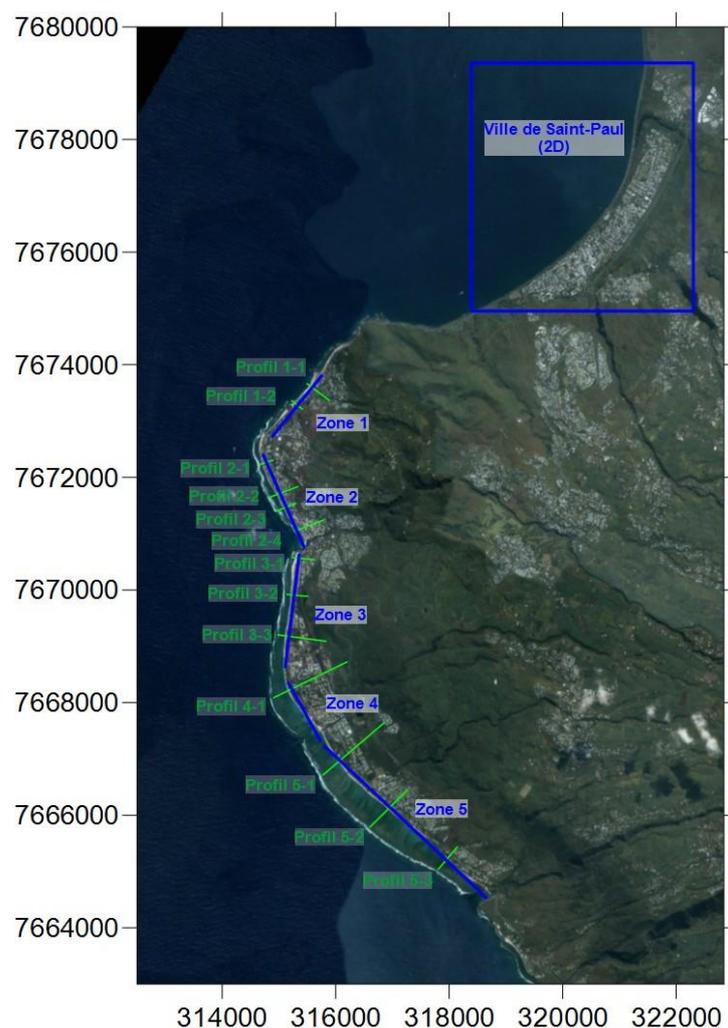


Figure 45 : Localisation des simulations dans la zone d'étude de Saint-Paul : zones homogènes en bleu, profils pour simulations 1D en vert

Au final, les simulations réalisées sont les suivantes :

- **Houles australes de mai 2007** au sud de la Pointe des Aigrettes : Simulations **en 1D** sur les zones homogènes 2 à 5 (soit pour les **profils 2-1 à 5-3**, tels qu'identifiés à la Figure 45) :
 - o Scénario à court-terme, incluant une élévation du niveau marin de 20 cm ;

- Scénario à long-terme, ou à horizon 2100, incluant une élévation du niveau marin de 60 cm.
- **Cyclone Dina** au nord de la Pointe des Aigrettes : Simulations **en 1D** sur la zone homogène 1 (**profils 1-1 et 1-2**, tels qu'identifiés à la Figure 45), et simulations **en 2D** sur la **ville de Saint-Paul** :
 - Scénario à court-terme, incluant une élévation du niveau marin de 20 cm ;
 - Scénario à long-terme, ou à horizon 2100, incluant une élévation du niveau marin de 60 cm.

6.2.3. Données disponibles

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 leviers ont été livrés par le SHOM et l'IGN à la DEAL Réunion.

Les données topographiques utilisées sont elles aussi directement issues du programme Litto3D (leviers Lidar à haute résolution).

Pour les simulations 1D, les bâtiments n'ont pas été pris en compte, et seul le MNT Litto3D a été utilisé.

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 (IGN et SHOM) mises à notre disposition. Les principales étapes nécessaires à cette construction sont schématisées à la Figure 46 :

- Dans le MNE « brut » 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.

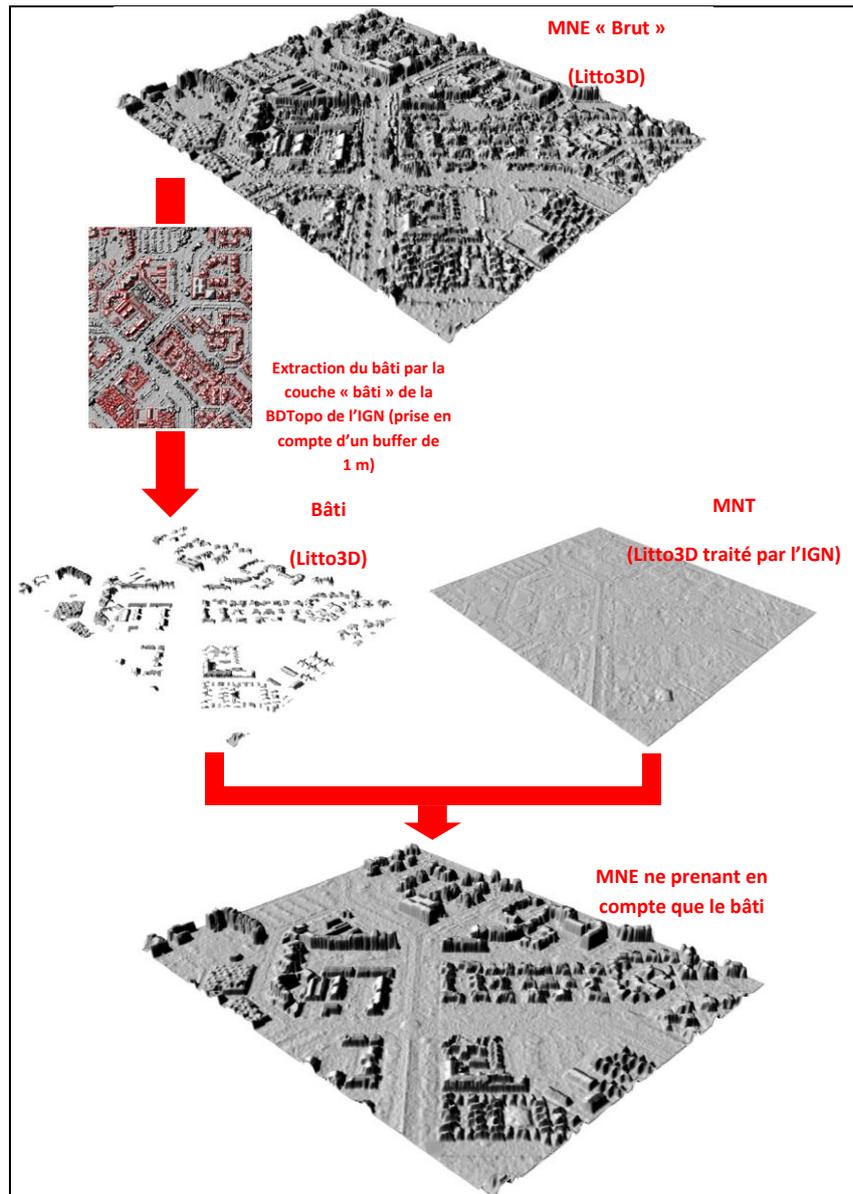


Figure 46 : Principales étapes nécessaires à la construction du MNE

Références altimétriques

Les références altimétriques utilisées pour cette étude sont issues du document de référence publié par le SHOM (SHOM, 2016). 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. Compte-tenu de la localisation de ces sites, deux peuvent être jugés représentatif pour la commune de Saint-Paul : la Pointe des Galets et Saint-Leu.

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)
Pointe des Galets	1,01	0,80	0,60	0,35	0,08	-0,554
Saint-Leu	0,85	0,65	0,51	0,30	0,17	-0,530

Tableau 10: Références altimétriques maritimes pour les sites de la Pointe des Galets et de Saint-Leu : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et zéro IGN8

Les prédictions de marée n'étant disponibles à la Réunion que pour les sites de la Pointe des Galets et de Saint-Pierre (logiciel SHOMAR), c'est finalement le site de la Pointe des Galets qui a été retenu comme référence pour l'étude.

Pour mémoire, on retiendra que le niveau de plus haute mer astronomique (marée) se situe dans le secteur d'étude aux alentours de +0,45 m IGN89 ⁽¹²⁾.

Niveaux d'eau considérés

Du fait que la méthodologie s'appuie sur la reconstitution de cas historiques, les niveaux d'eau ont été choisis au plus près de ce qu'ils étaient lors de l'événement :

- Le niveau de marée prédite est calculé à l'aide du logiciel SHOMAR du SHOM à la Pointe des Galets, à l'heure du pic estimé de la houle ; ce niveau de marée est ensuite ramené au zéro IGN89 par l'intermédiaire des références altimétriques présentées au Tableau 10.
- La surcote atmosphérique est prise en compte à partir des données disponibles pour l'événement considéré.

Les niveaux d'eau ainsi calculés sont ensuite considérés conformément à la méthodologie recommandée par le ministère (Figure 47), à savoir :

- Prise en compte d'un scénario à court-terme, intégrant une marge d'élévation du niveau de la mer de 20 cm intégrée au niveau marin de référence ;
- Prise en compte d'un scénario à long-terme (2100) intégrant une élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique de 60 cm (dont les 20 cm intégrés au scénario court-terme) intégrée au niveau marin de référence à échéance 2100.

¹² Ce niveau est exactement à +0,456 m IGN89 à la Pointe des Galets et à +0,32 m IGN89 à St Leu

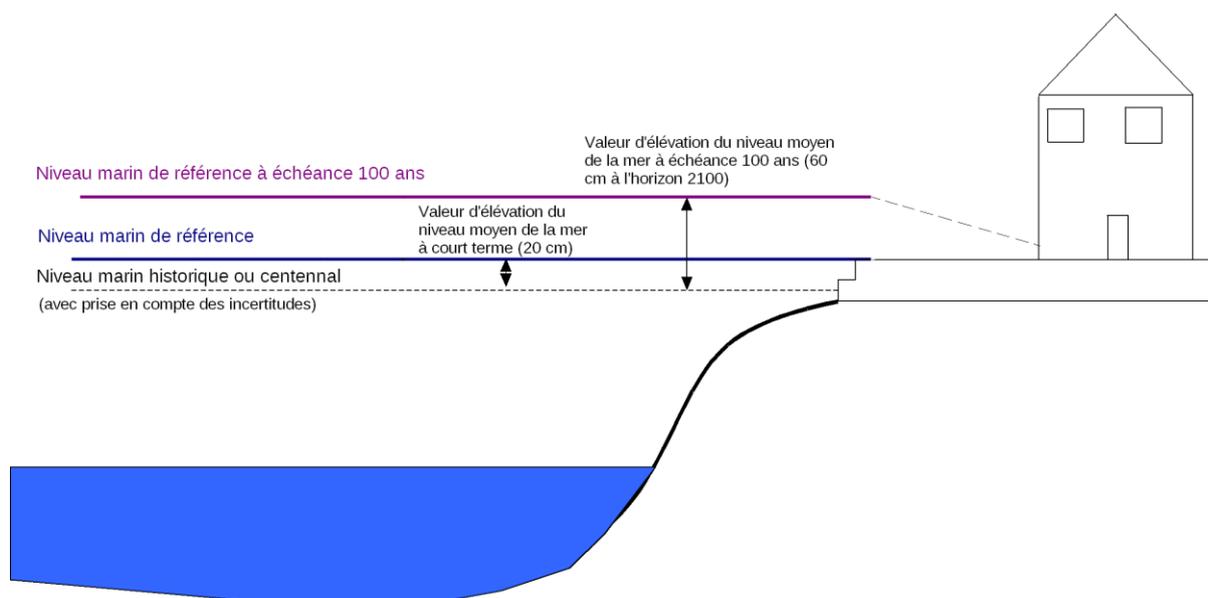


Figure 47 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (MEDDTL, 2012)

Pour les deux événements considérés dans cette étude (cyclone Dina pour la ville de Saint-Paul et les profils de la zone 1, et houles australes du 13 mai 2007 pour les zones 2 à 5), les niveaux d'eau considérés sont finalement les suivants :

Événement (secteurs)	Marée prédite (SHOMAR, /ZH)	Surcote atmosphérique (Météo France, 2007)	Niveau marin de référence à court-terme (/0 IGN89)	Niveau marin de référence à long-terme (/0 IGN89)
Cyclone Dina (Ville de Saint-Paul et zone 1)	+0,5 m (22/01/2002 à 22h00 TU)	+0,32 m	+0,47 m	+0,87 m
Houles australes de mai 2007 (zones 2 à 5)	+0,35 m (13/05/2007 à 00h00 TU)	Inconnue	+0 m	+0,4 m

Tableau 11 : Niveaux marins retenus pour les simulations de submersion

On notera que pour les houles australes de 2007, la surcote atmosphérique reste inconnue (marégraphes non consultables à cette date). Les houles australes étant générées par des tempêtes lointaines (et n'induisant donc a priori pas de dépression au niveau de La Réunion), il a été choisi de supposer cette surcote nulle pour cet événement.

6.2.4. Simulation 1D des houles australes de mai 2007 (profils 2-1 à 5-3)

Les houles australes de mai 2007 constituant l'événement de référence uniquement au sud de la Pointe des Aigrettes, seules les simulations en 1D sur les profils 2-1 à 5-3 ont été menées avec cet événement.

Méthode mise en œuvre

La méthodologie mise en œuvre s'appuie sur les résultats de l'étude HOULREU du BRGM (Pedreros *et al.*, 2009). Cette étude avait notamment permis de calculer, pour tout le littoral réunionnais, les caractéristiques des vagues pour des houles (cycloniques et non cycloniques) historiques et centennales. Pour ce qui concerne les houles australes du 13 mai 2007, les conditions avaient été légèrement amplifiées pour rapporter l'événement à une probabilité d'occurrence centennale. Toutefois, des calculs avaient été menés dans les conditions historiques à des fins de validation. Ce sont donc ces résultats qui sont utilisés ici pour les calculs de submersion.

La démarche pour les simulations en 1D de la submersion au sud de la commune de Saint-Paul peut être fragmentée en 3 principales étapes, toutes étant menées en régime stationnaire :

- amélioration de la résolution des calculs de HOULREU sur le secteur par ajout d'un emboîtement supplémentaire à résolution 20 m pour le modèle de vagues Swan (Booij *et al.*, 2004) ;
- génération d'une série temporelle pour un couplage avec le code vague-à-vague SurfWB (Marche *et al.*, 2007) ; en pratique, il est nécessaire d'identifier les zones de déferlement des vagues pour générer les séries temporelles après le déferlement (ce phénomène n'étant pas simulé par SurfWB) ;
- Simulation de la submersion en 1D avec le code SurfWB sur une durée de 30 minutes, ce qui correspond à une centaine de vagues (Figure 48). En pratique, cette durée de 30 minutes permet d'obtenir un nombre de vagues représentatif des phénomènes, mais il peut être nécessaire en cas de franchissement d'adapter cette durée pour améliorer le réalisme des simulations.

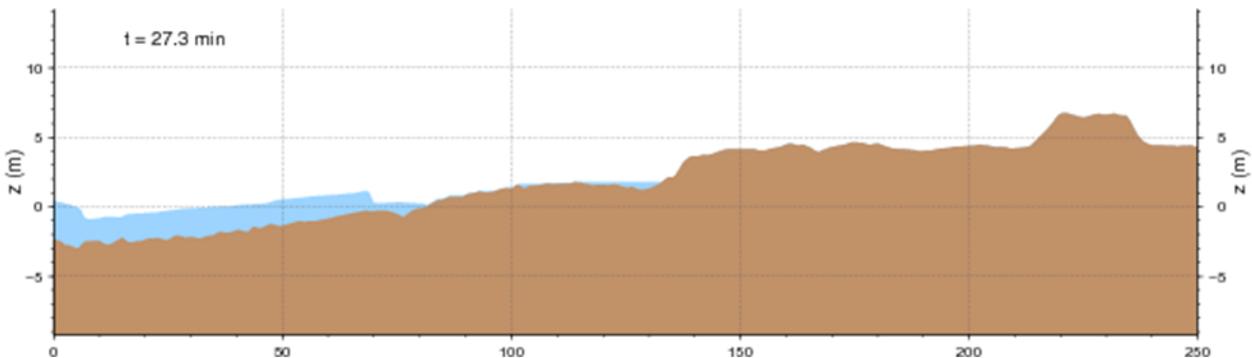


Figure 48 : Aperçu de la propagation des vagues le long du profil 1-1

Simulations Swan : propagation des conditions de vagues (résolution : 20m)

Les calculs ont été menés à l'aide du code SWAN, en conditions stationnaires lors du maximum de houle (13/05/2007 à 00h00 TU).

Les simulations des houles australes historiques du 13 mai 2007 menées lors de l'étude HOULREU à une résolution de 90 m sur la côte ouest de l'île (grille de calcul noté R20 dans Pedreros *et al.*, 2009) ont été refaites pour permettre un emboîtement vers une grille plus fine. Les résultats de ces calculs sont consultables dans le rapport HOULREU. Les 2 niveaux d'eau différents évoqués précédemment n'ont pas été distingués à ce stade, compte-tenu des faibles écarts induits à cette résolution (profondeurs considérées importantes au large).

La grille suivante, centrée sur la commune de Saint-Paul, présente une résolution de 20 m, et a été utilisée dans la projection RGR92 de La Réunion pour des raisons pratiques (nécessité d'une projection cartésienne pour les calculs de setup). Les résultats obtenus sont présentés aux illustrations suivantes.

Sur les cartes de hauteurs significatives de vagues (Figure 49), on remarque que l'influence du niveau d'eau reste limitée, hormis au niveau des zones récifales, où une élévation du niveau d'eau permet un meilleur passage des vagues et donc des hauteurs significativement plus élevées.

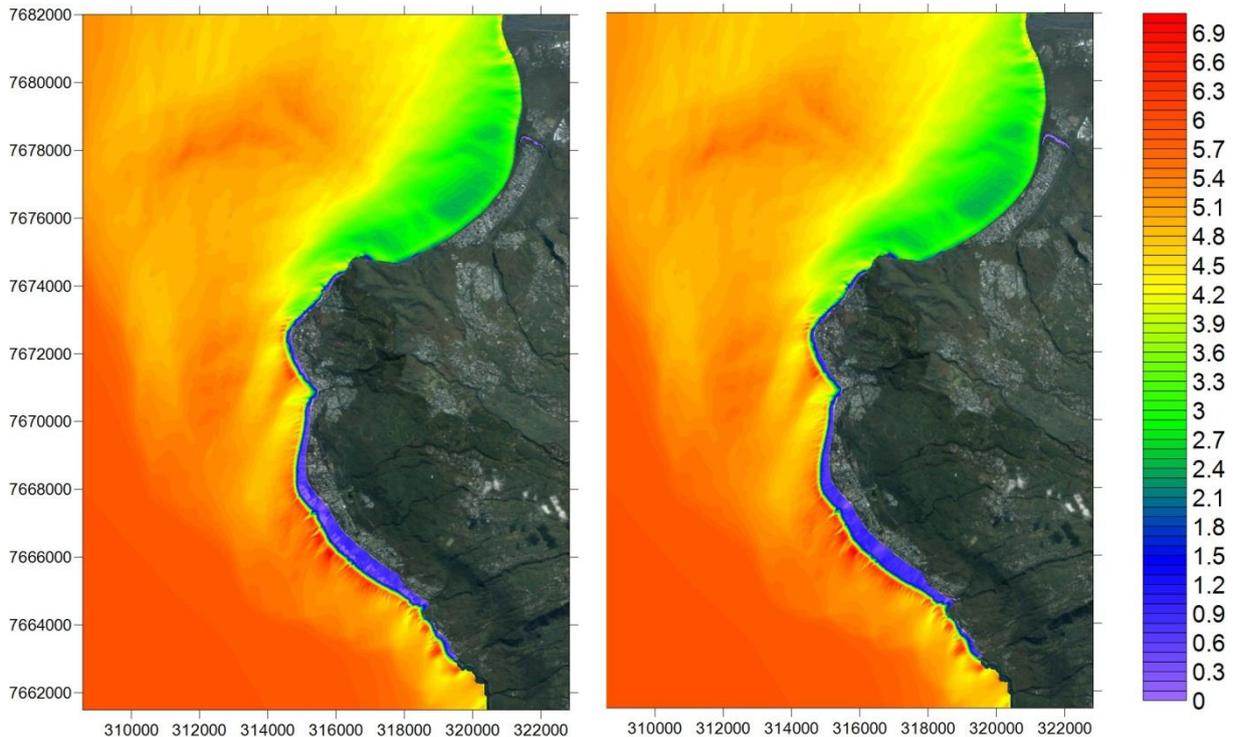


Figure 49 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs significatives des vagues (H_s) calculées avec le code SWAN à une résolution de 20 m (scénario à court-terme à gauche, scénario à long-terme (2100) à droite)

Les cartes de périodes pic des vagues ne sont pas représentées ici. Ces périodes restent assez homogènes à l'échelle de la zone, et peu influencées par les niveaux d'eau (de l'ordre de 14 à 15 secondes).

En termes de setup (surcote locale induite par le déferlement des vagues, Figure 50), l'influence du niveau d'eau est surtout sensible en arrière des récifs, où le scénario à court-terme présente des valeurs du setup supérieures de 10 à 15 cm environ à celles du scénario à long-terme. Ceci peut s'expliquer par le niveau d'eau plus faible pour le scénario à court-terme, qui favorise le déferlement des vagues et par conséquent le setup. Cet écart sur le setup est cependant compensé au final par l'augmentation du niveau d'eau.

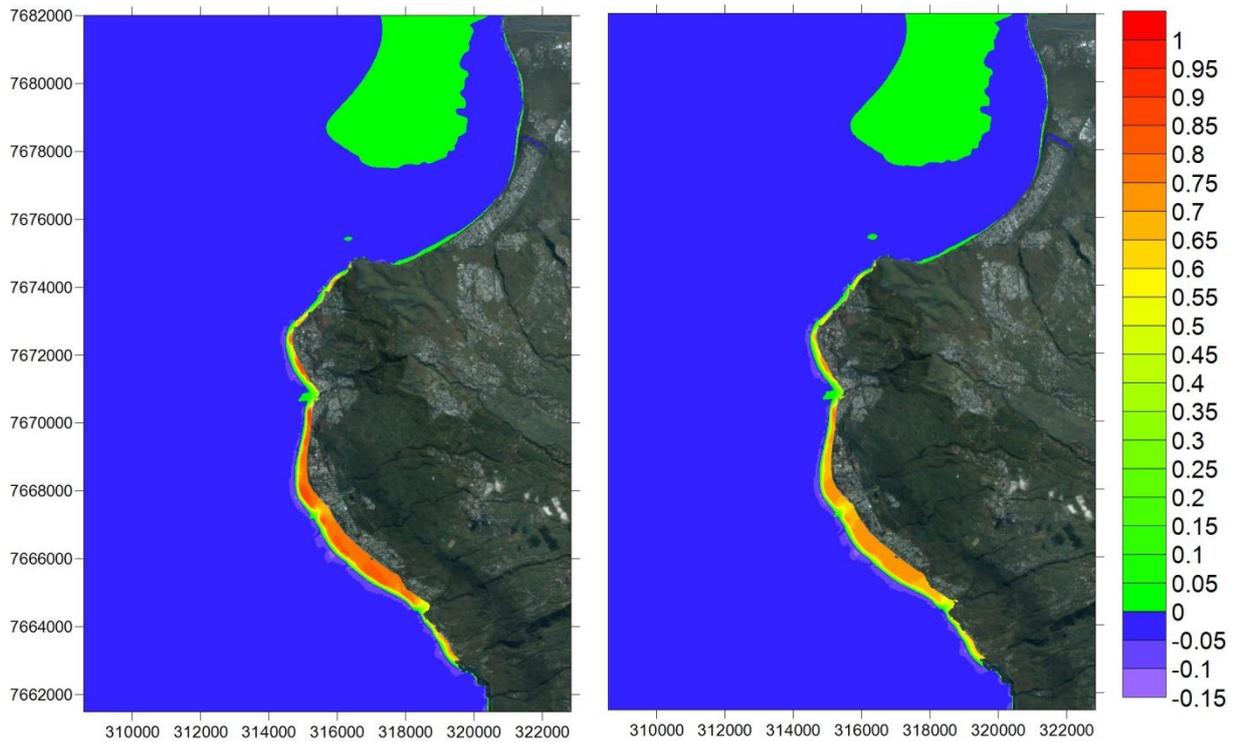


Figure 50 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Setup induit par les vagues calculés avec le code SWAN à une résolution de 20 m (scénario à court-terme à gauche, scénario à long-terme à droite)

Les zones de déferlement restent sensiblement similaires pour les 2 niveaux d'eau (Figure 51), même s'il apparait que les vagues déferlent légèrement plus franchement dans le scénario à court-terme que dans le scénario à long-terme, du fait des profondeurs plus faibles au niveau du lagon. Au final, au niveau du secteur de Saint-Gilles, les vagues déferlent toujours au niveau du récif, du fait de la faible profondeur associée.

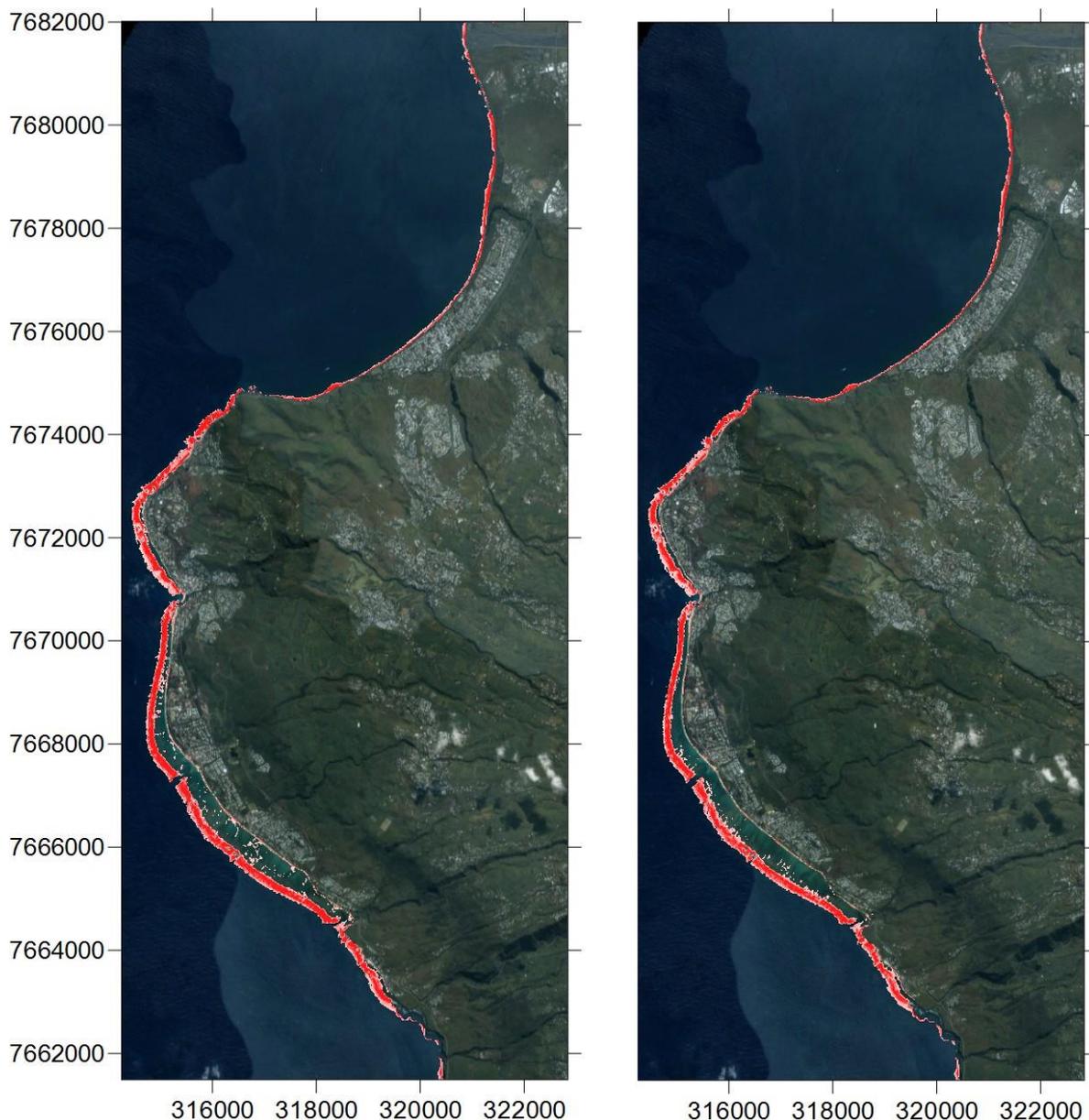


Figure 51 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Déferlement des vagues calculé avec le code SWAN à une résolution de 20 m (scénario à court-terme à gauche, scénario à long-terme (2100) à droite) : la teinte rouge indique le taux de vagues déferlées, entr

Cette similitude dans les zones de déferlement permet de choisir des points d'entrée aux profils communs aux 2 scénarios. Ces points ont été choisis suffisamment proches de la côte pour que les vagues rentrent dans le domaine de modélisation après déferlement et orthogonalement à la côte. Pour chacun de ces points d'entrée des profils, et pour chacun des 2 niveaux d'eau étudiés, les spectres et les principaux paramètres des vagues sont extraits afin de reconstituer pour chacun une série temporelle des vagues conforme au spectre, pour effectuer les simulations vague-à-vague.

En raison des très faibles hauteurs d'eau sur le récif, certains calculs se sont révélés instables et ont nécessité quelques adaptations mineures (recul du point d'entrée du profil, conditions de stabilité numérique, ordre du calcul). Au final, les calculs menés sur les profils 2-1 et 2-2 restent

incomplets : aucune simulation n'a pu être réalisée pour le profil 2-1 ; pour le profil 2-2, seule la simulation pour un scénario à long-terme (+60 cm) a pu être réalisée.

Reconstitution des séries temporelles

Les spectres de vagues ainsi obtenus montrent, quels que soient le profil et le niveau d'eau considéré suivant le scénario, que la fréquence dominante des vagues est de l'ordre de 0,067 Hz, ce qui correspond à des vagues de période de l'ordre de 15 secondes. On remarque toutefois que plus le niveau d'eau considéré est important, plus la hauteur du pic est importante, ce qui traduit une énergie plus importante des vagues (l'énergie étant représentée par la surface comprise sous la courbe du spectre). Ceci est illustré sur l'exemple du profil 3-1, en Figure 52.

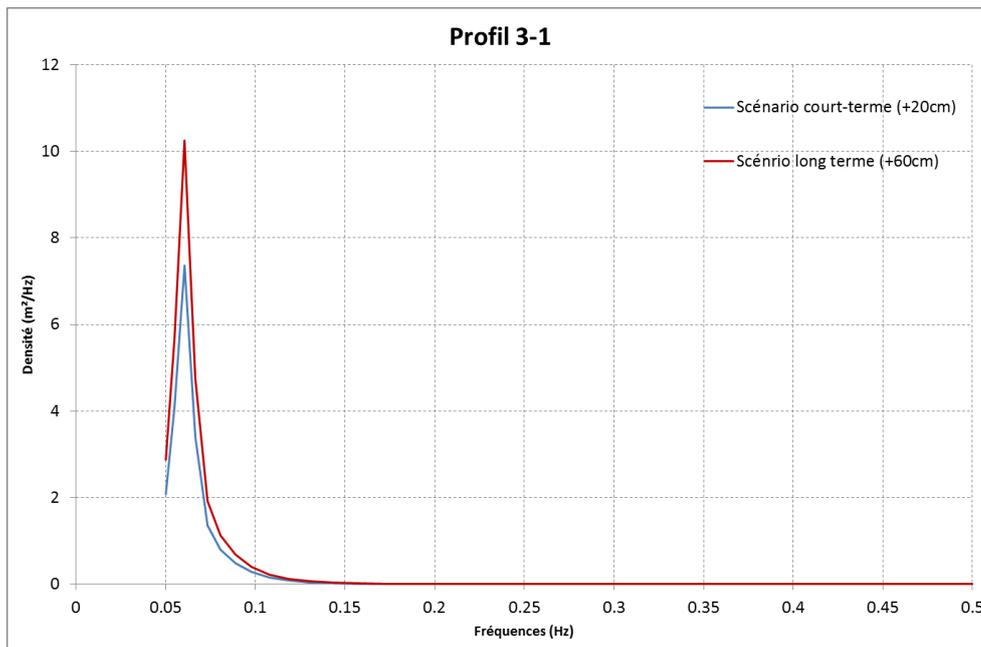


Figure 52 : Comparaison des spectres calculés par SWAN en entrée du profil 3-1 pour les 2 valeurs de niveau considérées

Ces caractéristiques des spectres issues des calculs menés sous SWAN sont ensuite utilisées pour reconstituer de manière aléatoire des séries temporelles de vagues conformes à ces caractéristiques, 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.

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 les Tableau 12 et Tableau 13, respectivement pour les scénarios à court-terme (+20 cm) et à long-terme (+60 cm).

	Prof2-1		Prof2-2		Prof2-3		Prof2-4	
	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	1.656	14.427	1.568	14.906	1.999	14.727	1.622	14.451
Série tempo					1.993	14.962	1.612	14.363
Ecart					0.006	0.236	0.010	0.088

	Prof3-1		Prof3-2		Prof3-3		Prof4-1		Prof5-1		Prof5-2		Prof5-3	
	Hs (m)	Tmoy (s)												
SWAN	1.373	14.881	0.709	14.801	0.958	14.813	0.566	15.031	0.812	15.251	0.845	14.980	0.804	14.433
Série tempo	1.362	14.844	0.714	15.071	0.941	14.801	0.561	15.753	0.816	15.365	0.830	14.822	0.796	14.423
Ecart	0.011	0.037	0.005	0.270	0.017	0.012	0.005	0.722	0.004	0.114	0.015	0.158	0.008	0.010

Tableau 12 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à court-terme

	Prof2-1		Prof2-2		Prof2-3		Prof2-4	
	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	1.899	14.412	1.919	14.901	2.307	14.732	1.864	14.426
Série tempo			1.932	15.365	2.279	14.821	1.850	14.424
Ecart			0.013	0.465	0.028	0.089	0.014	0.002

	Prof3-1		Prof3-2		Prof3-3		Prof4-1		Prof5-1		Prof5-2		Prof5-3	
	Hs (m)	Tmoy (s)												
SWAN	1.623	14.820	0.921	14.768	1.157	14.728	0.979	14.871	0.980	15.222	1.211	14.930	1.002	14.433
Série tempo	1.622	14.861	0.913	14.871	1.129	14.747	0.966	15.103	0.955	15.768	1.183	14.941	0.982	14.529
Ecart	0.001	0.041	0.008	0.104	0.028	0.019	0.013	0.232	0.025	0.546	0.028	0.011	0.020	0.096

Tableau 13 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à long terme

On remarque sur les tableaux ci-dessus que les deux scénarios envisagés (à court-terme et à long-terme) se distinguent non seulement par une différence de niveau d'eau, mais aussi par une modification des caractéristiques des vagues en un même point. Ainsi on constate que la prise en compte d'un niveau marin plus élevé conduit à augmenter les hauteurs significatives des vagues : par exemple, elles sont de 10 à 40 cm supérieures pour le scénario à long-terme par rapport au scénario à court-terme.

Submersion

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...). Il a déjà été 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) ou par des tsunamis (tsunami de l'aéroport de Nice en 1979 : Le Roy *et al.*, 2011).

Les simulations de submersion en 1D ont été menées en utilisant pour chaque profil et pour chaque niveau d'eau étudié les séries temporelles reconstituées précédemment à partir des spectres calculés par le code SWAN.

Les calculs ont été menés sur des profils topo-bathymétriques issus des données Litto3D¹³ ré-échantillonnées pour une résolution de calcul de 50 cm dans l'axe du profil (résolution des données topo-bathymétriques d'origine : 1 m).

En une dimension, le code SurfWB prend en compte une friction au fond homogène par l'intermédiaire d'un coefficient de Manning. Pour les simulations présentées ici, la valeur de ce coefficient a été fixée à $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$, correspondant à un fond naturel relativement irrégulier (quelques pierres, algues...).

La durée des simulations menées avec SurfWB a été fixée à 30 minutes afin que le nombre de vagues simulées (plus d'une centaine) soit représentatif des phénomènes. Cette durée peut être au besoin allongée en cas de franchissement afin de déterminer le volume franchissant.

Les résultats obtenus permettent de connaître à tout instant la surface libre de l'eau le long du profil observé, 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), comme illustré à la Figure 53.

¹³ Ces profils n'intègrent pas le bâti.

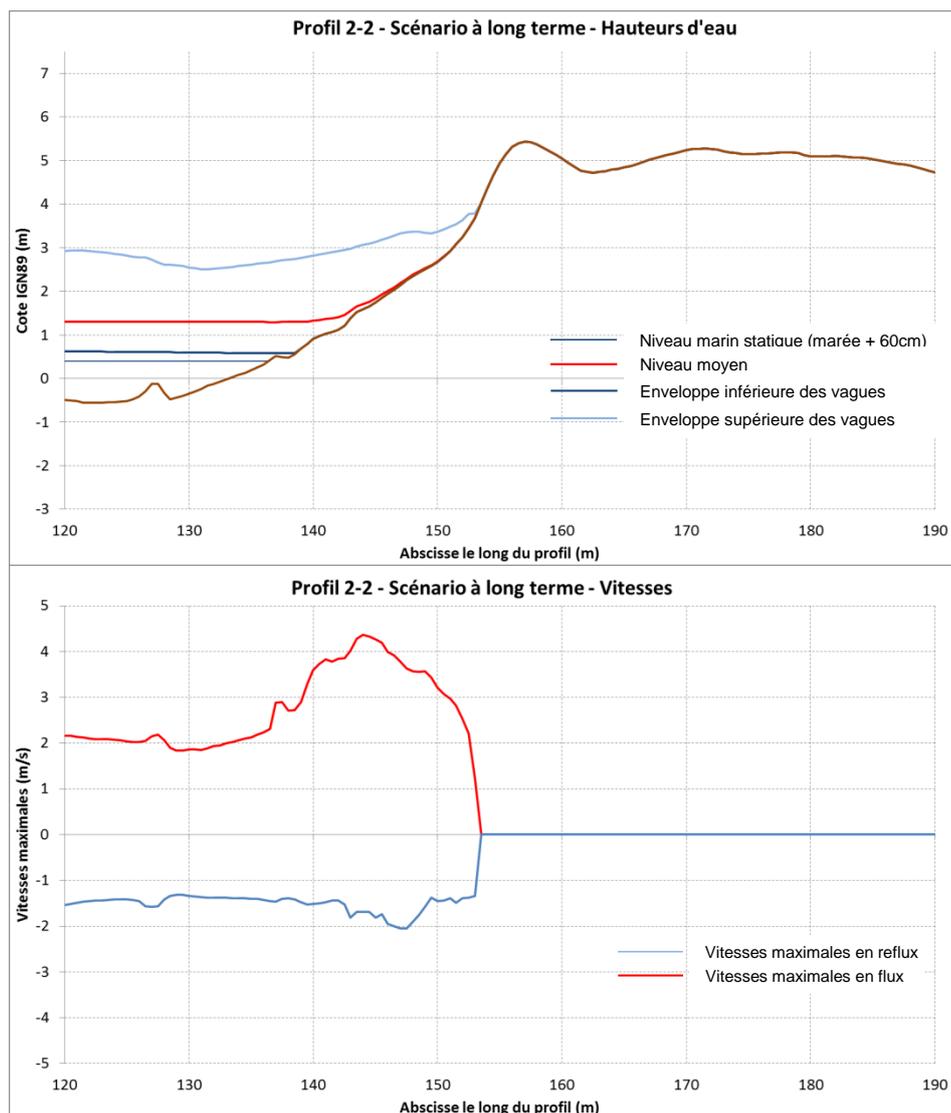


Figure 53 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Exemple de caractéristiques globales d'une simulation sur le profil 2-2 pour le scénario à long-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux

Pour mémoire, le niveau de plus haute mer astronomique (marée) se situe dans le secteur d'étude aux alentours de +0,45 m IGN89 (cf. 6.2.3). Il correspond à la limite d'action de la mer par temps calme (pas de vagues) pour les plus hautes mers astronomiques.

Sur les 3 profils de la zone 2, les figures suivantes présentent les résultats obtenus (aucune simulation n'étant disponible pour le profil 2-1) en termes de hauteurs d'eau maximales. On constate l'effet important du niveau d'eau sur les vagues à terre, puisqu'entre les scénarios à court-terme et les scénarios à long-terme, la différence entre les run-up maximaux peut largement dépasser le mètre (alors que l'écart sur le niveau statique n'est que de 40 cm).

Aucun franchissement n'a été constaté sur les profils de la zone 2, bien que l'eau puisse atteindre la cote 4,5 m à terre dans les scénarios à long-terme.

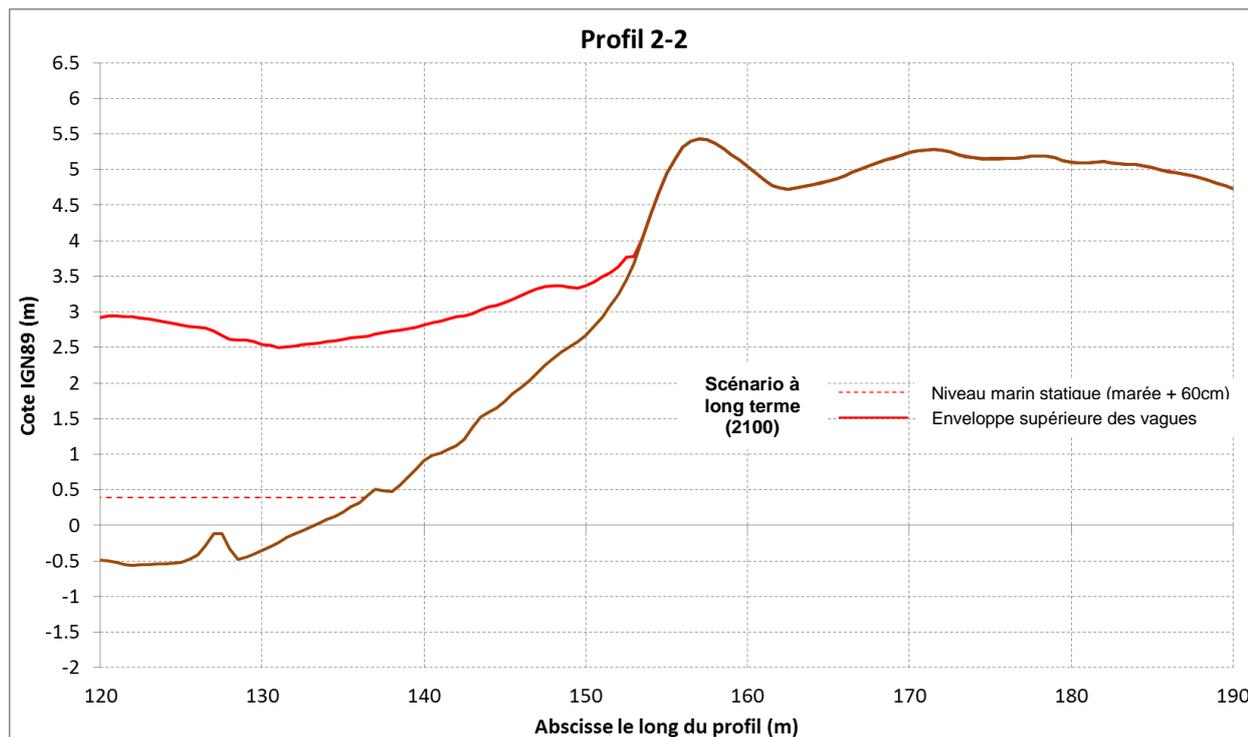


Figure 54 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2-2 pour le scénario à long-terme

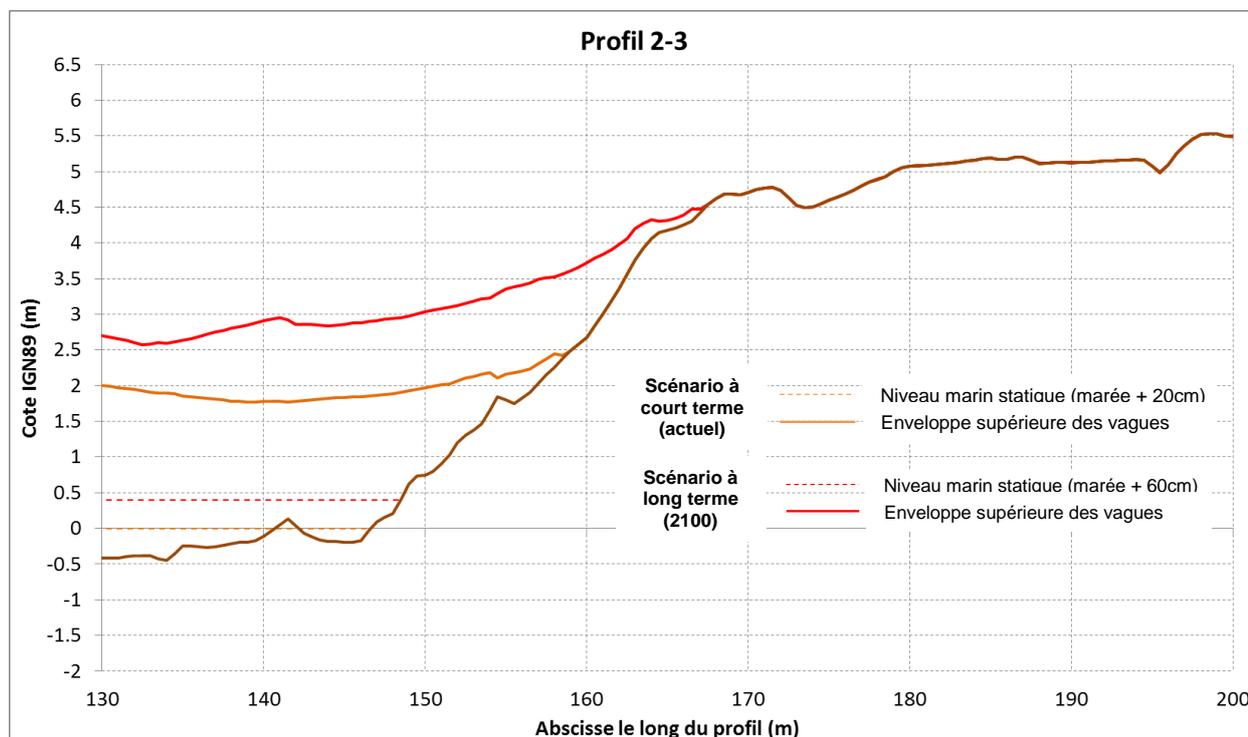


Figure 55 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2-3 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

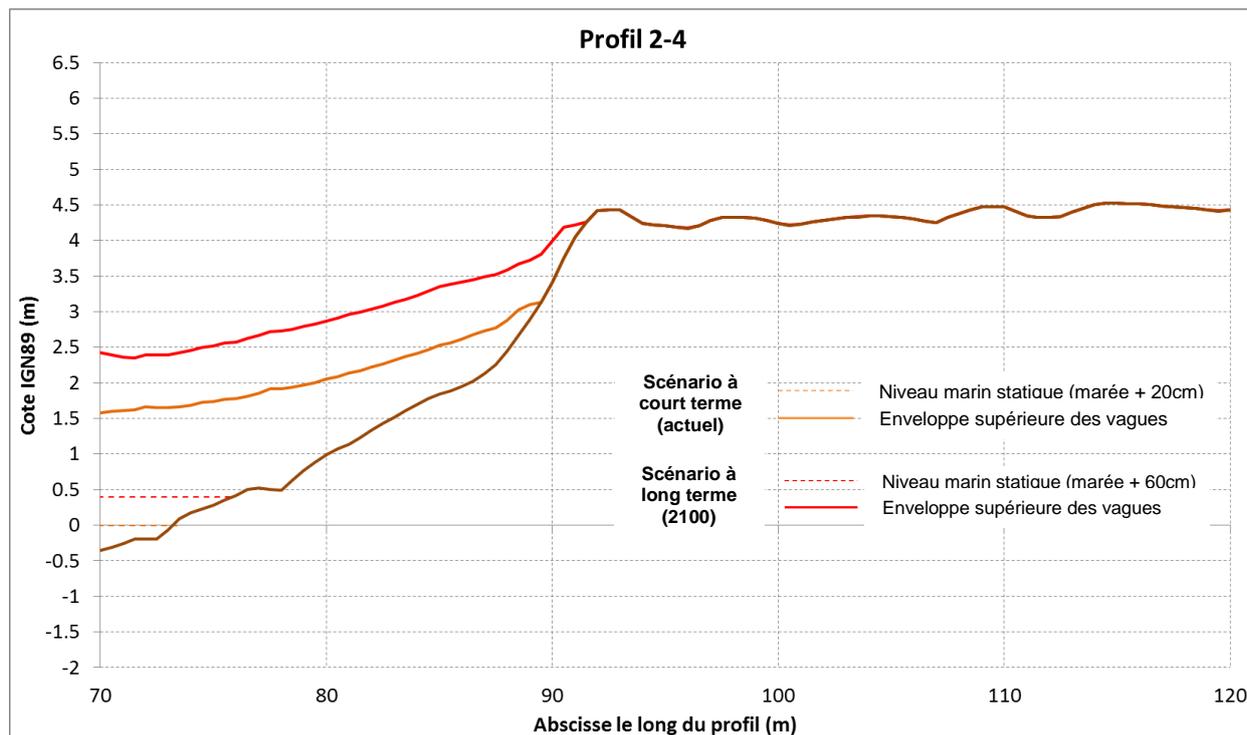


Figure 56 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2-4 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

Sur la zone 3, dont les résultats sont présentés aux figures suivantes, le niveau d'eau revêt également une importance sensible : on constate en effet qu'entre le scénario à court-terme et le scénario à long-terme, une augmentation du niveau marin de 40 cm peut se traduire par une augmentation de 1 m du run-up. On notera toutefois qu'aucune des simulations menées sur la zone 3 ne montre de franchissement du talus côtier.

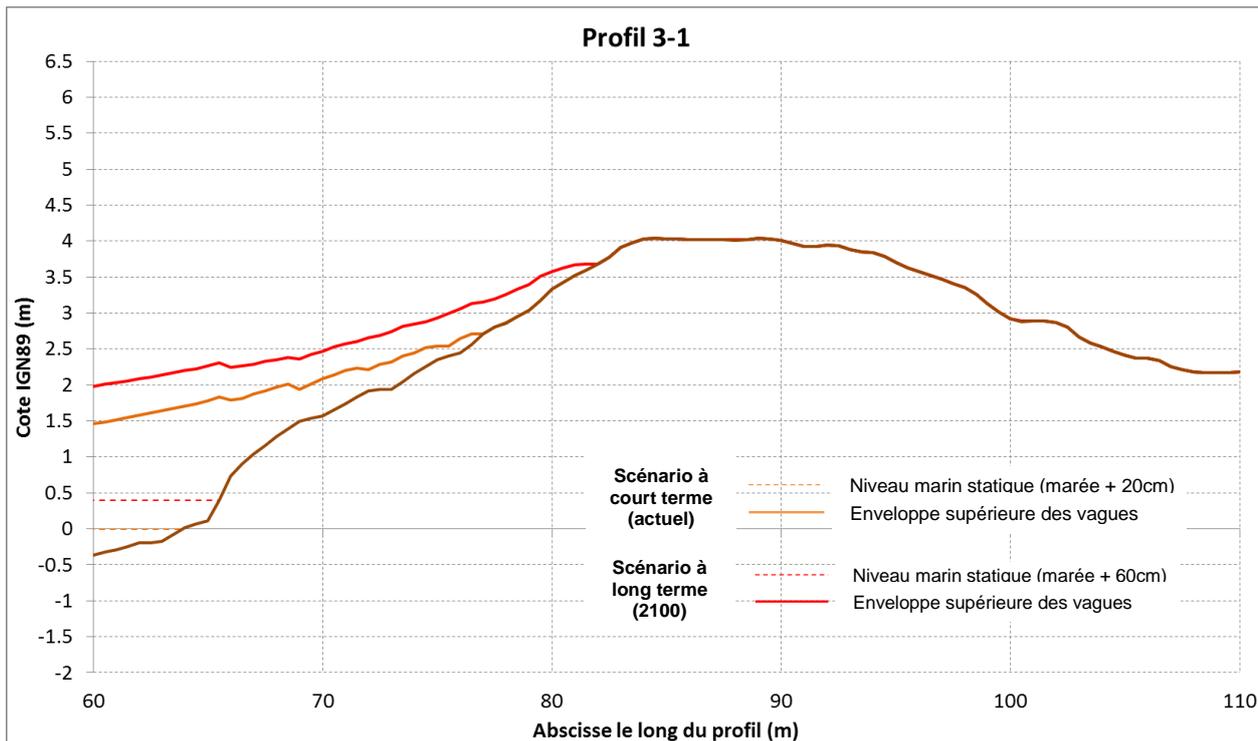


Figure 57 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 3-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

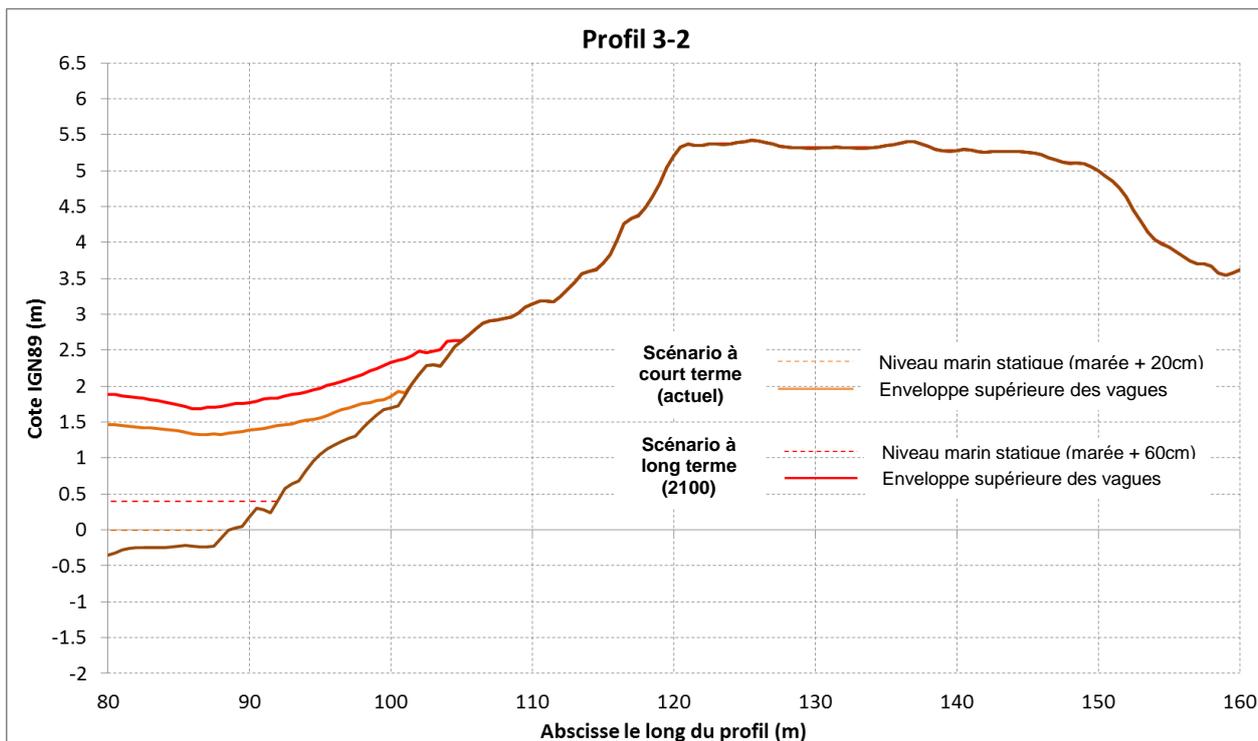


Figure 58 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 3-2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

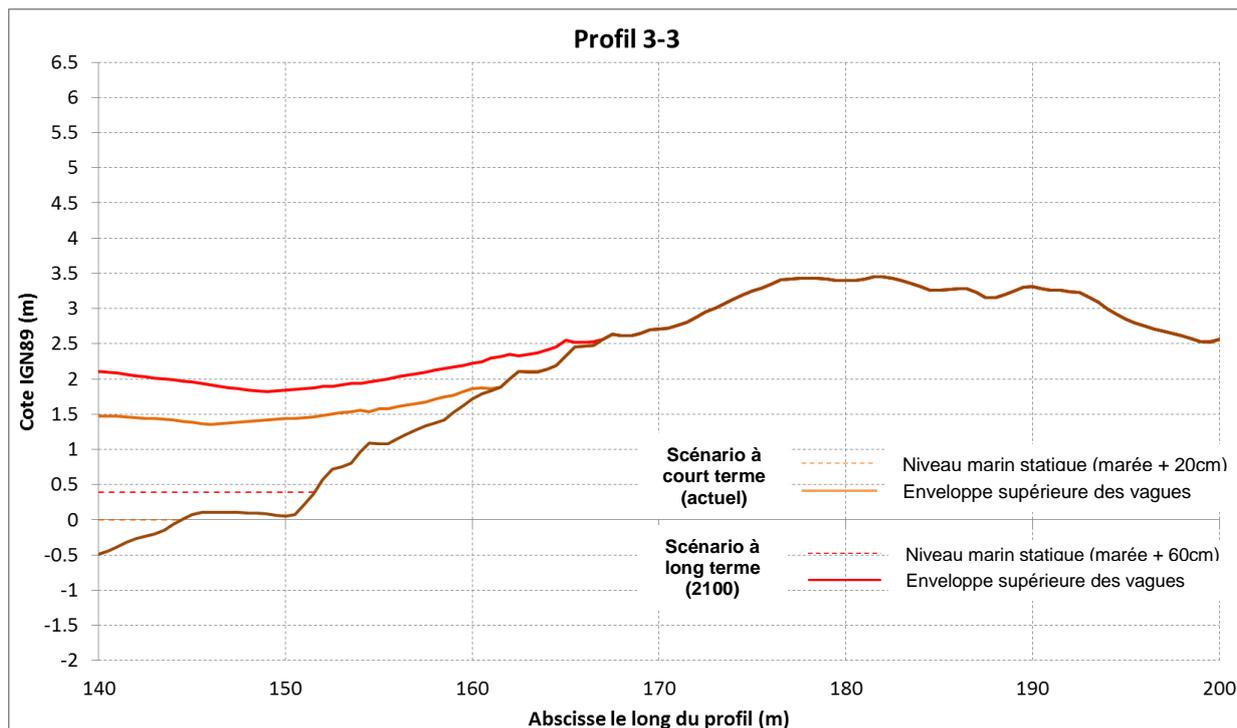


Figure 59 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 3-3 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

Sur la zone 4, un seul profil a été étudié (Figure 60). Il montre que même pour le scénario à long-terme, aucun franchissement ne survient sur ce secteur.

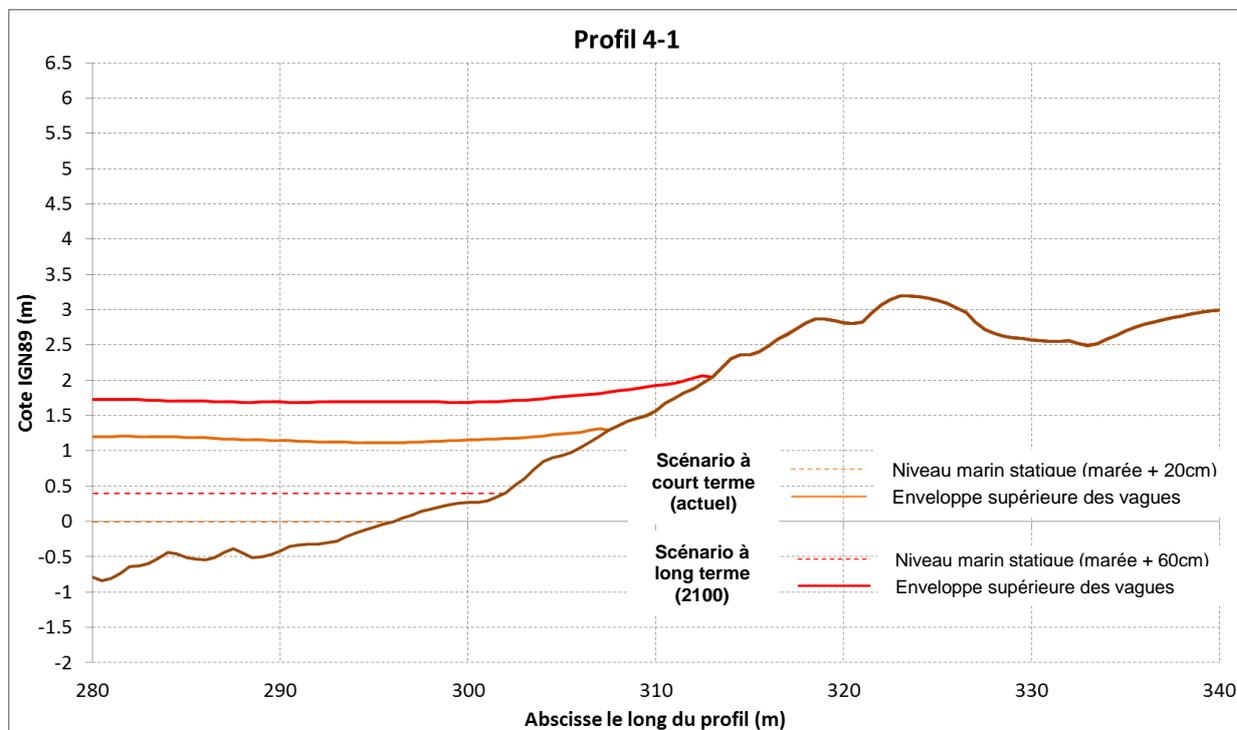


Figure 60 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 4-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

Sur la zone 5, la hauteur des vagues reste modérée de par la présence du récif. On constate que pour chacun des 3 profils, les cotes maximales atteintes pour chaque niveau d'eau restent assez homogènes (de l'ordre de 1,5 m pour le scénario à court-terme, et de 2,1 à 2,2 m pour le scénario à long-terme).

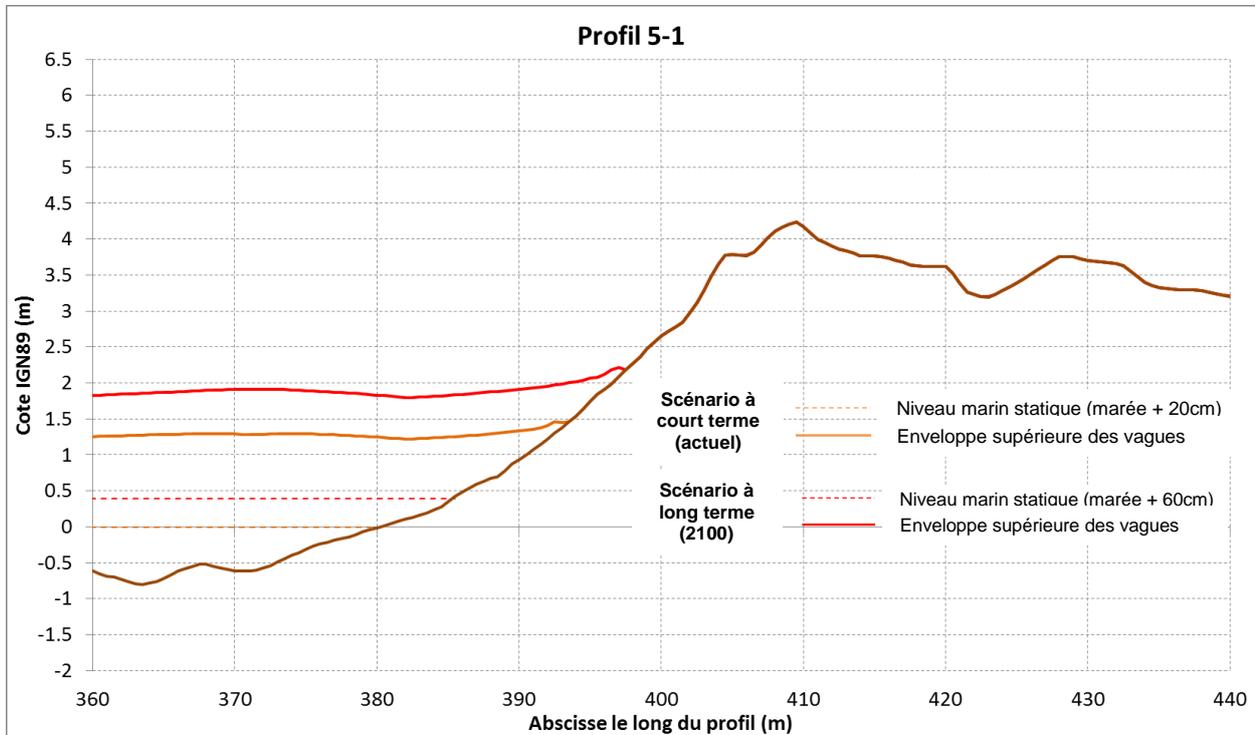


Figure 61 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 5-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

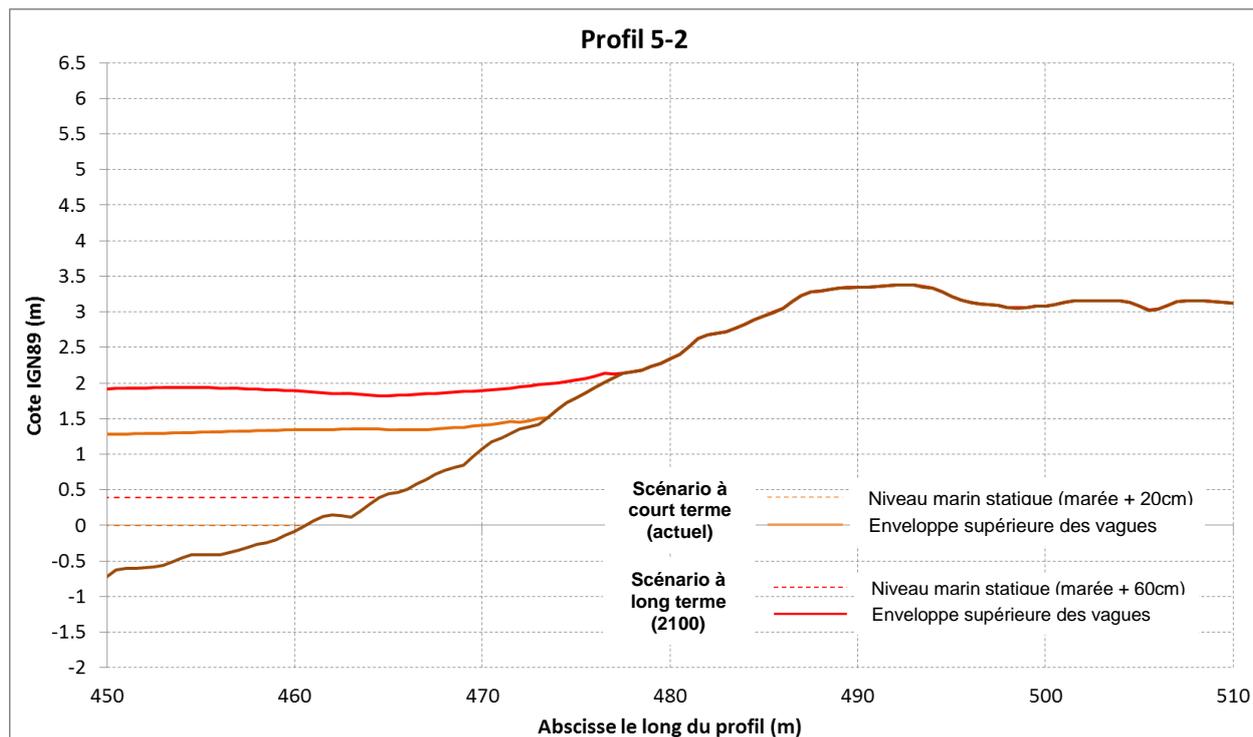


Figure 62 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 5-2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

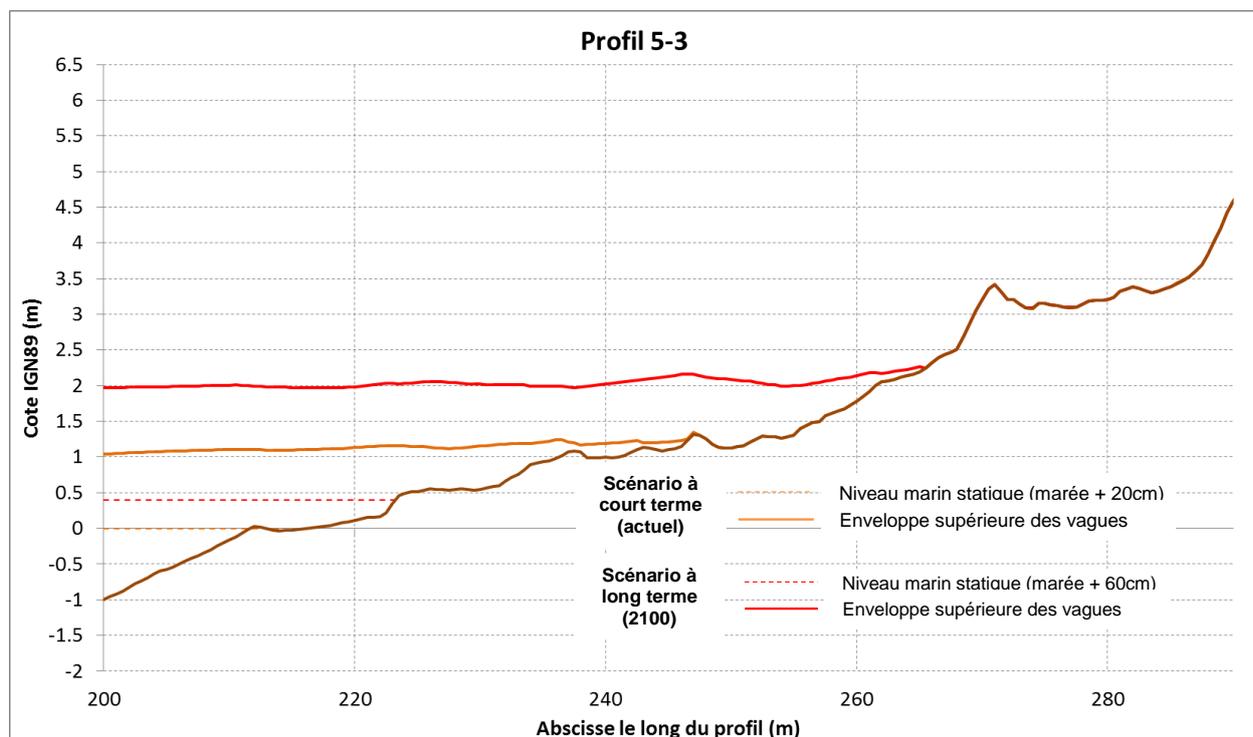


Figure 63 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 5-3 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

Synthèse

Le Tableau 14 synthétise les résultats obtenus pour chaque scénario et sur chaque profil en termes de niveau moyen de l'eau et de cote maximale atteinte à terre correspondant au jet de rive des vagues les plus fortes.

Ces résultats mettent clairement en lumière le rôle de protection du récif corallien qui dissipe fortement l'énergie des vagues et limite ainsi le jet de rive à la côte. En effet, sur la zone étudiée, les simulations génèrent une submersion cantonnée aux plages mais les vagues ne franchissent pas le cordon littoral, même pour le scénario à long-terme (horizon 2100).

Profil	Scénario à court-terme		Scénario à long-terme	
	Altitude moyenne atteinte par les vagues ¹⁴ (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte par les vagues ⁶ (m, IGN89)	Altitude moyenne atteinte par les vagues ⁶ (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte par les vagues ⁶ (m, IGN89)
2-2	<i>Pas de résultats</i>		1.8	3.68
2-3	1.1	2.38	1.5	4.42
2-4	0.9	2.89	1.7	4.05
3-1	0.9	2.56	1.6	3.6
3-2	0.9	1.87	1.4	2.55
3-3	0.9	1.83	1.3	2.48
4-1	0.8	1.29	1.2	1.96
5-1	0.8	1.38	1.2	2.09
5-2	0.8	1.42	1.2	2.08
5-3	1	1.32	1.3	2.24

Tableau 14 : Houles australes du 13 mai 2007 (00h00 TU) : Synthèse des résultats obtenus sur les zones 2 à 5 pour chaque profil et chaque scénario

Des tests de sensibilité ont été menés (élévation du niveau d'eau, diminution de la friction) et ont montré que l'influence de ces paramètres restait très limitée sur les résultats de simulation.

6.2.5. Simulation 1D du cyclone Dina (profils 1-1 et 1-2 et ville de Saint-Paul en 2D)

Le cyclone Dina constitue l'événement de référence au nord de la Pointe des Aigrettes. Il concerne donc la zone 1 (profils 1D 1-1 et 1-2) et la ville de Saint-Paul (2D).

Simulations 1D sur la zone 1

- **Méthode mise en œuvre**

La méthodologie mise en œuvre s'appuie sur les résultats de l'étude HOULREU du BRGM (Pedreros *et al.*, 2009).

¹⁴ Jet de rive compris en haut de rivage

En une dimension, la démarche pour les simulations de submersion pour le cyclone Dina diffère très légèrement de celle menée pour les houles australes : en effet, compte-tenu de l'orientation des vagues par rapport à la côte de la zone 1 lors du pic de houle, la propagation directe des spectres au large (issus de l'étude HOULREU) jusqu'à la côte par le code Swan en 1D a pu être appliquée :

- A partir des simulations de Dina dans l'étude HOULREU (grille R20 à résolution 90 m), propagation de spectres à la côte par le code Swan en 1D (Booij *et al.*, 2004) ;
- génération d'une série temporelle pour un couplage avec le code vague-à-vague SurfWB (Marche *et al.*, 2007) ; en pratique, il est nécessaire d'identifier les zones de déferlement des vagues pour générer les séries temporelles après le déferlement (ce phénomène n'étant pas simulé par SurfWB) ;
- Simulation de la submersion en 1D avec le code SurfWB sur une durée de 30 minutes, ce qui correspond à une centaine de vagues. En pratique, cette durée de 30 minutes permet d'obtenir un nombre de vagues représentatif des phénomènes, mais il est nécessaire en cas de franchissement d'adapter cette durée pour se rapprocher d'un scénario réaliste en durée, d'actions des houles cycloniques.

- **Simulations Swan 1D : propagation des conditions de vagues jusqu'à la côte**

Les calculs ont été menés à l'aide du code SWAN en 1D, en conditions stationnaires lors du maximum de la houle (22/01/2002 à 22h00 TU).

Les simulations du cyclone Dina menées lors de l'étude HOULREU à une résolution de 90 m sur la côte ouest de l'île (grille de calcul noté R20 dans Pedreros *et al.*, 2009) ont été directement exploitées pour calculer en 1D avec le code Swan la propagation des conditions de vagues à la côte, suivant les 2 scénarios envisagés (court-terme et long-terme). Ces calculs ont été menés à une résolution de 1 m et permettent de calculer les caractéristiques des vagues tout le long des profils. Un aperçu des résultats est présenté à la Figure 64 et Figure 65 pour le scénario à court-terme, et à la Figure 66 et Figure 67 pour le scénario à long-terme. Le profil 1-1 est situé à l'embouchure de la ravine de Boucan Canot. Le profil 1-2, est situé à 300 m au sud du P1-1 (secteur « Maharani »). Voir Annexe 1 – Planche 1.

Sur la première de ces illustrations sont indiquées les principales phases du comportement des vagues à l'approche de la côte : atténuation des vagues par frottement au large, puis gonflement (« shoaling ») des vagues sous l'effet du fond avant le déferlement qui provoque « l'effondrement » des vagues et l'augmentation du setup.

Profil 1-1 – Cyclone Dina – Scénario à court terme

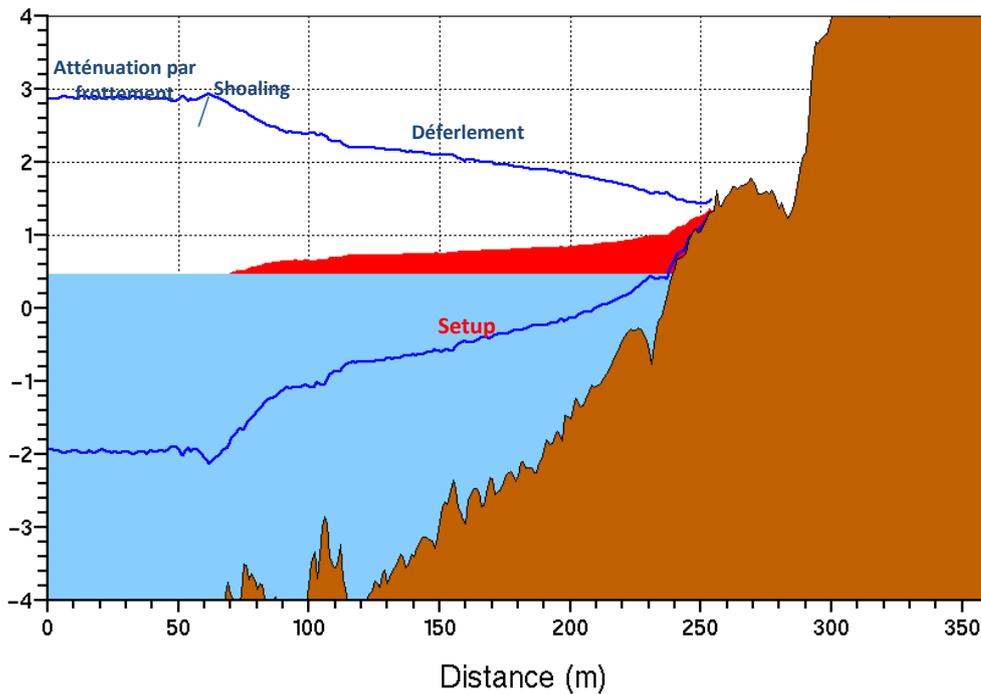


Figure 64 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-1 pour le scénario à court-terme

En marron : Topo-bathymétrie ; en bleu-clair : Niveau d'eau statique (marée, surcote atmosphérique, élévation du niveau marin de 20 cm) ; en rouge : Setup (élévation due aux vagues) ; en bleu : Enveloppes des crêtes et des creux des vagues.

Profil 1-2 – Cyclone Dina – Scénario à court terme

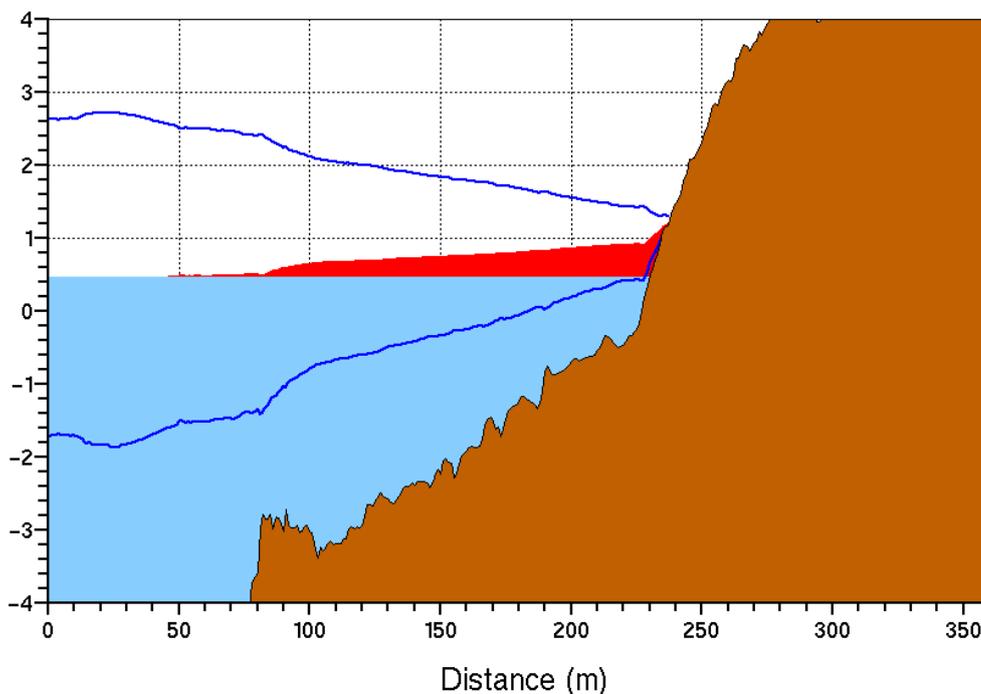


Figure 65 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-2 pour le scénario à court-terme

En marron : Topo-bathymétrie ; en bleu-clair : Niveau d'eau statique (marée, surcote atmosphérique, élévation du niveau marin de 20 cm) ; en rouge : Setup (élévation due aux vagues) ; en bleu : Enveloppes des crêtes et des creux des vagues.

Profil 1-1 – Cyclone Dina – Scénario à long terme

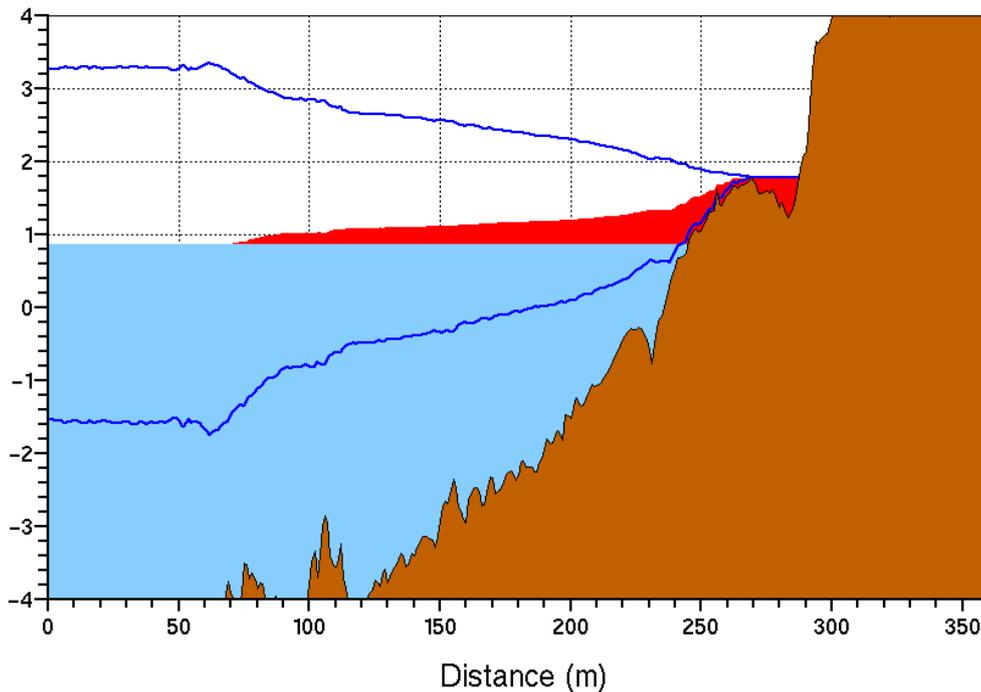


Figure 66 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-1 pour le scénario à long-terme

En marron : Topo-bathymétrie ; en bleu-clair : Niveau d'eau statique (marée, surcote atmosphérique, élévation du niveau marin de 60 cm) ; en rouge : Setup (élévation due aux vagues) ; en bleu : Enveloppes des crêtes et des creux des vagues.

Profil 1-2 – Cyclone Dina – Scénario à long terme

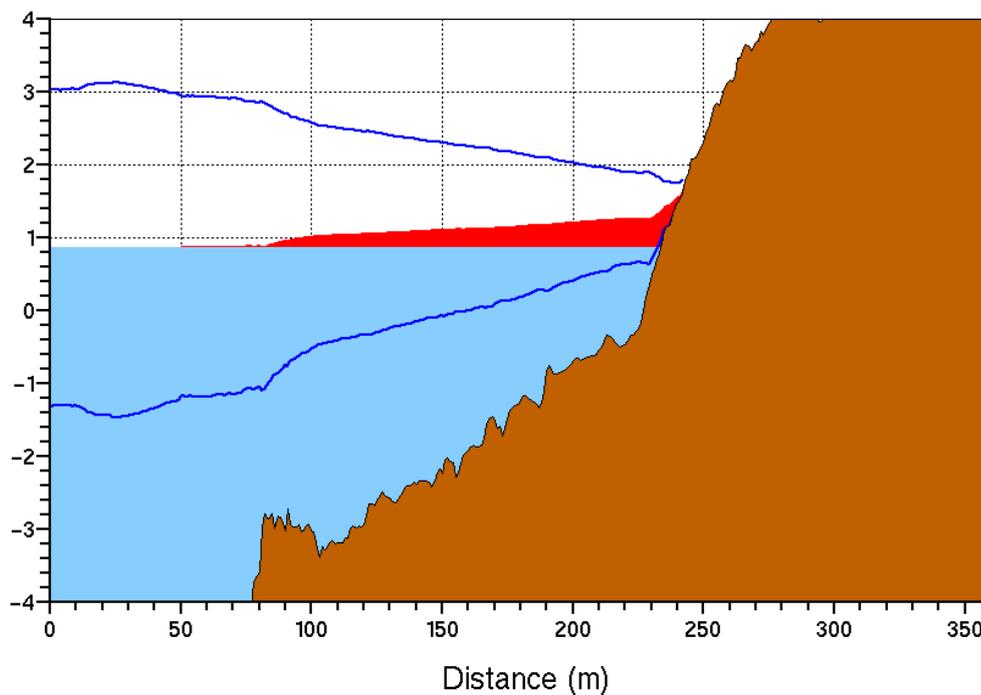


Figure 67 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Caractéristiques des vagues le long du profil 1-2 pour le scénario à long-terme

En marron : Topo-bathymétrie ; en bleu-clair : Niveau d'eau statique (marée, surcote atmosphérique, élévation du niveau marin de 60 cm) ; en rouge : Setup (élévation due aux vagues) ; en bleu : Enveloppes des crêtes et des creux des vagues.

Comme pour les houles australes, l'analyse des résultats permet d'identifier les zones de déferlement des vagues. Une extraction des spectres est réalisée après cette zone pour chacun des deux profils et chacun des deux scénarios, afin de réaliser le couplage avec le code SurfWB (qui ne prend pas en compte le phénomène de déferlement). Sur les deux profils 1-1 et 1-2, les abscisses des points d'extraction de ces spectres sont respectivement de 153 m et 149 m.

- **Reconstitution des séries temporelles**

Les spectres de vagues ainsi obtenus montrent, quels que soient le profil et le niveau d'eau considéré suivant le scénario, que la fréquence dominante des vagues est de l'ordre de 0,085 Hz, ce qui correspond à des vagues de période de l'ordre de 12 secondes. Comme précédemment pour les houles australes, on remarque que plus le niveau d'eau est élevé, plus l'énergie des vagues est importante (ce qui s'explique par le fait que les vagues sentant moins le fond, elles sont moins soumises au déferlement et à la dissipation d'énergie associée). Ceci est illustré sur l'exemple du profil 3-1, à la Figure 68.

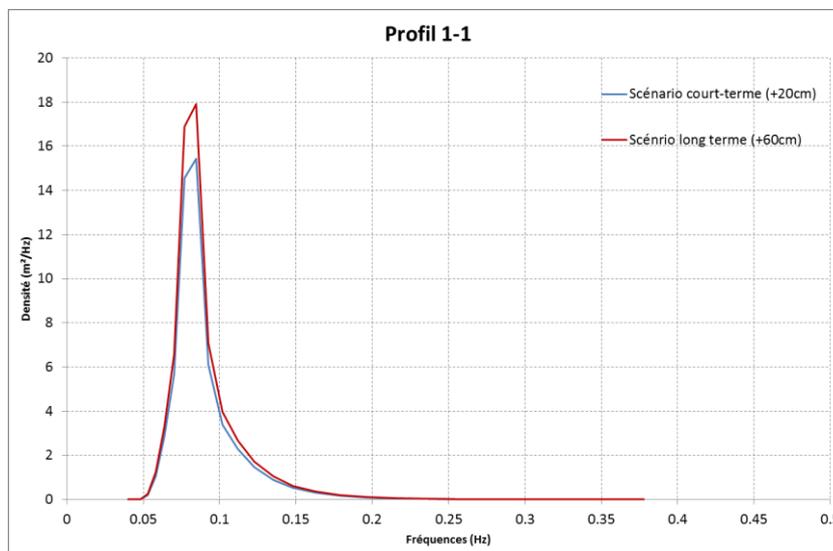


Figure 68 : Comparaison des spectres calculés par SWAN en entrée du profil 1-1 pour les 2 valeurs de niveau considérées

Comme cela a été fait pour les houles australes, ces caractéristiques de spectres sont ensuite utilisées pour reconstituer de manière aléatoire des séries temporelles de vagues conformes à ces caractéristiques, pour chacun des 2 profils et chacun des 2 scénarios. Les séries temporelles ont été reconstituées sur des durées de 30 minutes, de manière à assurer un nombre de vagues supérieur à 100 (représentativité).

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 15 et le Tableau 16, respectivement pour les scénarios à court-terme (+20 cm) et à long-terme (+60 cm).

	Prof1-1		Prof1-2	
	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	2,665	10,700	2,191	10,652
Série tempo	2,569	10,840	2,104	10,565
Ecart	0,096	0,140	0,087	0,087

Tableau 15 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à court-terme

	Prof1-1		Prof1-2	
	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	2.874	10.671	2.396	10.633
Série tempo	2.784	10.900	2.344	10.779
Ecart	0.090	0.229	0.052	0.146

Tableau 16 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour le scénario à long-terme

Comme pour les houles australes précédemment, on remarque qu'une élévation du niveau d'eau se traduit par une modification des caractéristiques des vagues en un même point. Ainsi, le scénario à long-terme conduit non seulement à élever le niveau d'eau, mais également à augmenter légèrement la hauteur significative des vagues : ici, les hauteurs significatives des vagues sont de 20 cm supérieures pour le scénario à long-terme par rapport au scénario à court-terme.

• Submersion

Les simulations de submersion en 1D ont été ensuite menées avec le code SurfWB suivant les mêmes procédures que pour les houles australes :

- Profils topo-bathymétriques issus des données Litto3D, sans bâti, ré-échantillonnés pour une résolution de calcul de 50 cm (résolution d'origine : 1 m) ;
- Friction au fond homogène : coefficient de Manning de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$;
- Durée des simulations fixées à 30 minutes afin que le nombre de vagues simulées soit représentatif des phénomènes (durée pouvant être au besoin allongée en cas de franchissement afin de déterminer le volume franchissant).

Les Figure 69 et Figure 70 présentent les résultats obtenus sur les 2 profils de la zone 1 en termes de hauteurs d'eau maximales.

Pour mémoire, le niveau de plus haute mer astronomique (marée) se situe dans le secteur d'étude aux alentours de +0,45 m IGN89 (cf. 6.2.3). Il correspond à la limite d'action de la mer par temps calme (pas de vagues) pour les plus hautes mers astronomiques.

Sur le profil 1-1, la submersion touche l'arrière de la plage : la dépression topographique représente le « chenal » du débouché de la ravine Boucan Canot sur la plage. Le débouché est fixé en rive gauche par un mur maçonné. Un franchissement de ce mur (cote supérieure de l'ordre de 3,60 m IGN89 d'après le MNT Litto3D) est observé et une inondation apparaît sur près de 10m à l'arrière du mur.

Sur le profil 1-2, le haut de plage, en pente douce, est envahi par les vagues (scénario long-terme) sur une distance de 45 m à l'arrière de la limite d'action de la mer par temps calme (pas de vagues) pour les plus hautes mers astronomiques (marée seule).

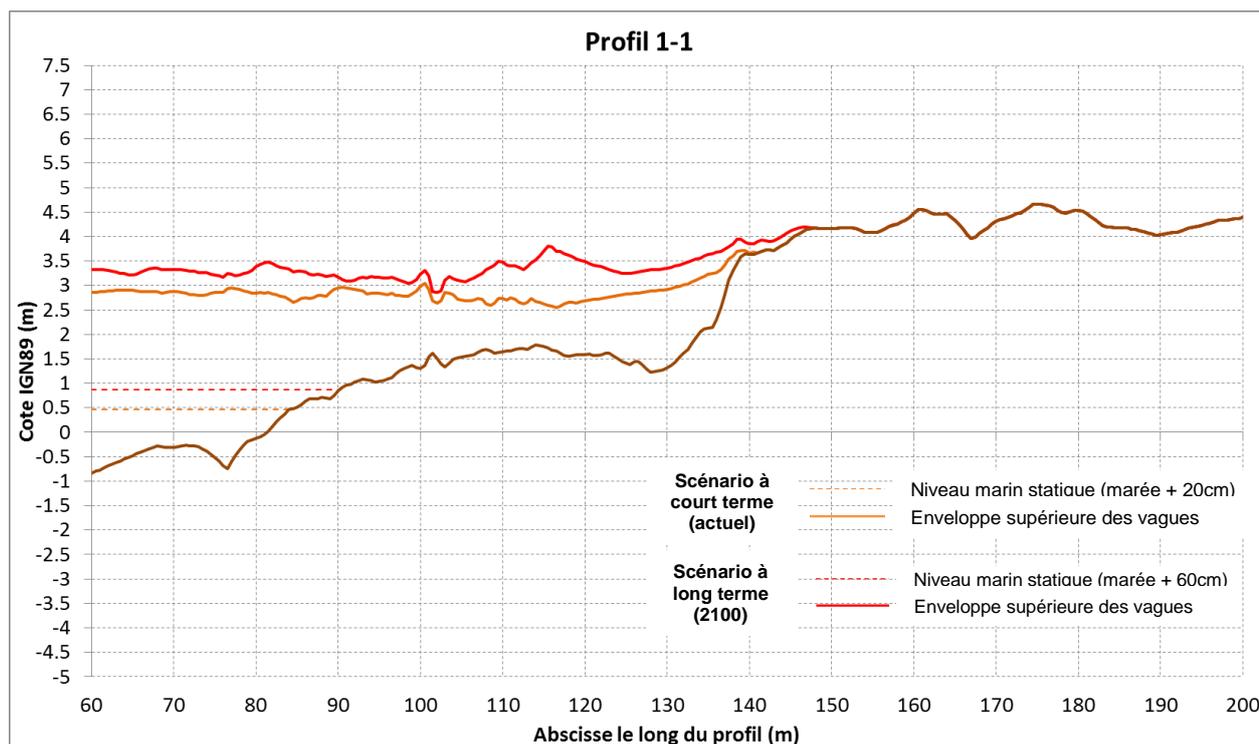


Figure 69 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 1-1 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

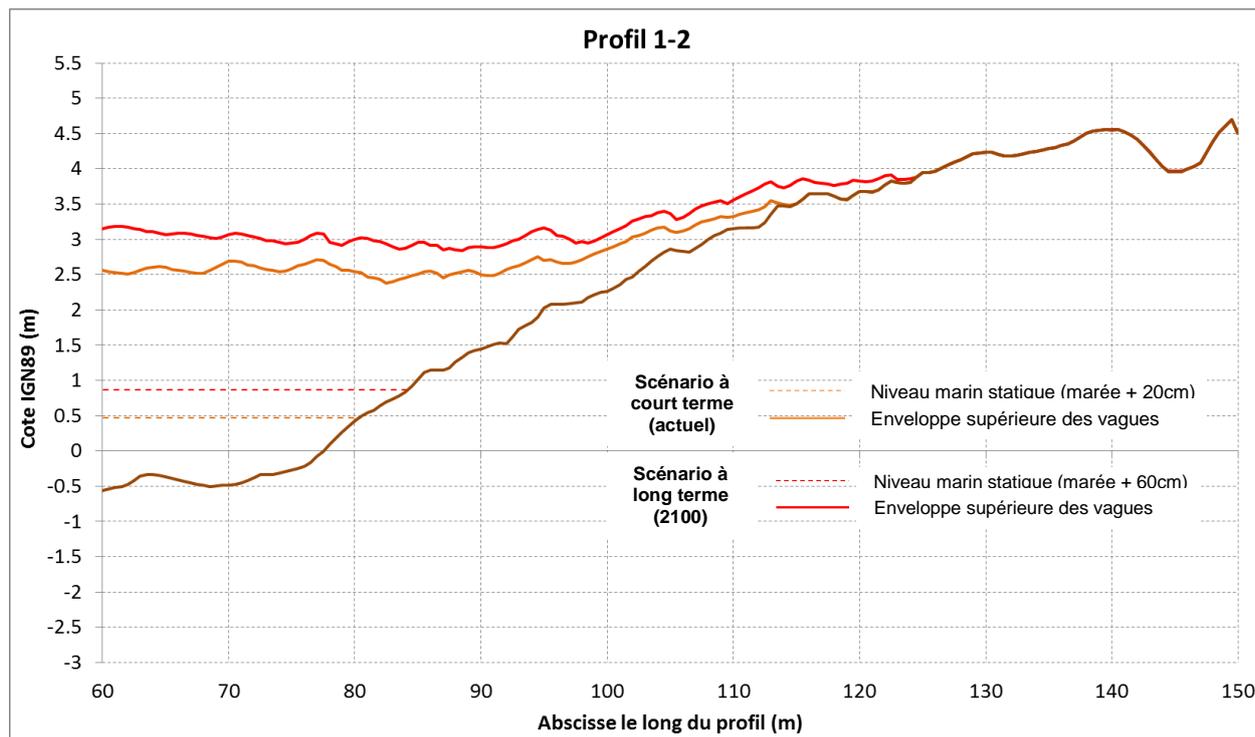


Figure 70 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 1-2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme

• Synthèse

Le Tableau 17 synthétise les résultats obtenus pour chaque scénario et sur chaque profil en termes de cote moyenne atteinte par les vagues (reflétant ainsi le niveau où il y a en moyenne 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	
	Cote moyenne atteinte par les vagues (m, IGN89)	Cote maximale atteinte par les vagues (m, IGN89)	Cote moyenne atteinte par les vagues (m, IGN89)	Cote maximale atteinte par les vagues (m, IGN89)
1-1	1,9	3,64	2,2	4,16
1-2	1,8	3,46	2,4	3,81

Tableau 17 : Cyclone Dina (22h00) : Synthèse des résultats obtenus pour chaque profil de la zone 1 et chaque scénario

Modélisation 2D sur la baie de St Paul

Les caractéristiques de la houle cyclonique au large générée par DINA (hauteur, période et direction) proviennent directement des simulations menées à l'aide du modèle SWAN dans le projet HOULREU (Pedreros et al., 2009).

La propagation à la côte ainsi que la submersion à terre ont été calculées grâce au modèle SWASH (Simulating WAVes till SHore). Il s'agit d'un code vague-à-vague développé par l'Université Technologique de Delft aux Pays-Bas (Zijlema et al. 2011). Il résout les équations de Saint-Venant non linéaires (*nonlinear shallow water*) en incluant les termes non-hydrostatiques de la pression. Ce code permet de simuler la propagation des vagues en domaine côtier ainsi que la submersion marine à terre car il tient compte des phénomènes de : réfraction, diffraction, frottement au fond, gonflement, déferlement, réflexion, des interactions vague-vague et vague-courant, génération des courants induits par les vagues, le traitement de l'interface sèche-mouillée et la propagation des écoulements en zone de swash en présence d'ouvrages et du bâti. Ce code ne contient pas de module morphodynamique si bien qu'il ne peut pas modéliser l'érosion des plages ou des cordons littoraux.

Deux domaines de calcul SWASH (voir Figure 71) ont été implantés dans la baie de Saint-Paul (Saint-Paul Nord et Saint-Paul Sud) pour concilier haute résolution spatiale (3 m) et réduction des temps de calcul. Les caractéristiques de ces domaines sont indiquées Tableau 18.

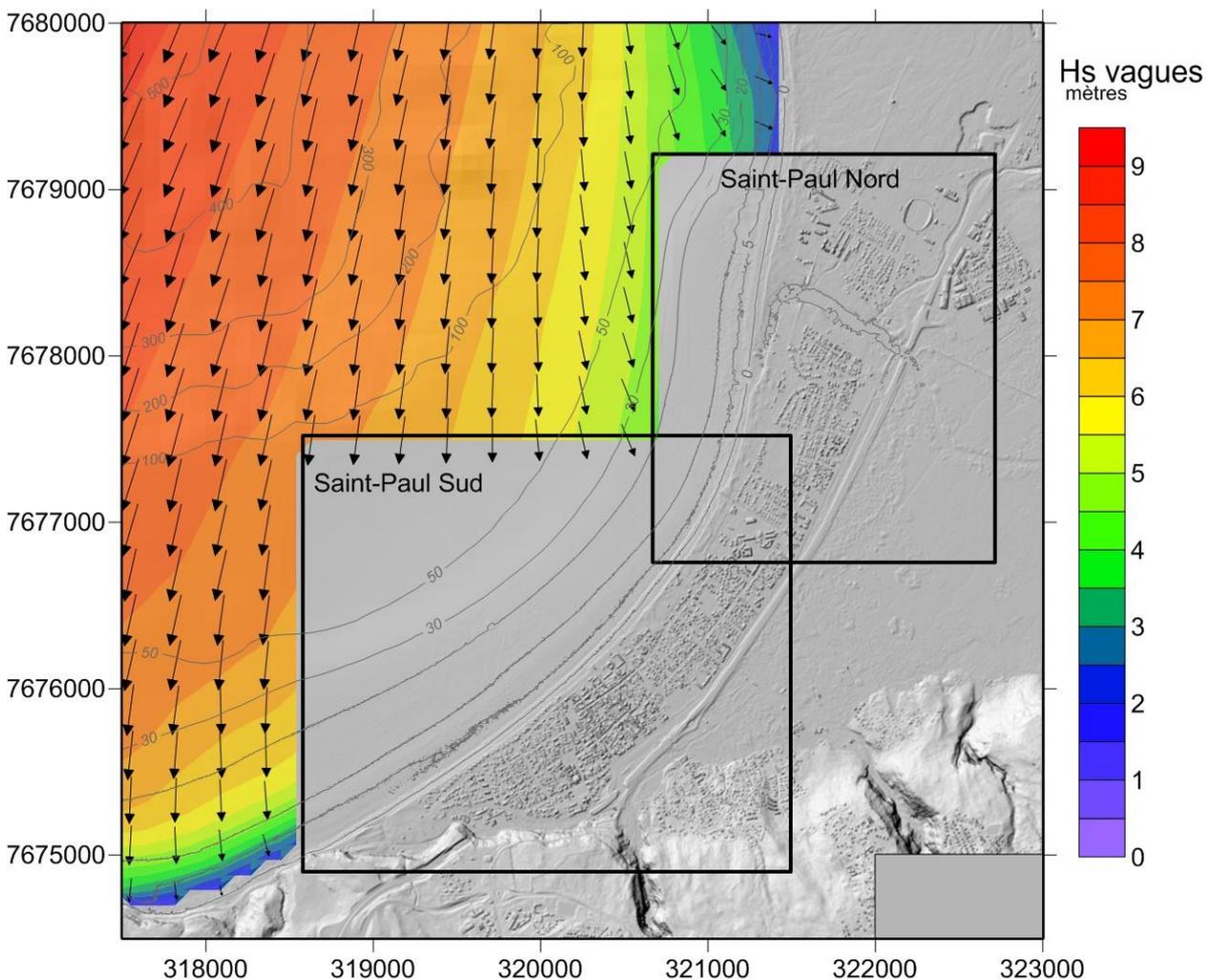


Figure 71 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Implantation des deux grilles SWASH sur la baie de Saint-Paul et forçage avec les données de vagues issues de SWAN (les vecteurs indiquent la direction de propagation des vagues)

Domaines	Coordonnées métriques (système géodésique RGR92)				Taille maille (m)		Nombre de mailles	
	Ouest	Est	Sud	Nord	dx	dy	nx	ny
Saint-Paul Nord	320670	322716	7676760	7679214	3	3	683	819
Saint-Paul Sud	318579	321498	7674900	7677525	3	3	974	876

Tableau 18 : Détail des deux grilles de calcul SWASH.

Le frottement lors de la propagation des vagues et durant la phase de submersion est pris en compte à l'aide de la formulation de Manning selon 3 coefficients différents correspondant au domaine marin ($0.025 \text{ s/m}^{1/3}$), au lit de l'étang et zones végétalisées ($0.08 \text{ s/m}^{1/3}$) et aux zones urbanisées ($0.014 \text{ s/m}^{1/3}$, asphalte).

Pour la grille Saint-Paul Nord, les vagues ont une incidence quasi-parallèle à la côte avec des hauteurs significatives (H_s) proches de 4.5 m et des périodes pic (T_p) de 11s.

Pour la grille Saint-Paul Sud, l'incidence des vagues est plus faible (en particulier au sud de la grille), les H_s varient de 5 à 7 m pour des T_p de 10 à 11 s.

La durée des simulations est de 30 minutes afin de propager un nombre suffisant de vagues, (voir exemple Figure 72).

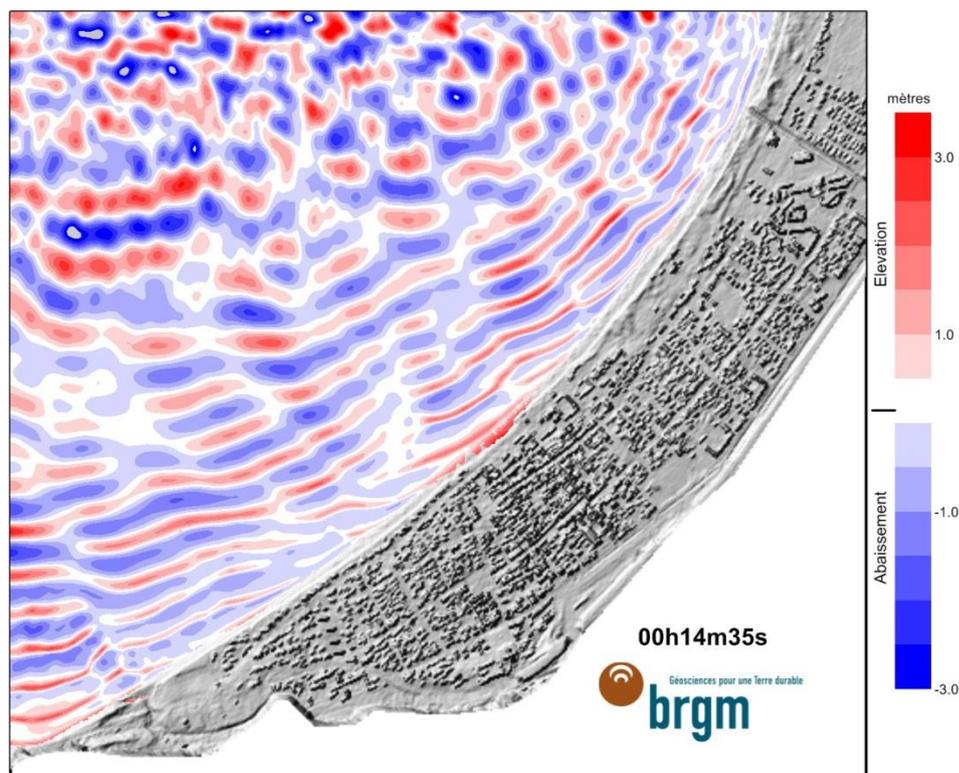


Figure 72 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Champ de vagues à l'instant 14.5 minutes (calcul réalisé entre les instants 0 et 30 minutes du modèle), grille de Saint-Paul sud.

Les limites de la submersion (trait noir) et les altitudes maximales atteintes par la mer (runup) pour les deux scénarios (à court-terme et à long-terme) sont représentées respectivement aux Figure 73 et Figure 74. Pour des raisons de lisibilité, les résultats obtenus sur les grilles Saint-Paul Sud et Nord ont été fusionnées en une seule carte.

Les runup les plus importants se situent entre le débarcadère et le cimetière, c'est-à-dire la zone la plus exposée aux vagues (incidence des vagues proche de la normale). Les valeurs les plus importantes sont de +3.3 (scénario à court-terme) et +4.2 m IGN 89 (scénario à long-terme). Elles ne suffisent pas à franchir le cordon littoral à l'exception de l'embouchure de l'étang et au sud du cimetière.

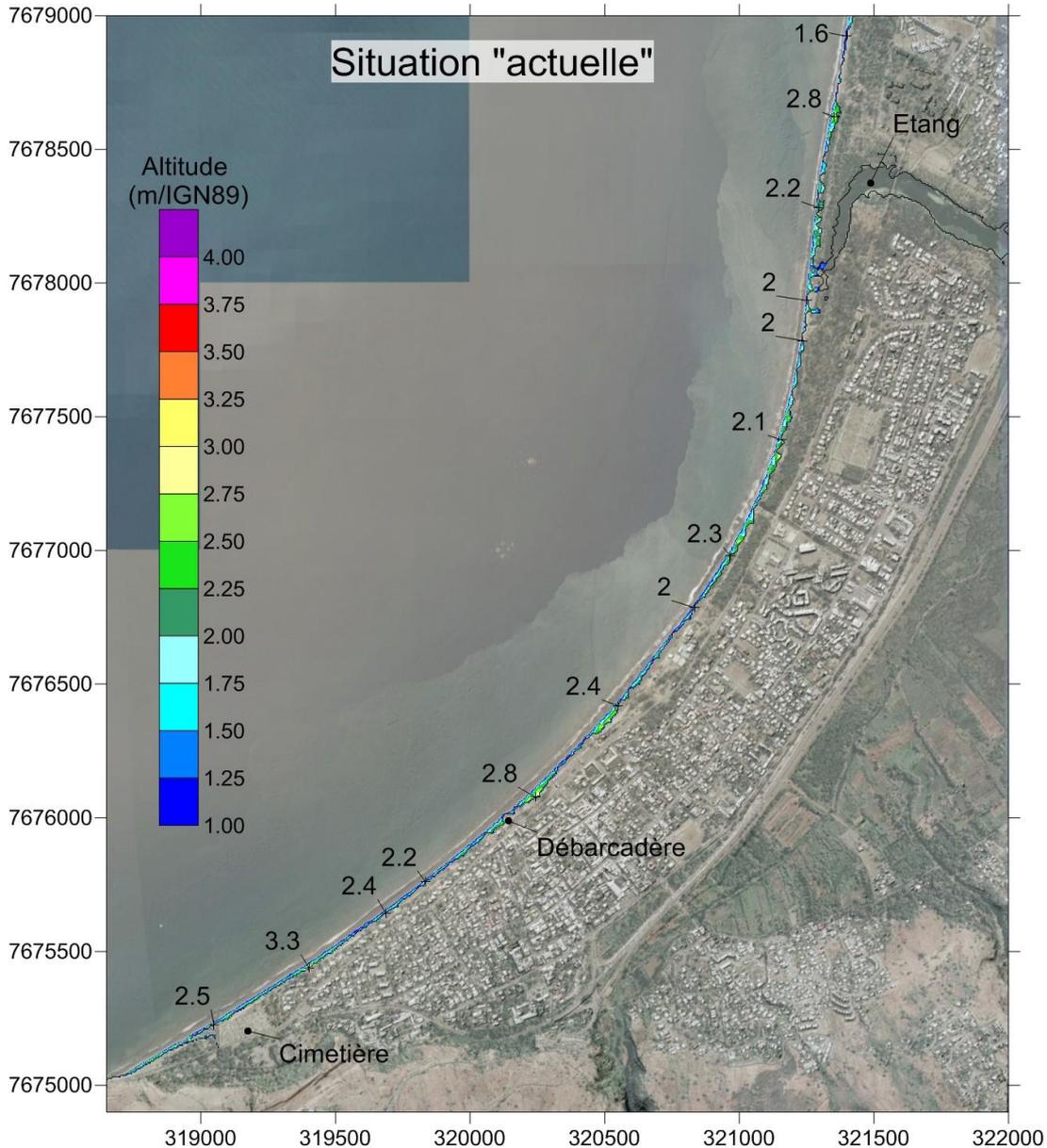


Figure 73 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Limite de submersion et runup sur la baie de Saint-Paul pour le scénario à court-terme (situation « actuelle »)

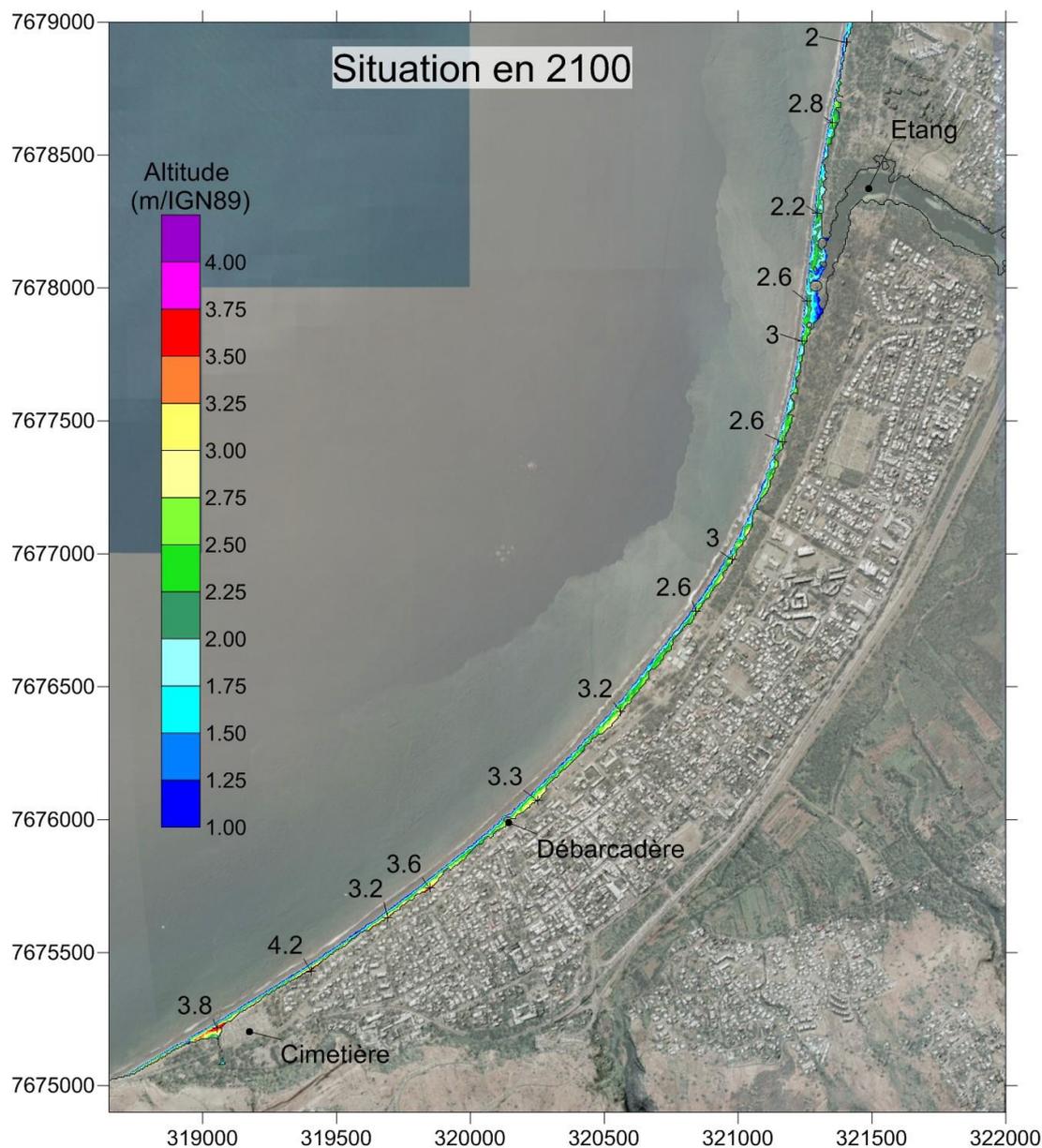


Figure 74 : Cyclone Dina (22h00 TU) : Limite de submersion et runup sur la baie de Saint-Paul pour le scénario à long-terme (situation 2100)

6.2.6. Données historiques et validation

Les événements de référence étant particulièrement récents, des données historiques sont disponibles sur la commune de St Paul, en particulier le recensement détaillé (typologie) et géolocalisé (couches SIG) des dégâts liés aux houles cycloniques et australes de 2007 (Sogreah, 2007). Ces informations sont reportées sur la cartographie présentée en annexe 3.

Confrontées aux sorties des simulations, ces observations mettent en évidence une sous-estimation des runup modélisés avec des écarts qui peuvent être localement importants (Figure 75 ; Figure 76).



Figure 75 : Ecart maximal constaté entre le run-up simulé en 1D (scénario 2100) et le runup observé (profil 5-1 pour l'évènement des houles australes de mai 2007)



Figure 76 : Ecart entre le runup simulé en 2D (en trait rouge pour le scénario actuel, en tiretets rouge pour le scénario 2100) et le runup observé (point vert) au Sud de la baie de St Paul. En triangle rouge, les points d'entrée d'eau préférentiels.

De manière générale, les modèles 1D et 2D se limitent à submerger la plage tandis que les données historiques font état localement de franchissements du haut du cordon littoral, voire plus rarement d'écoulements en arrière du cordon littoral (point d'entrée d'eau privilégié de type chemin d'accès à la mer et dépression en arrière-plage).

L'explication réside dans le fait que les simulations sont effectuées sur une morphologie constante alors que la plage est fortement érodée (redressement du profil, abaissement de l'altitude du haut de plage et possibilité de brèches dans le cordon) pendant l'épisode de tempête.

Par conséquent, ont été utilisées (cf. 6.3.1) :

- les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulements issus des modèles comme ordre de grandeur par secteur à comportement homogène pour qualifier l'aléa (Tableau 19) ;
- les limites maximales de submersion des données historiques pour le zonage cartographique.

6.3. ZONAGE CARTOGRAPHIQUE DE L'ALEA SUBMERSION MARINE

6.3.1. 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 19) :

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

Tableau 19 : Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (MEDDTL, 2011)

Partant des hauteurs d'eau et vitesses de submersions issues de la modélisation et de la morphologie du littoral sédimentaire saint-paulois, l'aléa a été qualifié comme :

- **Fort**, pour les secteurs qui sont sous le niveau d'eau de référence et ceux qui sont soumis à la partie du jet de rive la plus puissante (écoulement rapide), pouvant induire des projections de matériaux sédimentaires (galets, fragments de coraux) et de débris ;
- **Modéré**, pour les secteurs qui subissent des écoulements plus lents et des lames d'eau de hauteurs comprises entre 0,5 et 1m. Ces lames d'eau ont suffisamment d'énergie pour générer des dégâts sur les constructions (affouillement notamment), ensabler les parcelles et transporter des fragments de coraux, de galets ou des débris ;
- **Faible**, pour les secteurs qui subissent des écoulements résiduels lents et d'une hauteur inférieure à 0,50 m. Ces écoulements représentent la partie du jet de rive qui a atteint les terrains les plus en arrière et dont l'énergie est fortement dissipée par les obstacles ou la topographie.

6.3.2. Traitements et zonages cartographiques

Le zonage est cartographié sous SIG à partir des données historiques de Sogreah pour délimiter la submersion à l'intérieur des terres. L'altitude maximale atteinte le jet de rive (*runup*) est évaluée à globalement 4m NGR pour les plages coralliennes et 6m NGR pour la baie de St Paul. En l'absence de sorties de modèles représentatives spatialement, la hiérarchisation de l'aléa de fort à faible se fait à dire d'expert selon les observations historiques, la puissance du jet de rive simulé (rapport hauteur d'eau, vitesse), la topographie et l'occupation du sol. 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 comme aléa fort l'espace située entre la mer et le muret (dynamique de submersion la plus forte), en modéré la zone franchissable en arrière du muret

(dynamique de submersion altérée), et en faible la zone de stagnation potentielle de l'eau (dynamique de submersion résiduelle).

La généralisation entre les observations et les profils 1D est réalisée en prenant en compte les particularités morphologiques (altitude du cordon, points d'entrée d'eau préférentiels, « cuvettes ») identifiées à partir du MNT, des orthophotographies et des connaissances terrain (campagne d'avril 2012) - Figure 77.

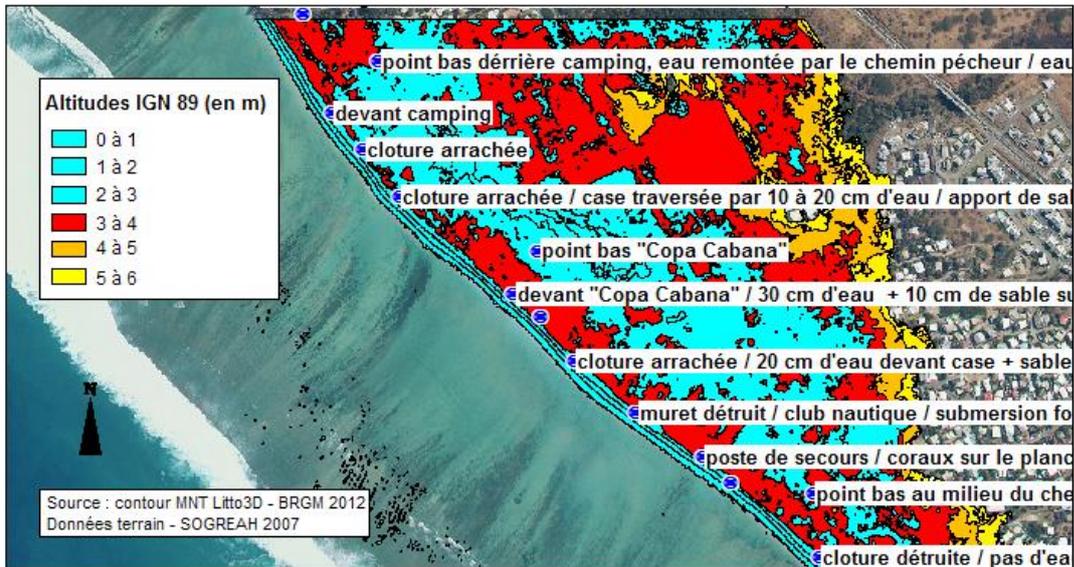


Figure 77 : Confrontation de la topographie et des données historiques pour le zonage de l'aléa submersion marine (exemple sur le secteur de La Saline)

L'interaction avec l'évolution du trait de côte est implicitement prise en compte à l'échelle événementielle de la tempête dans la mesure où le zonage est basé sur les observations de Sogreah qui intègre la résultante des deux phénomènes (recul et submersion).

Enfin, un zonage complémentaire suivant la même qualification est réalisé pour l'aléa submersion marine à l'échéance de 100 ans. Il se base sur les écarts des sorties de la modélisation en terme 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 5m 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. De manière générale, une hausse de 40cm du niveau d'eau n'accroît pas significativement la submersion, exceptée pour les zones particulièrement basses comme à l'Hermitage.

Pour les zones à l'intérieur de l'Etang St Paul et à l'embouchure du Port de St Gilles, le BRGM affine le zonage en prenant en compte les hauteurs d'eau générées par cette submersion par débordement entraînant un aléa faible et modéré (qui n'ont pas été cartographiés dans le projet d'origine par simplification). Ces modifications impliquent un sur-classement de l'aléa submersion marine sur les berges et les zones planes aux abords de l'Etang. Dans ce cadre, l'aléa est cartographié depuis le rivage jusqu'à une distance arbitraire dans les terres (proche de 600 m). Il est rappelé que la concomitance des aléas submersion marine et inondation n'a pas été caractérisé. Un scénario de concomitance inondation et submersion-marine (contexte cyclonique) pourrait provoquer des inondations autrement plus importantes que le présent document.

6.3.3. Résultats cartographiques

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

- une carte de synthèse au 1/10 000 (Annexe 4 – 2 planches) 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 78)

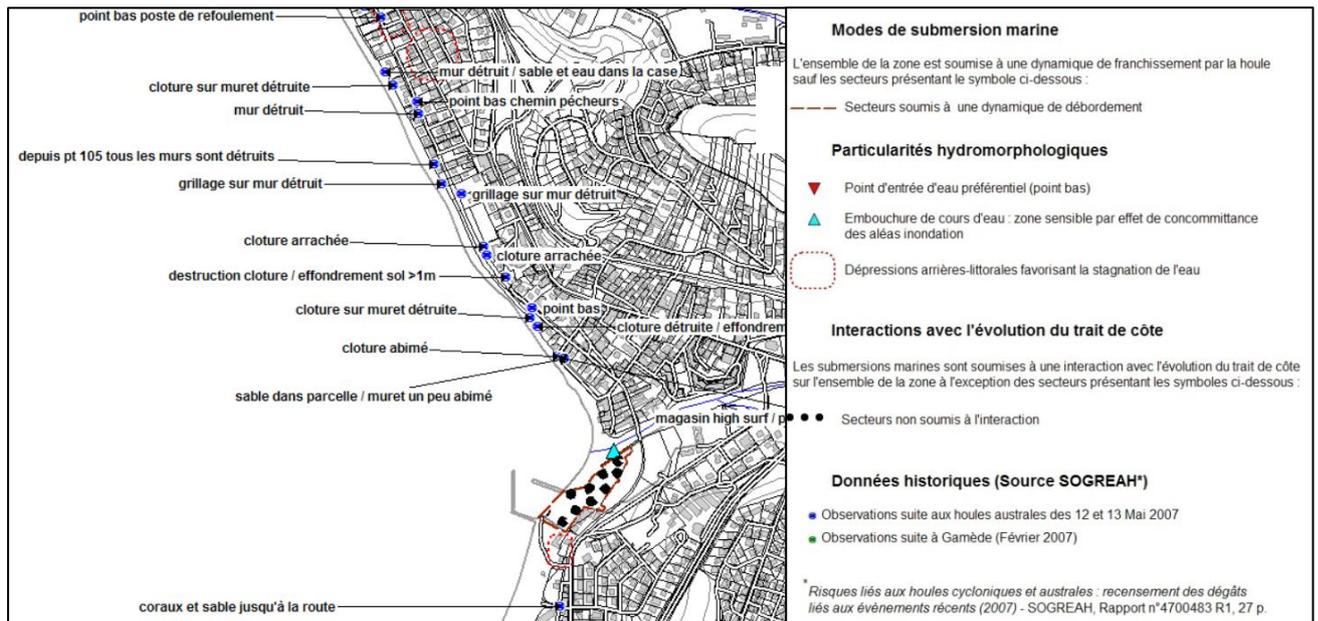


Figure 78 : Extrait de la carte de synthèse des modes de submersion et des observations de l'aléa submersion dans le secteur de St Gilles les bains

- une carte de zonage au 1/5000 (Annexe 5 - 6 planches) de l'aléa de référence et de l'aléa à échéance 100 ans (Figure 79).



Figure 79 : Extrait de la carte de zonage de l'aléa submersion dans le secteur de la Saline les bains

7. Elaboration du zonage réglementaire

7.1. 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 :

- Deux types d'aléas littoraux : recul du trait de côte et submersion marine ;
- Deux temporalités pour chacun des deux aléas considérés : l'aléa de référence et l'aléa à horizon 2100 ;
- 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 élaborer la trame d'un règlement-type « PPR littoral » réunionnais. Ce règlement-type a servi de base au projet de PPR littoral de la commune de Saint-Paul.

7.1.1. 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. Elle a pour vocation de :

- Ne pas aggraver les risques dans les secteurs non-anthropisés et soumis à un ou plusieurs aléas ;
- Permettre un développement raisonné des espaces urbanisés, 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 :

- 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 ;
- Les zones de coupure d'urbanisation du Schéma d'Aménagement Régional (SAR du 22 novembre 2011) élaboré par la Région Réunion ;

- Les zones naturelles délimitées dans les documents d'urbanismes communaux (Plan Local d'Urbanisme / Plan d'Occupation des Sols) ;
- La limite des 50 pas géométriques ;

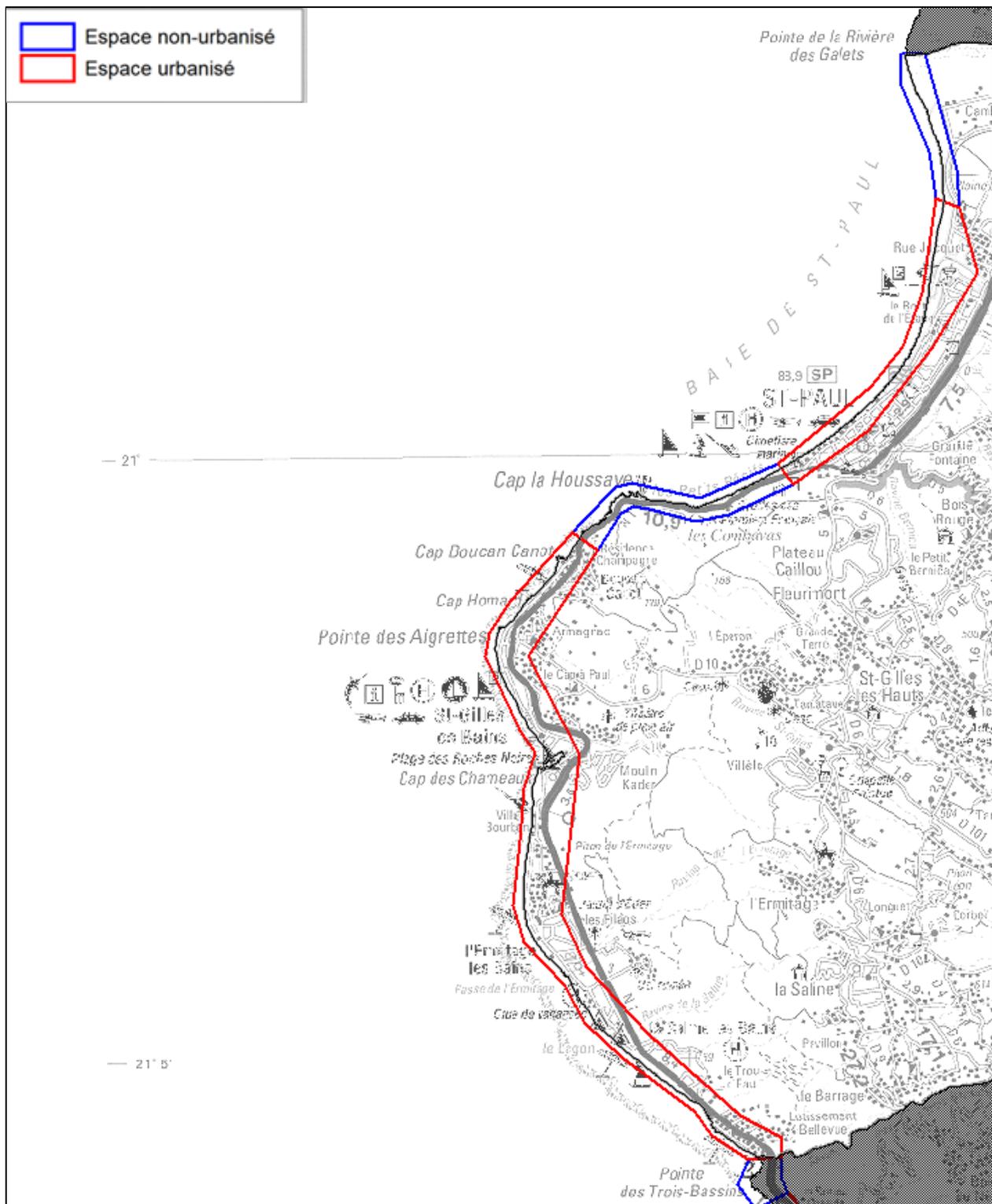


Figure 80 : Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Saint-Paul

7.1.2. La submersion marine

Cas général

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

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

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

- « 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 ;
- 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.
- D'une manière générale la vulnérabilité des espaces urbanisés ne doit pas être augmentée ;
- 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 Saint-Paul, 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.

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 20 : 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 21 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés

Cas particulier relatif à l'espace urbanisé situé au sud de la commune

La traduction réglementaire de l'aléa submersion marine est traitée différemment pour les littoraux situés en arrière du récif sur une zone qui s'étend de cap champagne à la limite sud de la commune (Figure 81).

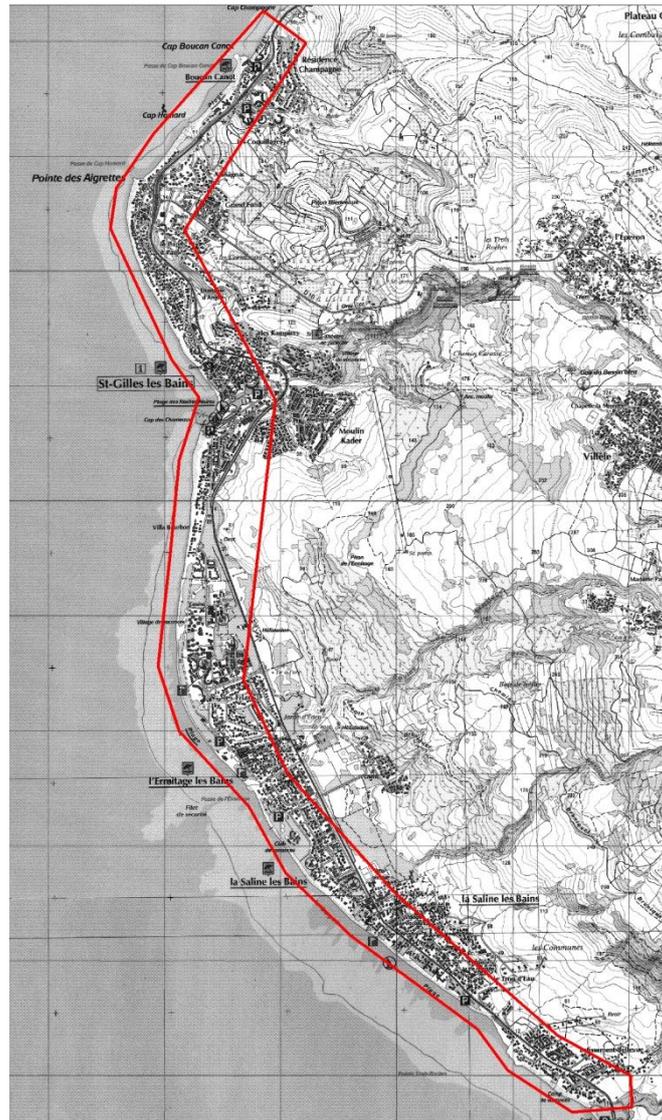


Figure 81 : Localisation de l'espace urbanisé protégé par la barrière récifale (Scan 25 - IGN 2012)

A la différence du cas général, la zone réglementaire bleu s'étend jusqu'à l'aléa modéré dans le cas où il n'est pas concerné par l'aléa fort submersion marine avec prise en compte du changement climatique à échéance 2100 (cf. Courrier de réponse de la DEAL aux remarques de la communes issu de leur courrier du 07 juin 2017 (DEAL/SPRINR/UPRN/2017-300). Cette approche est décrite en Figure 82.

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		Constructible avec prescriptions	Inconstructible
	Fort			Inconstructible

Figure 82 : Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés situés en arrière de la barrière récifale.

7.1.3. 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 réchauffement climatique, il a été décidé au vu des spécificités territoriales réunionnaises et des caractéristiques spatialement limitées de l'aléa sur la commune de Saint Paul, 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.

7.2. TRADUCTION REGLEMENTAIRE DES DEUX ALEAS

Le zonage réglementaire final 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.

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 Saint-Paul, 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 moyennement ou faiblement exposée**, appelée **zone bleue (B)**, concernant les secteurs classés constructibles avec prescription pour l'aléa submersion marine.

Le règlement du PPR littoral de la commune de Saint-Paul 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. L'annexe 6 du présent dossier présente une cartographie réglementaire par prescription.

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

Tableau 22 - 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			
		Nul réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Faible réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Modéré réf.	Fort réf.
RECU DU TRAIT DE COTE	Fort 2100 ou Nul	Bleue	Bleue	Rouge	Rouge
	Fort	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge

Tableau 23 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés

Le sud de la commune présente une traduction réglementaire adaptée au contexte (cf « Cas particulier du paragraphe 7.1.2).

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

Tableau 24 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés situé en arrière du récif frangeant.

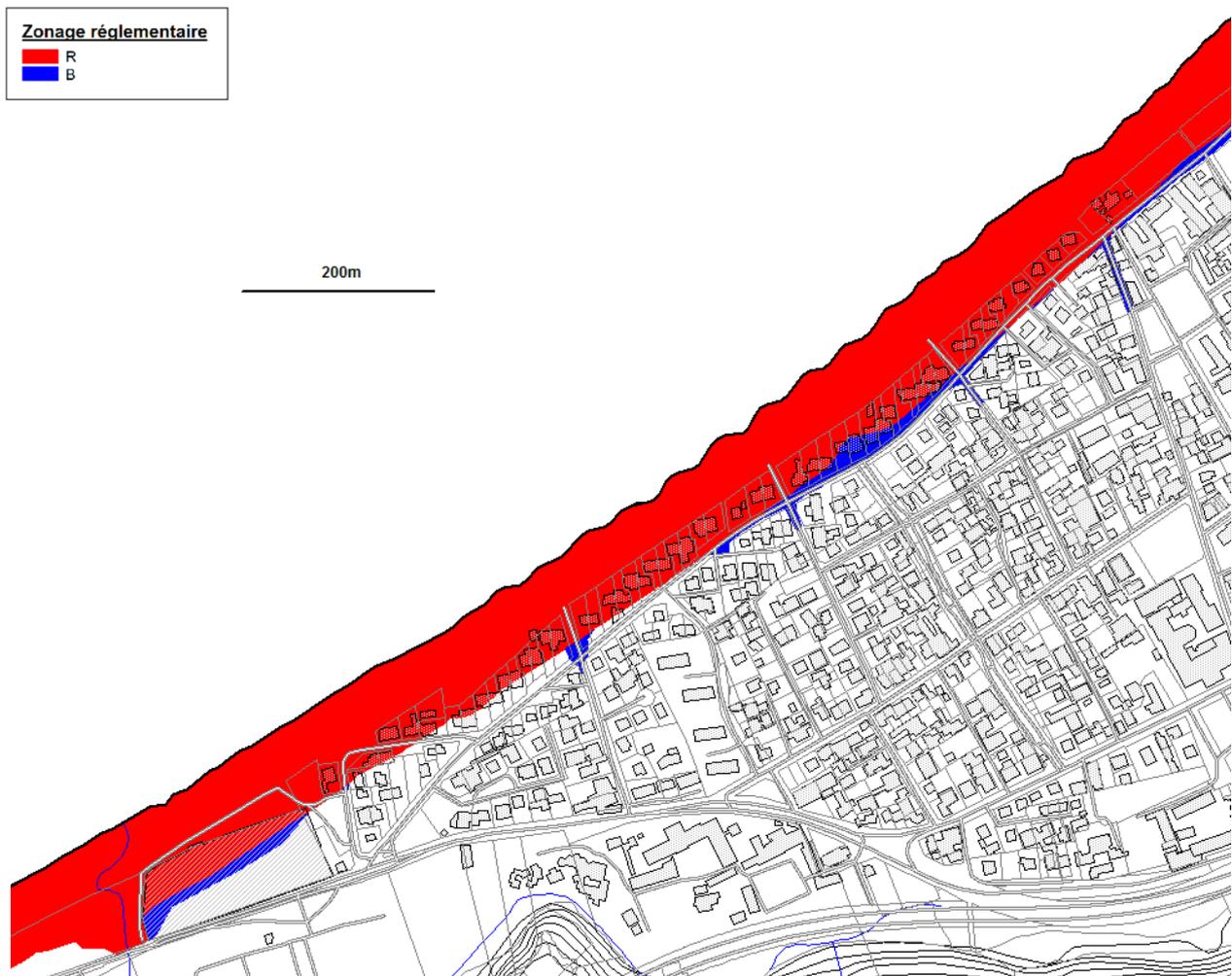


Figure 83 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Saint-Paul

7.3. ZONAGE REGLEMENTAIRE : CAS PARTICULIER CONSERNANT LE REcul DES RESTAURANTS DE L'HERMITAGE

Dans le cadre du projet de recul des établissements existants en bord de plage à l'Hermitage, une zone rouge hachurée spécifique est mis en place sur la zone Ntao du PLU de Saint-Paul. Les dispositions applicables à cette zone sont décrites dans le règlement du présent PPRL.

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	Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie
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.

Principaux textes officiels

8.1. 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 ;

8.2. 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.

8.3. 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 2016

9. Bibliographie

Aubié S., Oliveros C. (1999). – Evolution du trait de côte de 1950 à 1997 de la baie de La Possession à l'embouchure de l'Etang de Saint-Paul, Ile de La Réunion. Rapport BRGM R-40780-99 SGR / OI 34, 9 fig., 1 tab., 11 photographies, 34 p. + 1 ann. h. t. Blangy et al., 2009

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.

Blangy A., De la Torre Y., Vaslet E., collab. Mallet C. et Dewez T. (2009) – Morphodynamique des littoraux de La Réunion – phase 3. Suivi et gestion de l'érosion côtière sur 12 sites identifiés comme sensibles. BRGM/RP-57431-FR, 105 p., 67 ill.

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.

Cazes-Duvat et Paskoff (2004) – Les littoraux des Mascareignes entre nature et aménagement, L'Harmattan, 186 p.

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

Cordier E. (2007) - Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage / La Saline (La Réunion) : processus physiques et flux sédimentaires. Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion. 208 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, 93 p., 59 ill., 6 ann.

De La Torre Y., Balouin Y., collab. Dewez T. (2008) – Morphodynamique des littoraux de La Réunion. Phase 2 : estimation de l'érosion côtière sur les sites identifiés comme sensibles. BRGM/RP-55014-FR, 84 p.

De La Torre Y. ; Bastone V. ; Bodéré G. et Desprez A. (2012) – Morphodynamique des littoraux de La Réunion. Phase 4. BRGM/RP-57431-FR, 103 p., 56 ill.

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.

De La Torre Y., Alami S., Leroy S. et Pedreros R. – Collab. Druon J. (2012) – Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Naturels de la commune de Saint-Paul. Rapport final. BRGM/RP-61189-FR, 73 p et 4 annexes hors-texte.
Deniel C., Kieffer G., Lecointre J. (1992) – Newe 230Th-238U ans 14C Age determinations from piton des Neiges volcano, La Réunion – A revised chronology for the differentiated Series ; Journal of Volcanology and Geothermal Research Volume 51, Issue 3, pages 253 - 267.

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. ;

Garcin M., Nicolae Lerma A., Pedreros R. Paris F. (2012). Evaluation de la submersion marine maximale à l'échelle régionale. Rapport final. BRGM/RP-62259- FR, p.97.

Garry G., Graszak E., Toulemont M, Levoy F. (1997). – *Plans de Prévention des Risques Littoraux. Guide méthodologique.* Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, La Documentation Française, Paris, 54p.

Himmelstoss, E.A. (2009) - "DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide" in : Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. 2009 *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating shoreline change* : U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *updated for version 4.2.

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

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.

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.

Mayoka (1998) – Les cyclones à La Réunion. Météo France. 48m

Météo-France (2007) – Note de synthèse – Evaluation du risque liée à la surcote cyclonique sur les côtes réunionnaises – 8 p.

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.

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., Vinchon C., Lecacheux S., Delvallée E., Balouin Y., Garcin M., Krien Y., Le Cozannet G., Poisson B., Thiebot J., Bonneton P., Marche F. (2011) - Multi models approach to assess coastal exposure to marine inundation within a global change context. Poster presented at the European Geosciences Union 2011 General Assembly. Vienna, Austria, 03–08 April 2011

Raunet M. (1991) – Le milieu physique et les sols de l'île de La Réunion, conséquences pour la mise en valeur agricole.

SHOM (2016) - Références Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. Édition 2011

Sogreah (2007) – PPRI de St Paul – Risques liés aux houles cycloniques et australes – Recensement des dégâts liés aux événements récents – Rapport 4700483 R1 - 27 p.

Soler O. (1997) – Atlas climatique de La Réunion. Météo-France. 79p.

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.

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan (2009) - *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGIS extension for calculating shoreline change* : U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *updated for version 4.2.

Troadec R. (1991) – Courantologie et sédimentologie des de Saint-Paul et de La Possession à l'île de La Réunion. Thèse, université d'Aix-Marseille II et de La Réunion, 217 p.

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.

10. Annexe : Bilan de la concertation



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 de La Réunion

5, rue Ste Anne CS 51016

97404 – Saint-Denis Cedex – France

Tél. : 02 62 21 22 14