



DEPARTEMENT DE LA REUNION
Commune de Saint-Leu

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX

« Submersion marine et recul du trait de côte »

NOTE DE PRESENTATION

Novembre 2019

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.

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 DES PPR.....	17
2.2. PROCEDURE REGLEMENTAIRE.....	18
2.2.1. Secteurs géographiques concernés	18
2.2.2. Démarches menées.....	18
2.3. ASSURANCES ET INFRACTIONS AU PPR.....	21
2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur	21
2.3.2. Infractions au PPR et sanctions	23
2.4. EXPROPRIATION ET MESURE DE SAUVEGARDE.....	24
2.5. RESPONSABILITES.....	24
2.5.1. Etablissement du PPR	24
2.5.2. Autorisation d'occuper le sol	25
3. Présentation de la commune	27
3.1. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE	27
3.1.1. Situation géographique	27
3.1.2. Contexte géologique	28
3.1.3. Contexte géomorphologique littoral.....	33
3.1.4. Contexte climatique	37
3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE.....	43
4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels	47
4.1. PHENOMENES HISTORIQUES	47
4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELS	48
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. Aléa submersion marine	55
5. Caractérisation et cartographie de l'aléa recul du trait de côte	61
5.1. CADRE METHODOLOGIQUE NATIONAL	61
5.2. ESTIMATION DU REcul DU TRAIT DE COTE A 100 ANS	62
5.2.1. Préparation des photographies aériennes anciennes	63
5.2.2. Définition et numérisation des traits de côte	63
5.2.3. Calcul du recul du trait de côte à 100 ans	64
5.3. ZONAGE DE L'ALEA REcul DU TRAIT DE COTE	68
5.3.1. Zonage du recul à échéance 100 ans	68
5.3.2. Limite du recul à échéance 100 ans avec prise en compte du changement climatique	70
5.3.3. Résultats cartographiques	70
6. Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine	73
6.1. CADRE METHODOLOGIQUE NATIONAL	73
6.2. CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSIONS MARINES	75
6.2.1. Méthodologie et scénarios	75
6.2.2. Modélisation des submersions marines de référence	78
6.2.3. Résultat des simulations 1D des houles de référence	85
6.2.4. Données historiques et validation	87
6.3. ZONAGE CARTOGRAPHIQUE DE L'ALEA SUBMERSION MARINE	87
6.3.1. Qualification de l'aléa	87
6.3.2. Traitements et zonages cartographiques	87
6.3.3. Résultats cartographiques	88
7. Elaboration du zonage réglementaire	90
7.1. METHODOLOGIE	90
7.1.1. Les espaces urbanisés et non-urbanisés	90
7.1.2. La submersion marine	92
7.1.3. Le recul du trait de côte	93
7.2. TRADUCTION REGLEMENTAIRE DES DEUX ALEAS	94
8. Lexique des sigles et termes techniques	97
9. Principaux textes officiels	101
9.1. LEGISLATION - REGLEMENTATION	101
9.2. PRINCIPALES CIRCULAIRES	101

9.3. PUBLICATION DE GUIDES.....	102
10. Bibliographie	103

Liste des figures

Figure 1 : Délimitation du territoire communal de Saint-Leu (Fond ©IGN scan100®-2010).....	27
Figure 2 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de la commune de Saint-Leu (source : Billard (1974), fond ©IGN scan100® - 2002).....	29
Figure 3 : Perspective morpho-géologique schématique de La Réunion (Raunet, 1991)	29
Figure 4 : Carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000 (source : ©CIRAD (Raunet, 1991), fond ©IGN scan100® - 2002)	32
Figure 5 : Réseau hydrographique de Saint-Leu (source : BDtopo2012®, fond ©IGN scan100® - 2010).....	33
Figure 6 : Extrait de cartographie des types de systèmes côtiers du nord de la commune de Saint-Leu (Y. De La Torre, 2004)	34
Figure 7 : Extrait de cartographie des types de systèmes côtiers du sud de la commune de Saint-Leu (Y. De La Torre, 2004)	35
Figure 8 : Morphologie diverse des côtes rocheuses dans la région de Saint-Leu (De La Torre, 2004)	36
Figure 9 : Plage corallienne de Saint-Leu (De La Torre, 2004)	36
Figure 10 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)	38
Figure 11 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)	39
Figure 12 : Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France) L'œil est passé à peine à 30 km des côtes, ce qui correspond au rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) a dépassé largement les 200 km/h et les vagues ont atteint les 15 m par endroit.	40
Figure 13 : Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)	41
Figure 14 : Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).....	42
Figure 15 : Extrait de cartographie des enjeux littoraux de Saint-Leu (Annexe 5 du présent PPRL)	45
Figure 16 : Photographie aérienne de 1950 et photographie aérienne de 2013 (remonterletemps.IGN.fr).....	46
Figure 17 : Extrait de l'annexe 3 du présent PPRL "Carte de synthèse des modes de submersion et des données historiques de l'aléa submersion marine ».....	47
Figure 18 : Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012) ..	51
Figure 19 : Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012).....	52
Figure 20 : Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)	53
Figure 21 : Les manifestations de l'érosion sur les côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)	53
Figure 22 : Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)	54

Figure 23 : Plage du cimetière au Sud de Saint-Leu (De La Torre, 2004).....	55
Figure 24 : Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).	56
Figure 25 : Les différents types de submersion marine (Garcin et al, 2012)	57
Figure 26 : Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois et al, 2014)	58
Figure 27 : Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)	58
Figure 28 : Affouillements sous le chemin piétonnier (SOGREAH, 2007)	59
Figure 29 : Cartographie de la topographie du littoral de Saint-Leu (Litto3d, IGN-SHOM – fond : orthophotographie 2012, ©IGN)	60
Figure 30 : Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral de Saint-Leu (© IGN).....	64
Figure 31 : Implantation des profils à Saint-Leu (sur orthophotographie 2008, © IGN)	64
Figure 32 : Méthode de détermination du taux de recul annuel EPR d'après Genz et al. (2007)65	
Figure 33 : Exemple d'artefact (en pointillé noir trait de côte 100Tx en « dent de scie ») généré par les profils niveau de la Ravine du trou sur la commune de Saint-Leu (© IGN) .	65
Figure 34 : Exemple d'erreur de définition et de digitalisation sur la partie sommitale d'une falaise (© IGN).....	66
Figure 35 : Secteur de Cayenne où une partie du trait de côte est artificialisée (encadré rouge : zone artificialisée) (© IGN).....	67
Figure 36 : Exemple d'un extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte71	
Figure 37 : 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, une surface en pointillé rouge représentant le trait de côte à échéance 2100 avec pris en compte du changement climatique	72
Figure 38 : Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine	74
Figure 39 : 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 l'ensemble de La Réunion (segments pour Saint-Leu encadrés en pointillés rouge) – (Lecacheux, 2012).	76
Figure 40 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2014)	77
Figure 41 : Principales étapes nécessaires à la construction du MNE	79
Figure 42 : Niveaux marins retenus pour les simulations de submersion	80
Figure 43 : Localisation du profil de simulation 1D à Saint-Leu (©IGN).....	81
Figure 44 : Houles australes de référence : caractéristiques des vagues au large orthogonales à la côte utilisées en forçage du profil 2 (d'après Lecacheux et al., 2012).....	82
Figure 45 : Aperçu de la propagation des vagues.....	84
Figure 46 : Houles australes : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme pour 30 minutes simulées.....	85
Figure 47 : Extrait cartographique des résultats de modélisation 1D de submersion du scénario de référence (Fond : Ortho photographie @IGN).....	86
Figure 48 : Synthèse des résultats obtenus sur le profil 2 pour chaque scénario.....	86

Figure 49 : Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (MEDDTL, 2012).....	87
Figure 50 : carte de synthèse au 1/10 000 (Annexe 3) 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	89
Figure 51 : Carte de zonage au 1/5000 (Annexe 4) de l'aléa de référence et de l'aléa à échéance 100 ans	89
Figure 52 : Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Saint-Leu....	91
Figure 53 : Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Saint-Leu	96

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evénements historiques majeurs survenus à La Réunion	16
Tableau 2 : Evolution de la population de Saint-Leu (source : ©I.N.S.E.E.).....	43
Tableau 3 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Saint-Leu (source : www.georisques.gouv.fr – Base nationale de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques - GASPARE - mise à jour 18/01/2019)....	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)	54
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)	62
Tableau 7 : Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées.....	63
Tableau 8 : Caractéristiques du recul du trait de côte par cellule hydrosédimentaire	67
Tableau 9 : Valeurs 100Tx ; Lmax et Lr appliquées par secteurs homogènes (NC : Pas de taux calculé).....	69
Tableau 10 : Références altimétriques maritimes pour les sites de Saint-Leu et Saint-Pierre : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et Zéro IGN89 (SHOM, 2011)	80
Tableau 11 : Evénement de référence « Houles Australes Mai 2007 » : comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée du profil de Saint-Leu calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour les 2 scénarios	83
Tableau 12 : Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés	93
Tableau 13 : Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés	93
Tableau 14 : Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces non-urbanisés	95
Tableau 15 : Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces urbanisés.....	95

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-Leu. 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 :

- 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 enjeux de la commune à l'échelle 1/10 000ème (annexe 5) ;
 - une cartographie du zonage réglementaire par prescription de la commune à l'échelle 1/5000ème (annexe 6) ;
- les documents réglementaires :
 - la note de présentation, décrivant le territoire de la commune de Saint-Leu 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 projets PPR sans tarder en s'appuyant sur les connaissances disponibles. En conséquence, la conduite d'un projet 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-Leu, commune peuplée de 31 507 habitants (population recensée par l'INSEE en 2015), 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 présent 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 littoraux.

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 les 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-Leu est concernée par cette politique de prévention car son littoral connaît une évolution économique et démographique importante 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.

Sont donc pris en compte dans la présente élaboration du Plan de Prévention des Risques littoraux de la commune de Saint-Leu les phénomènes de submersion marine et les phénomènes de recul du trait de côte. 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

<p>1875 Salazie, Grand-Sable : 63 personnes ensevelies par un glissement</p>	<p>Février 1998 Tempête Anacelle : 1 mort ; dégâts importants</p>
<p>Février 1932 Cyclone : 90 morts, plus de 41 000 sinistrés, plus de 100 millions de francs de dégâts</p>	<p>Janvier 2002 Cyclone Dina : 2 morts, dégâts très importants</p>
<p>Janvier 1948 Cyclone : 165 morts ; dégâts énormes</p>	<p>Mars 2006 Tempête tropicale modérée Diwa : 4 morts, pluies importantes</p>
<p>Février 1962 Cyclone Jenny : 36 morts ; dégâts importants</p>	<p>Février 2007 Cyclone Gamède : 2 morts, dégâts importants</p>
<p>Janvier 1966 Cyclone Denise : 3 morts ; dégâts importants</p>	<p>Mai 2007 Violente houle australe impactant le littoral Sud-ouest : 2 morts, dégâts importants dans les ports</p>
<p>Janvier 1980 Tempête Hyacinthe : 25 morts ; 1 milliard de francs de dommages</p>	<p>Janvier 2014 Cyclone Béjisa : 1 mort, 16 blessés, dégâts importants dans l'Ouest</p>
<p>Février 1987 Tempête Clotilda : 9 morts ; dégâts très importants (109 millions de francs sur St Denis)</p>	<p>Janvier 2018 Cyclone Berguitta : dégâts importants dans le Sud</p>
<p>Janvier 1989 Cyclone Firinga : 4 morts ; dégâts très importants</p>	<p>Avril 2018 Tempête Fakir : 2 morts, dégâts importants dans l'Est</p>
<p>Janvier 1993 Cyclone Colina : 2 morts ; dégâts importants</p>	

Tableau 1 : Evénements historiques majeurs survenus à La Réunion

2. Présentation du PPR

2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DES 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° 2015-1081 SG/DRCTCV en date du 25 juin 2015. Une prorogation du délai d'approbation de ce PPR a été actée par l'arrêté préfectoral n° 1115/SG/DCL/BU du 22 juin 2018.

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

2.2.2. Démarches menées

Le Plan de Prévention des Risques est élaboré par les services de l'Etat, en l'occurrence pour l'île de La Réunion, par 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 :

- 25 juin 2013 : présentation de la démarche d'élaboration de la cartographie des aléas littoraux ;
- 19 mai 2014 : Porter à Connaissance des cartographies des aléas "recul du trait de côte" et "submersion marine" par M. le préfet à M. le maire de Saint-Leu, pour prise en compte dans la délivrance des actes d'urbanisme (application article R. 111-2 du code de

l'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°2015-1081/SG/DRCTCV prescrivant l'élaboration d'un PPR relatifs aux aléas "submersion marine et recul du trait de côte" sur la commune de Saint-Leu ;
- 22 juin 2018 : Arrêté préfectoral n°1115/SG/DCL/BU prorogeant le délai d'approbation d'un PPR relatif aux aléas "submersion marine et recul du trait de côte" sur la commune de Saint-Leu ;
- 17 décembre 2018 : Présentation de la méthodologie mise en œuvre par le BRGM pour actualiser les cartographies des aléas « recul du trait de côte » et « submersion marine » ;
- 07 février 2019 : Porter à Connaissance des cartographies actualisées des aléas "recul du trait de côte" et "submersion marine" par M. le préfet à M. le maire de Saint-Leu, pour prise en compte dans la délivrance des actes d'urbanisme (application article R. 111-2 du code de l'urbanisme) ;
- 26 avril 2019 : Réunion de présentation du projet de dossier de PPRL avant le lancement de la phase de consultation officielle.
- 06 juin 2019 : Présentation du projet de PPR « recul du trait de côte » et « submersion marine » au conseil municipal de la mairie de Saint-Leu ;
- 20 juin 2019 : Présentation du projet de PPR « recul du trait de côte » et « submersion marine » au conseil communautaire du Territoire de la Côte Ouest (TCO) ;

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

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

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

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

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

Les consultations officielles des différents services (mairie, TCO, ONF, Chambre d'agriculture et DAAF) se sont déroulées du 07 mai 2019 au 07 juillet 2019.

Après cette phase de consultation, le dossier a été 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 consignés ou annexés 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° 2019 - 2622 / SG/DCL/BU du 22 juillet 2019 a prescrit l'ouverture d'une enquête publique au titre du code de l'environnement, sur le territoire de la commune de Saint-Leu concernant le projet de plan de prévention des risques naturels prévisibles relatif aux phénomènes de submersion marine et de recul du trait de côte. Préalablement au lancement de l'enquête publique, une réunion publique d'informations et d'échanges avec le public, organisée par l'État, maître d'ouvrage du projet de PPR, s'est tenue le 20 août 2019, à la salle du conseil municipal de la mairie, en présence du maître d'ouvrage représenté par le DEAL, ainsi que du BRGM. Y ont été conviés les représentants de la mairie et la commissaire-enquêtrice. L'enquête publique s'est déroulée du 22 août 2019 au 23 septembre 2019 inclus (33 jours consécutifs), sous la supervision de Madame Marie-Claude MAYANDY, commissaire-enquêtrice. Les pièces du projet de dossier de PPR ainsi qu'un registre d'enquête ont été mis à disposition du public à la Mairie de Saint-Leu- B.P. 1004 - 97898 SAINT-LEU CEDEX, pendant la durée de l'enquête. La commissaire-enquêtrice a notamment tenu 10 permanences pendant la durée de l'enquête, à la direction aménagement et développement de la mairie de Saint-Leu, afin de recueillir les observations du public.

Toutes les requêtes formulées ont fait l'objet d'une analyse individualisée par le BRGM, partenaire technique de la DEAL pour ce projet de dossier.

Une visite de terrain supplémentaire concernant 8 parcelles a été effectuée le 27 septembre 2019 en présence de la DEAL, du BRGM, de la commissaire-enquêtrice ainsi qu'une partie des pétitionnaires concernés ou de leurs représentants.

La synthèse des réponses formulées pour chacune des requêtes (proposition de classement réglementaire et éléments de justification) est présentée en annexe 7 du dossier de PPRL (Belon R., Moutoussamy L., 2019).

La commissaire-enquêtrice a donné un avis favorable au projet de PPRL « recul du trait de côte et submersion marine » de la commune de Saint-Leu dans son rapport rendu le 15 octobre 2019.

Une copie du rapport de la commissaire enquêtrice est consultable pendant un an à la mairie de Saint-Leu ainsi qu'à la préfecture. Ce rapport est également téléchargeable en version numérique sur le site internet de la Préfecture de La Réunion à la rubrique « Plan de prévention des risques ».

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 (notamment pendant la procédure d'élaboration du PPR) 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-Leu, se situe dans l'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 118,37 km², soit moins de 4,7 % de la surface totale de l'île de la Réunion. Elle compte 31701 habitants recensés en 2015 et une densité de 285 habitants par km².



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

Le territoire de Saint-Leu (Figure 1) s'étend selon un axe Ouest-Est, entre le littoral et le massif du Grand Bénare à l'extrémité orientale, et de la ravine Cocâtre au Nord à la ravine des Avirons au Sud. Le point culminant du territoire communal se situe au niveau du rempart dominant le cirque de Cilaos à 2 787 m d'altitude. Saint-Leu est limitrophe avec les communes de Trois-Bassins sur ses bordures nord, de Cilaos sur la pointe Est et de la commune des Avirons sur sa bordure méridionale.

La commune de Saint-Leu est incluse au sein du Territoire de la Côte Ouest (TCO).

Figure 2 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000 de la commune de Saint-Leu (source : Billard (1974), fond ©IGN scan100® - 2002)

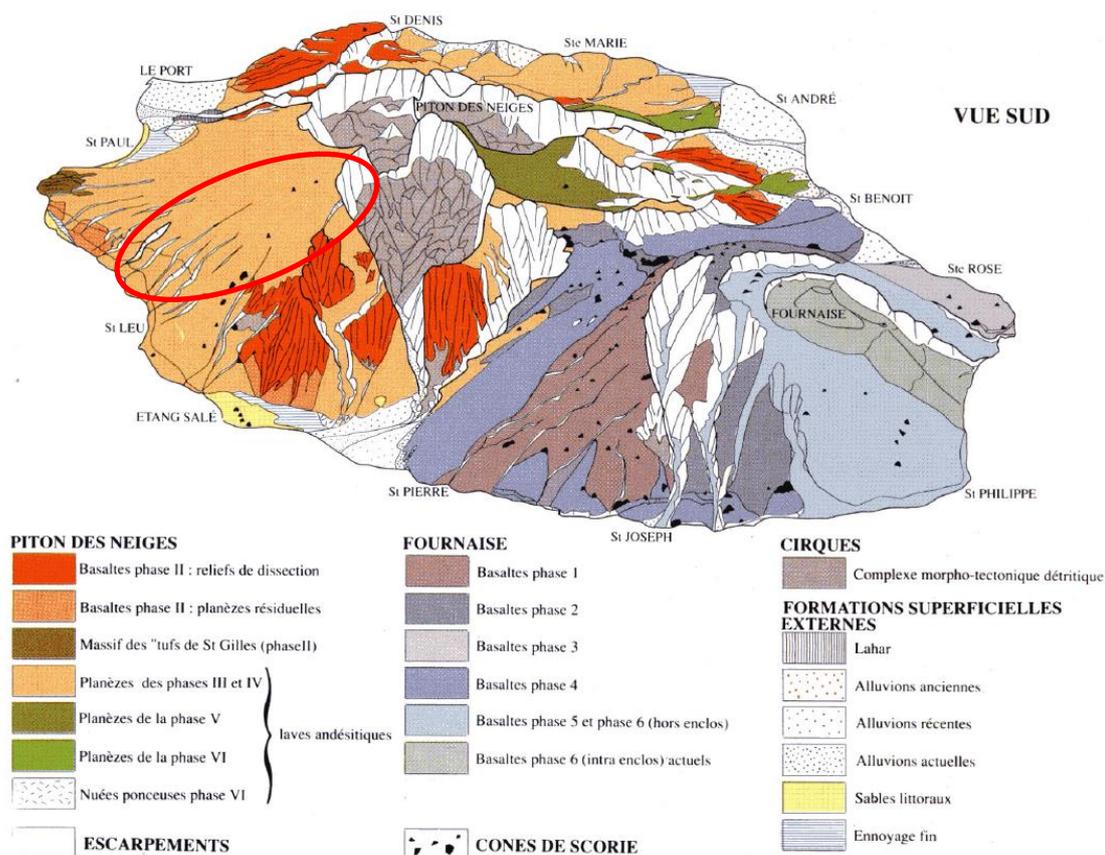


Figure 3 : Perspective morpho-géologique schématique de La Réunion (Raunet, 1991)

Les formations volcaniques

- **Les séries anciennes : Coulées basaltiques à olivine (Bêta1)**

En se référant à la carte géologique à l'échelle du 1/50 000 (Billard, 1974) (Figure 2), au niveau de l'encaissement de la ravine des Avirons 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. 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 (Figure 2 & Figure 3) 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 basaltiques à feldspath et andésiques (Bêta2)***

Les formations plus récentes issues de la phase III et IV (entre 350 000 et 70 000 ans) de l'activité du massif du Piton des Neiges sont les roches prédominantes de la commune de Saint-Leu. 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 décamétrique et de bancs de scories d'épaisseur métrique. Ce faciès est également connu à la Réunion sous le nom de roche pintade. 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 cendreaux. Elles résultent de la phase IV de l'activité du Piton des Neiges.

Les formations tardives : *Tufs en épandage (tf)*

Au niveau de la Ravine des Avironsaffleure des coulées pyroclastiques d'une épaisseur pouvant atteindre quelques décamètres. Ces tufs pyroclastiques sont issus de la phase IV (entre 230 000 et 70 000 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 cendreaux. Des bombes de lave vitreuse sombre se rencontrent parfois au sein de ces terrains.

Les formations superficielles

Sur le territoire de la commune de Saint-Leu, des formations superficielles sont également présentes. Mais la majorité des terrains rencontrés est en place et correspond à des formations altérées du substratum volcanique. On distingue parmi les différentes formations superficielles :

- des alluvions récentes. On les rencontre à l'exutoire des ravines débouchant sur le littoral et notamment à celui de la ravine des Colimaçons, de la Ravine de la Chaloupe ou encore de la ravine Fontaine. Il s'agit d'un mélange hétérogène de sables fins à grossiers, de graviers, de galets et de blocs basaltiques et andésitiques pouvant atteindre le m³. Sur la frange littorale, on distingue les alluvions marines, caractérisées par un remaniement (forme arrondie) important :
- 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.

- des coulées de solifluxion indifférenciées (S). Les terrains comprennent des coulées de solifluxion proprement dites et des coulées de boue formées à froid : elles prennent naissance sur des pentes et dans des rivières à la suite d'effondrement de pans de falaises ou du démantèlement de formation d'éboulis, d'alluvions, de tufs, lors de pluies. On en retrouve principalement à l'exutoire de la Ravine La Fontaine.

Les formations chimiques

- Travertin (U), une dalle calcaire d'épaisseur décimétrique, couvrant environ 1000 m², a été trouvée vers la cote +150 m, à l'ouest de l'Etang Saint-Leu. Il s'agit d'un témoin d'une activité hydrothermale ancienne.

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.

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

- en zone littorale, entre les deux pointes de la commune, une fine couche de sable calcaire blanchâtre;
- des sols bruns ferrugineux caillouteux et des sols bruns peu épais associés à des affleurements blocailleux entre 100 et 400 m d'altitude, et épais sur cendres associés à quelques ressauts rocheux entre 500 et 700m;
- des andosols désaturés ou vitriques, généralement très caillouteux, dont l'épaisseur est relativement faible, entre 700 et 2500 m d'altitude ;
- des pavages de blocailles sur couche litée de cendres et de lapilli, à des altitudes supérieures à 2500m et des cônes volcaniques de phase IV du Piton des Neiges.

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. Les principales ravines et rivière (Figure 5) présentent sur le secteur d'étude sont, du nord au sud :

- la Petite Ravine
- la ravine des Colimaçons ;
- la ravine de la Chaloupe ;
- la ravine de la Fontaine ;
- la ravine du Grand Etang ;
- la ravine du Trou ;
- la ravine des Avirons ;

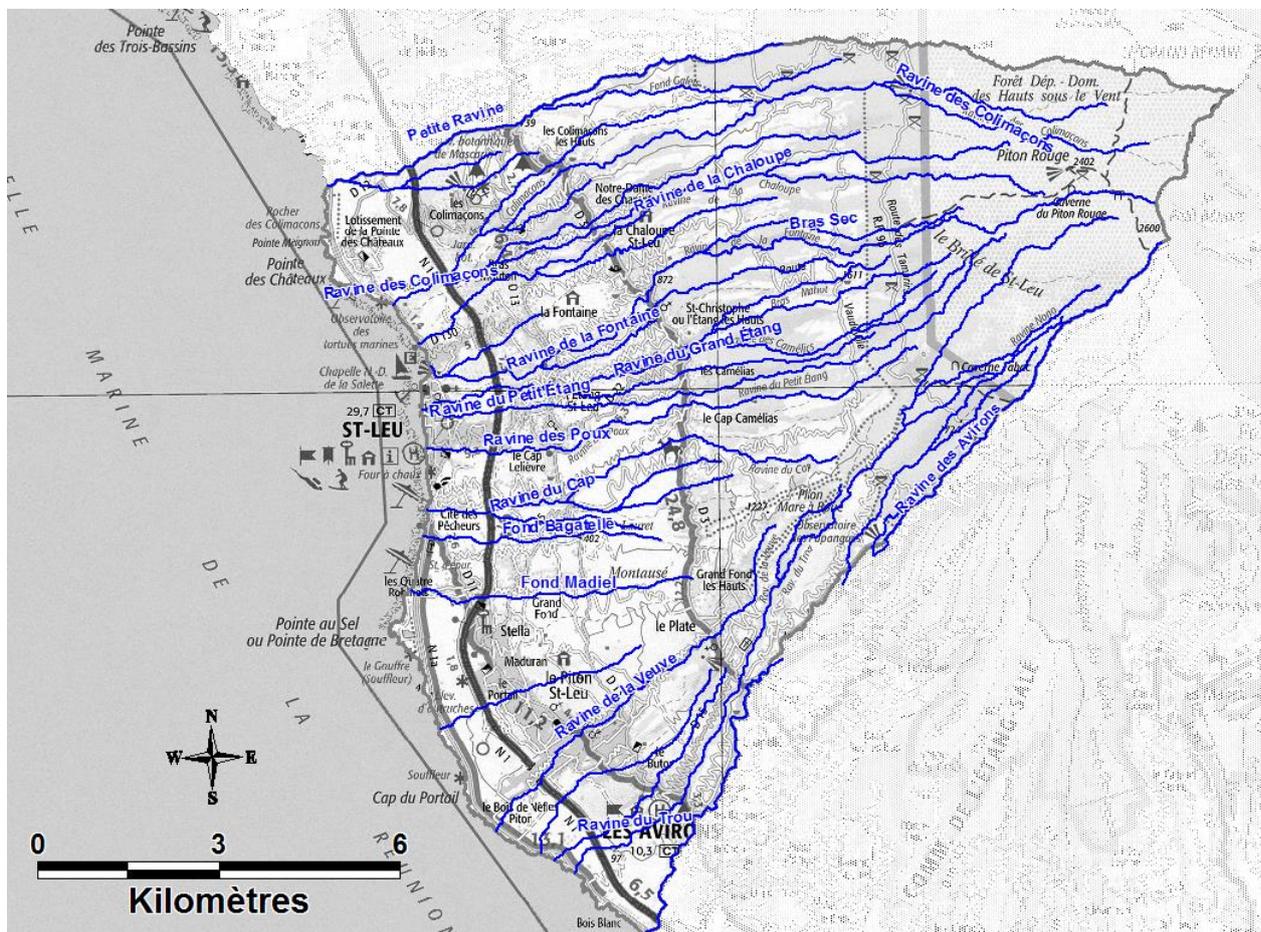


Figure 5 : Réseau hydrographique de Saint-Leu (source : BDtopo2012®, fond ©IGN scan100® - 2010)

Facies littorales et dynamique sédimentaire

L'ensemble des éléments de description des facies littorales et des dynamiques sédimentaires sont décrites dans l'étude de synthèse morpho-dynamique des littoraux de La Réunion du BRGM (Y. De La Tore, 2004). Le littoral de Saint-Leu présente des littoraux de nature morphologique variée (falaise, plages coralliennes et basaltiques, cordons de galets). Les figures Figure 6 & Figure 7 sont des extraits de cartographie des types de systèmes côtiers de la commune de Saint-Leu.

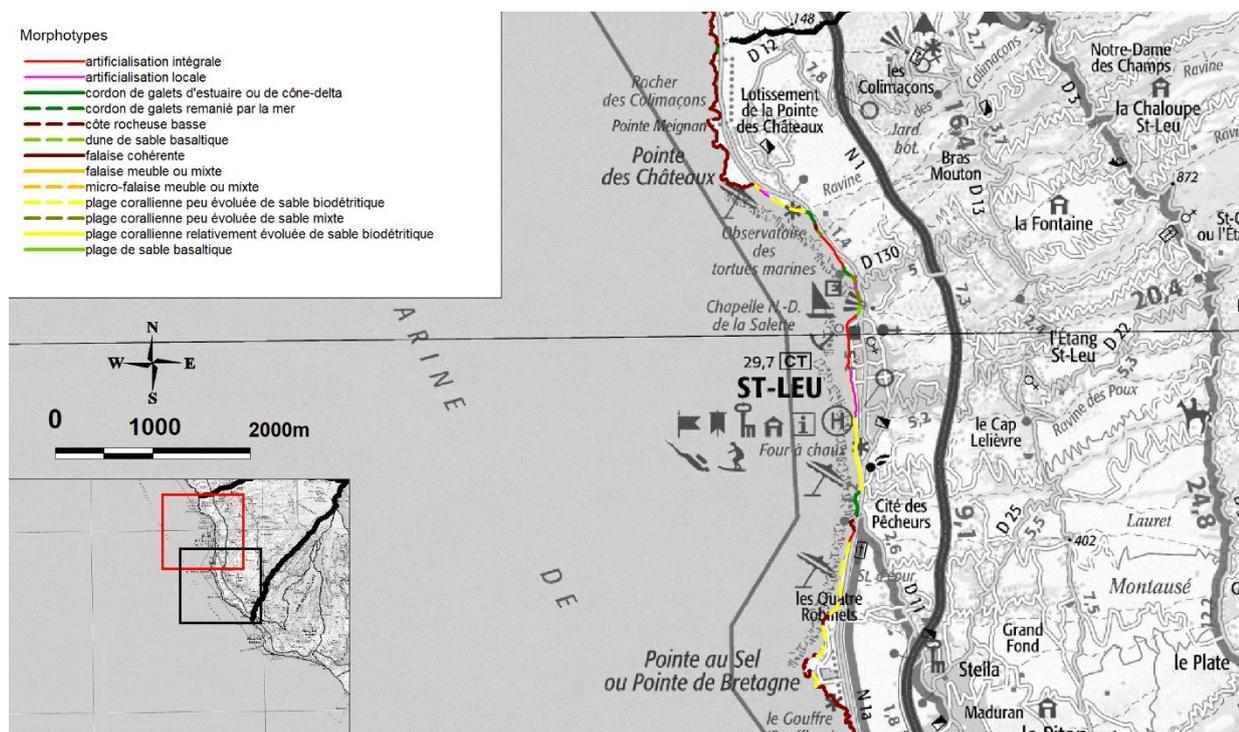


Figure 6 : Extrait de cartographie des types de systèmes côtiers du nord de la commune de Saint-Leu (Y. De La Tore, 2004)

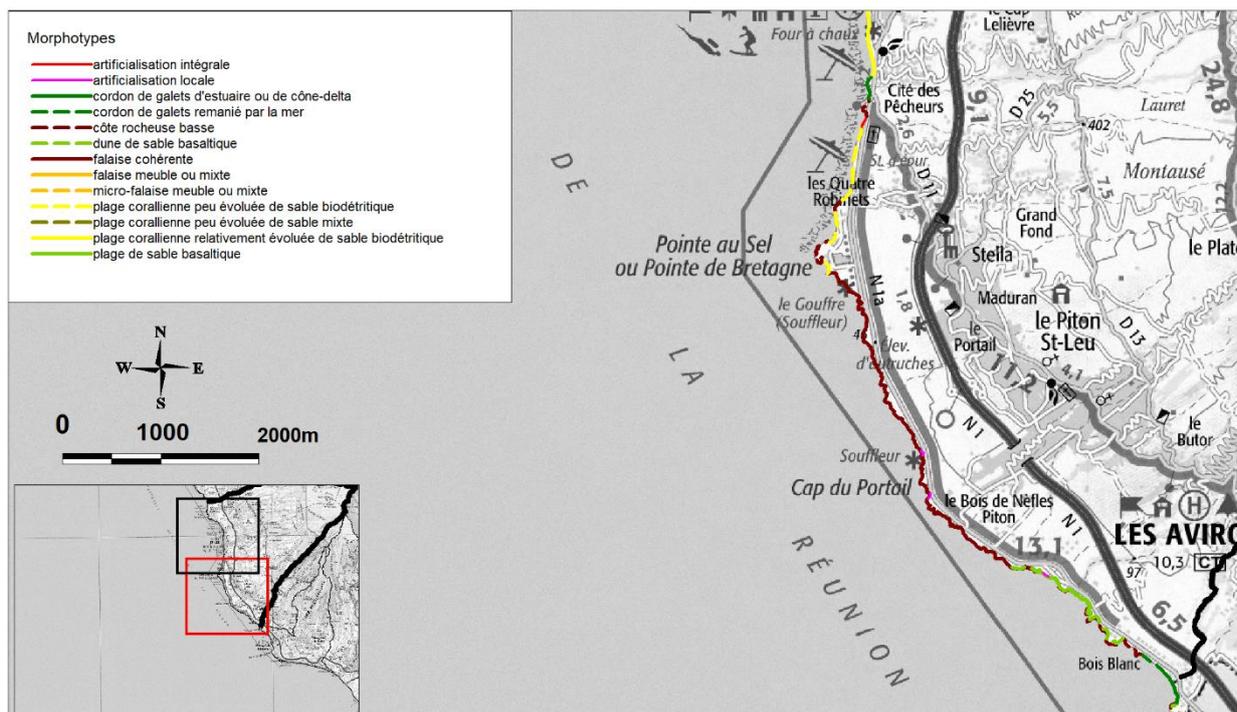


Figure 7 : Extrait de cartographie des types de systèmes côtiers du sud de la commune de Saint-Leu (Y. De La Tore, 2004)

Deux secteurs de falaises encadrent Saint-Leu : au Nord à partir de la Pointe des Châteaux) et au Sud à partir de la Pointe au Sel. Ce sont des falaises basaltiques (coulées de Phase III et IV du Piton des Neiges) de hauteur variable (entre 0 et 20 m). Elles présentent de manière générale un profil sub-vertical sans végétation et une petite plate-forme d'abrasion peu pourvue en matériel détritique (Figure 8A). Certains caps possèdent, au contraire, un profil très doux (anciens deltas de lave) et présentent des placages de sables perchés et des cavités appelés « souffleurs¹ » (Figure 8B).

¹ Les souffleurs sont issus de l'effondrement du toit d'un tunnel de lave.

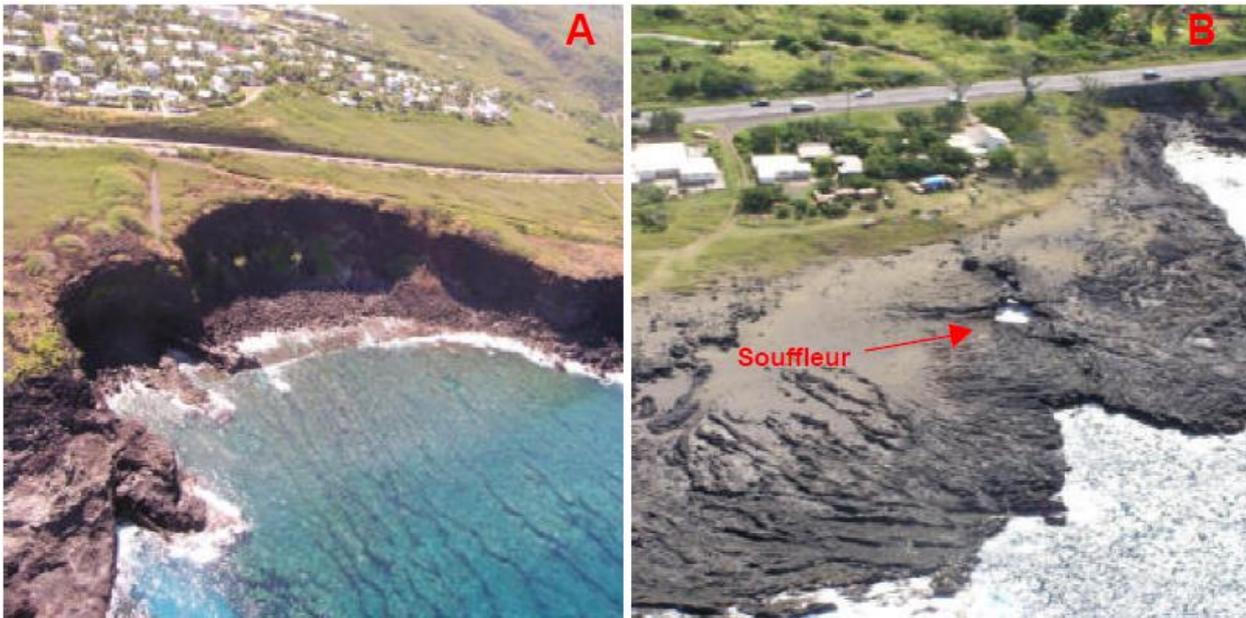


Figure 8 : Morphologie diverse des côtes rocheuses dans la région de Saint-Leu (De La Torre, 2004)

Le secteur de Saint-Leu est bordé de plages coralliennes (Figure 9) surmontées au Sud par une berme végétalisée (végétation rampante ou filaos) et au Nord par des habitations. Seule la partie urbaine de la plage présente une extension sous-marine permettant la baignade. La plage est interrompue dans sa partie Nord par des aménagements (port et promenade) et leurs ouvrages de protection (enrochements).

Les quelques ravines qui débouchent à la mer forment des cordons de galets à leur exutoire et des plages de sable basaltique à mixte (mélange de sable volcanique et bio-détritique) à leur proximité.

Le secteur de Kélonia et celui du centre-ville au sud de la ravine du Grand Etang présentent également des petites plages coralliennes protégées par leurs récifs et longées d'habitations sur l'arrière-plage.



Figure 9 : Plage corallienne de Saint-Leu (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-Leu, située à l'ouest de l'île, est protégée par les hauts reliefs de l'île et se retrouve « sous le vent » de l'alizé. Ce territoire est donc davantage affecté par des brises de pentes nocturnes (vent soufflant de la terre vers la mer) de secteur est et des brises diurnes (vent soufflant de la mer vers la terre) de secteur ouest et sud-ouest.

Pluviométrie

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

Une des conséquences de cette situation est une pluviométrie exceptionnellement intense à La Réunion : l'île détient les records mondiaux de pluviométrie cumulée pour des durées allant de 3 h (500 mm) à 12 jours (6 000 mm).

Située sur la côte « sous le vent », la commune de Saint-Leu affiche des valeurs de pluviométrie bien moindre que les territoires de la côte « au vent ». Les précipitations moyennes annuelles dans le secteur de Saint-Leu ne dépassent pas 2 000 mm en altitude (Atlas climatique de la Réunion, Météo France 2000, cf. Figure 10).

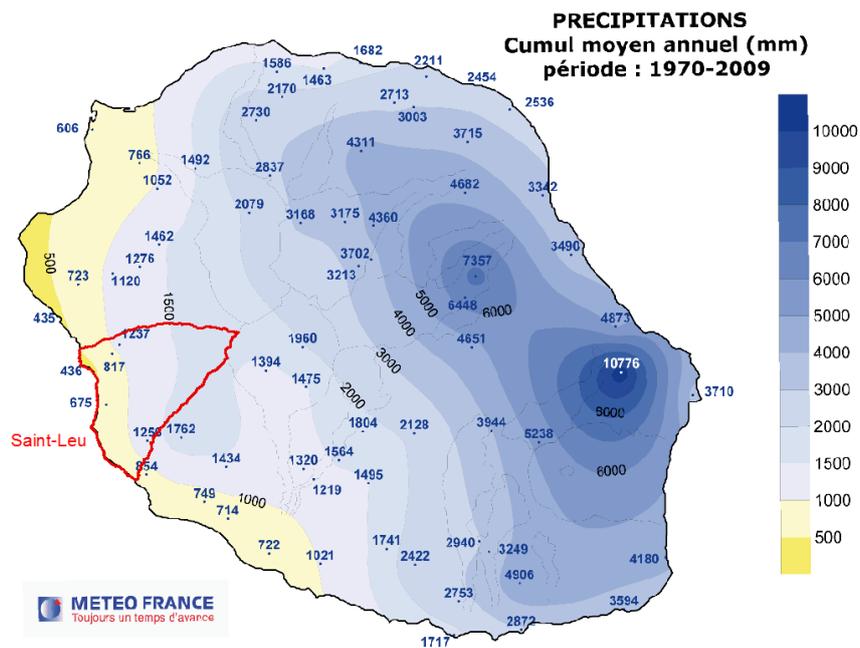


Figure 10 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)

Météo France Réunion a réalisé une carte de zonage pluviométrique en 2010, tenant compte du relief (cf. Figure 11), qui qualifie les secteurs soumis à un régime pluviométrique similaire à proche. La commune de Saint-Leu 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 qui est la plus sèche de l'île toute l'année. D'une part, les précipitations s'y produisent essentiellement en saison des pluies et, d'autre part, sont très tributaires des événements cycloniques qui n'interviennent pas obligatoirement 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.

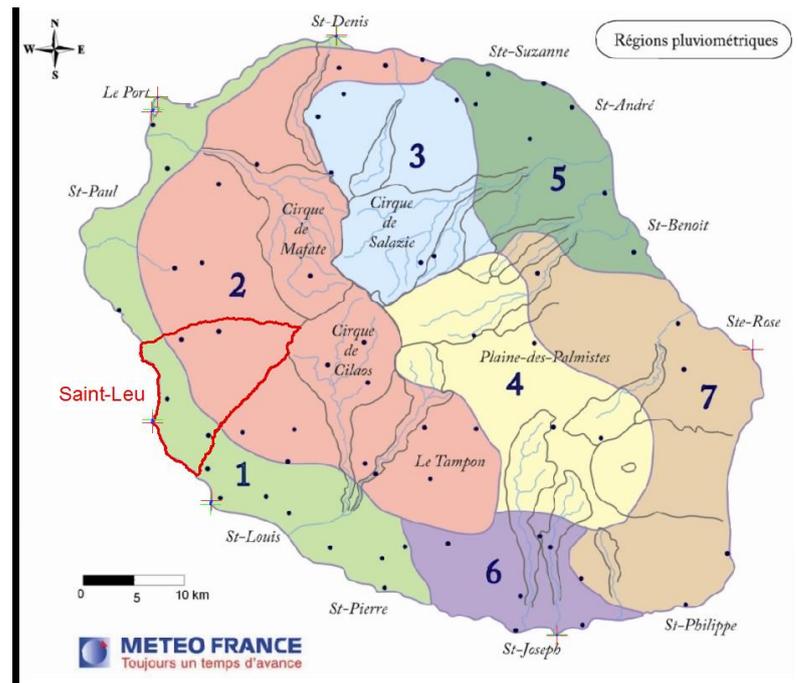
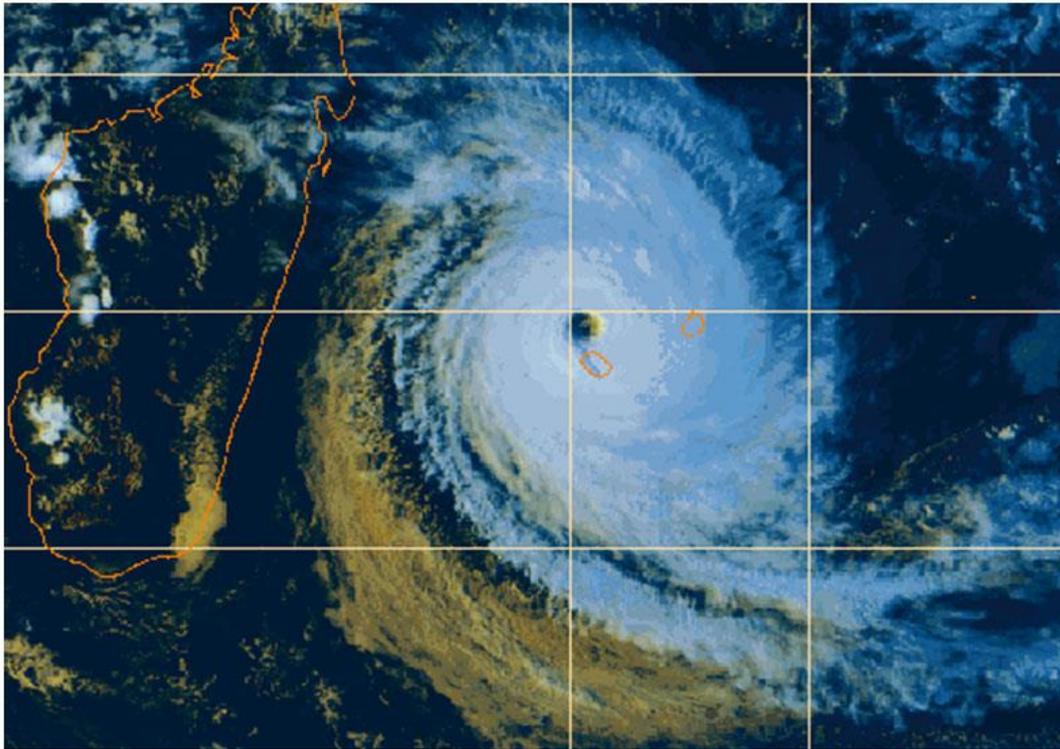


Figure 11 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)

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 12 et Figure 13), soit par l'Est de La Réunion.



*Figure 12 : Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France)
L'œil est passé à peine à 30 km des côtes, ce qui correspond au rayon de vent maximum (Rm).
La vitesse maximale (Vmax) a dépassé largement les 200 km/h et les vagues ont atteint les 15 m
par endroit.*

Lors de la saison cyclonique, l'île vit au rythme des cyclones et des alertes qui lui sont associées. Bien qu'une solide politique 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 (Figure 13). 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.

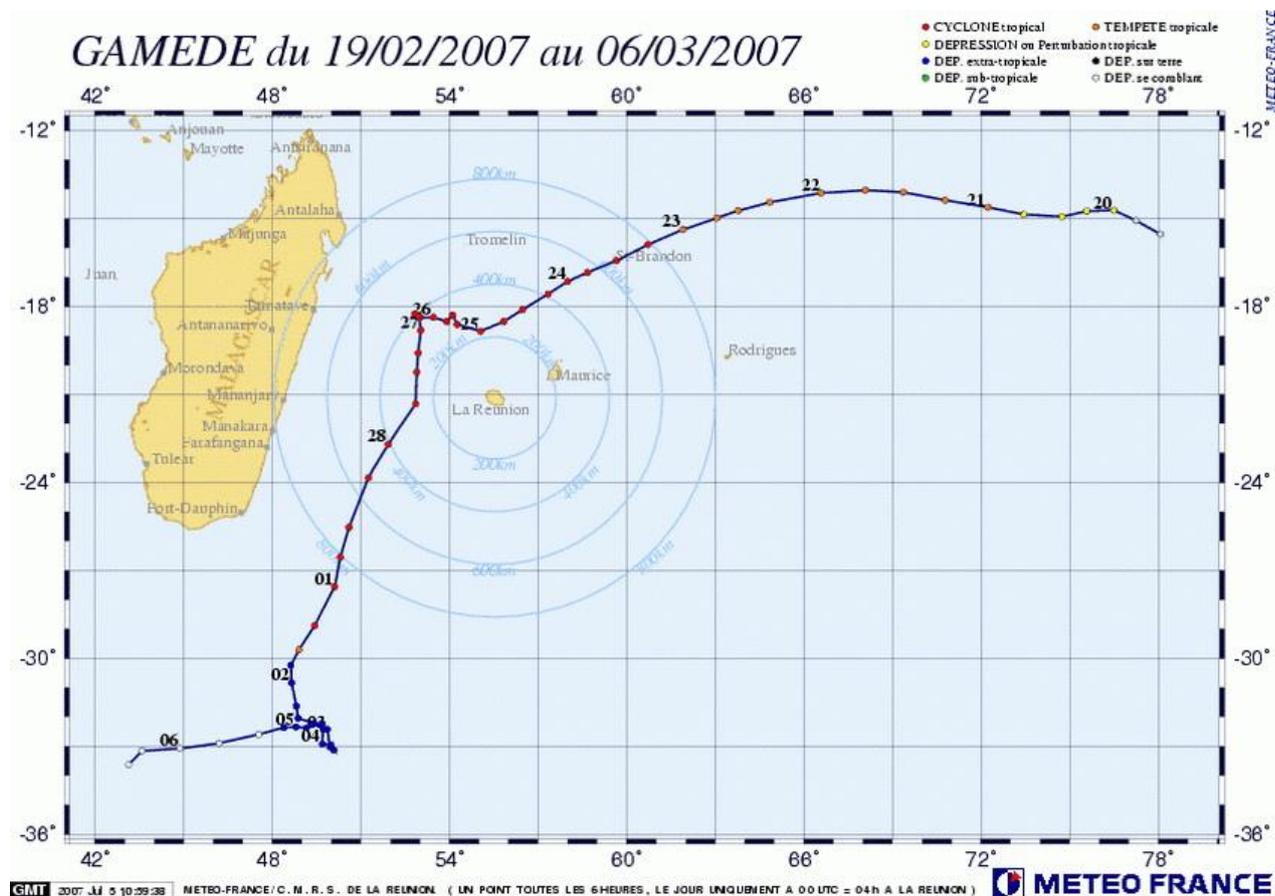


Figure 13 : Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)

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/ou les personnes. Les événements plus récents telles que les tempêtes tropicales de 2018, Berguita et Fakir, montrent bien encore une fois la vulnérabilité du territoire face à ces phénomènes.

Les houles australes

La commune de Saint-Leu 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.

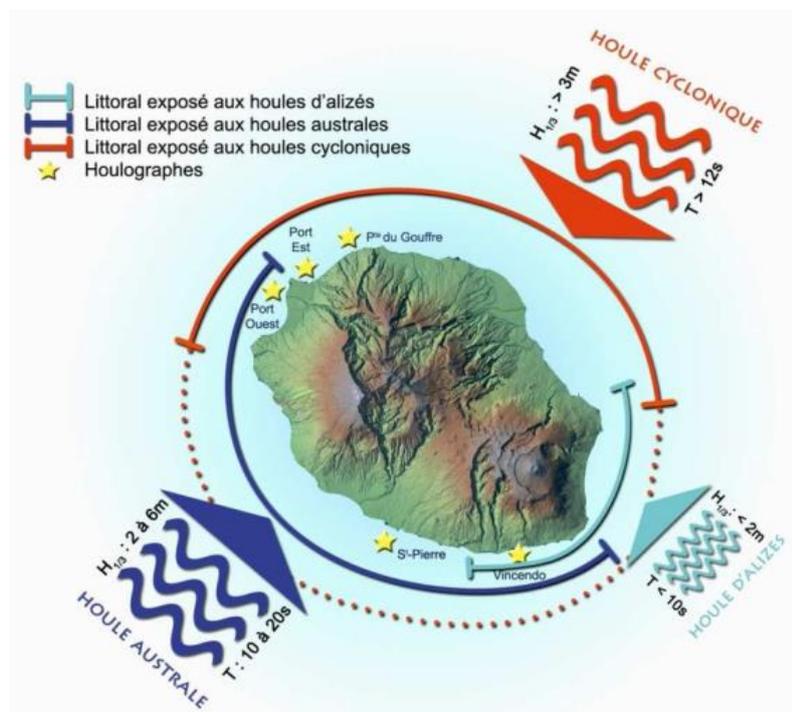


Figure 14 : Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).

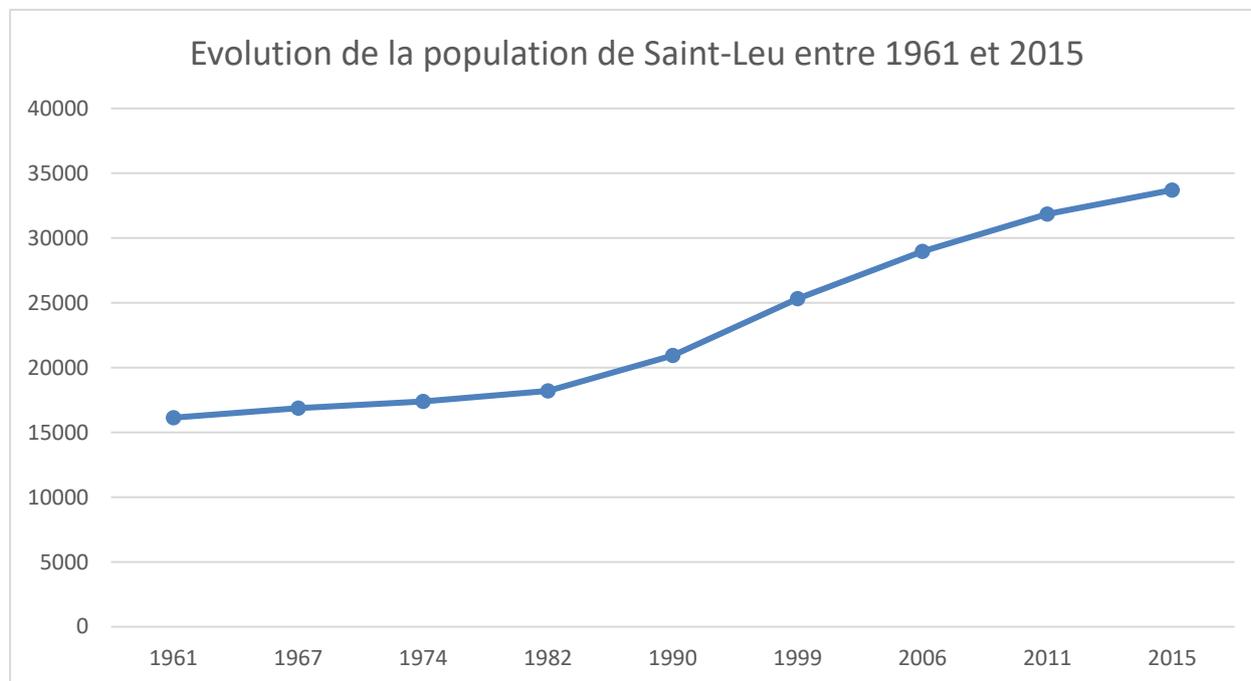
Les houles australes, de périodes relativement longues (périodes comprises entre 10 et 20 secondes), présentent des hauteurs moyennes de l'ordre de 3 à 4 m et affectent principalement les communes du Sud et de l'Ouest de l'île. Elles proviennent de tempêtes formées à 3 000 km au large, dans la zone tempérée de l'hémisphère Sud (plus précisément entre les 40° et 50° parallèles) et atteignent les rivages réunionnais 15 à 25 jours par an. Par leur énergie, ces houles sont particulièrement érosives et peuvent également être à l'origine d'importantes submersions (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Les réunionnais gardent en mémoire les houles australes du 12 mai 2007, atteignant une valeur maximale de 11,3 mètres (6,4 m de hauteur significative²) à 19h selon les données du houlographe de Saint Pierre.

De par leur exposition à ouest, les littoraux de Saint-Leu sont soumis aux houles australes et aux houles cycloniques qui parviennent jusqu'à La Réunion (Figure 14).

² 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 16137 personnes en 1961, la population de Saint-Leu a connu depuis une régulière augmentation, s'établissant selon l'estimation de l'I.N.S.E.E. à environ 33701 habitants en 2015 (la population a augmenté de 8,9% par rapport à 2010 contre 2,44% au niveau national).



	1961	1967	1974	1982	1990	1999	2006	2011	2015
Population	16137	16870	17396	18207	20931	25314	28969	31837	33701

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

La densité de population de la commune est de 285 hab. /km² contre 339 hab. /km² sur l'ensemble de l'île (101 hab. / km² au niveau national).

La commune de Saint-Leu se divise en plusieurs secteurs qui semblent s'organiser de façon rectiligne en fonction des routes majeures:

- Le secteur urbain majeur se développant en bordure de la R.N. 1, le long du littoral, le centre-ville de Saint-Leu ainsi que la zone urbanisée à l'Ouest du Piton Saint-Leu ;
- Les écarts habités, plus ou moins urbanisés autour de la RD3, correspondant en particulier (liste non exhaustive) :
 - au secteur des Colimaçons;
 - au secteur de la Chaloupe Saint-Leu ;
 - au secteur de l'Etang Saint-Leu ;
 - au secteur du Plate.

Le parc de logement s'établissait en 2009 à 11885 unités (constitué à 88.5% de résidences principales), soit une augmentation de 43 % depuis le recensement de 1999, illustrant une forte pression foncière existant sur la commune de Saint-Leu.

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

- Les services de sécurité et de secours (gendarmerie, caserne de pompiers, cliniques et hôpitaux) ;
- Les espaces communaux, les Z.A.C., les zones d'insalubrité (R.H.I.) ;
- Les voies de circulation (R.N.1, D.9, D.14, D.6, D.3., D.13) ;
- 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.

L'occupation du sol est caractérisée par une importante activité agricole qui représente un enjeu économique majeur. Le milieu physique naturel qui couvre le reste du territoire communal représente un enjeu environnemental et est notamment caractérisé dans les Hauts de la commune par le Parc National de la Réunion.

Les principaux enjeux sont reportés sur la carte présentée en annexe 5 de ce dossier (Figure 15).

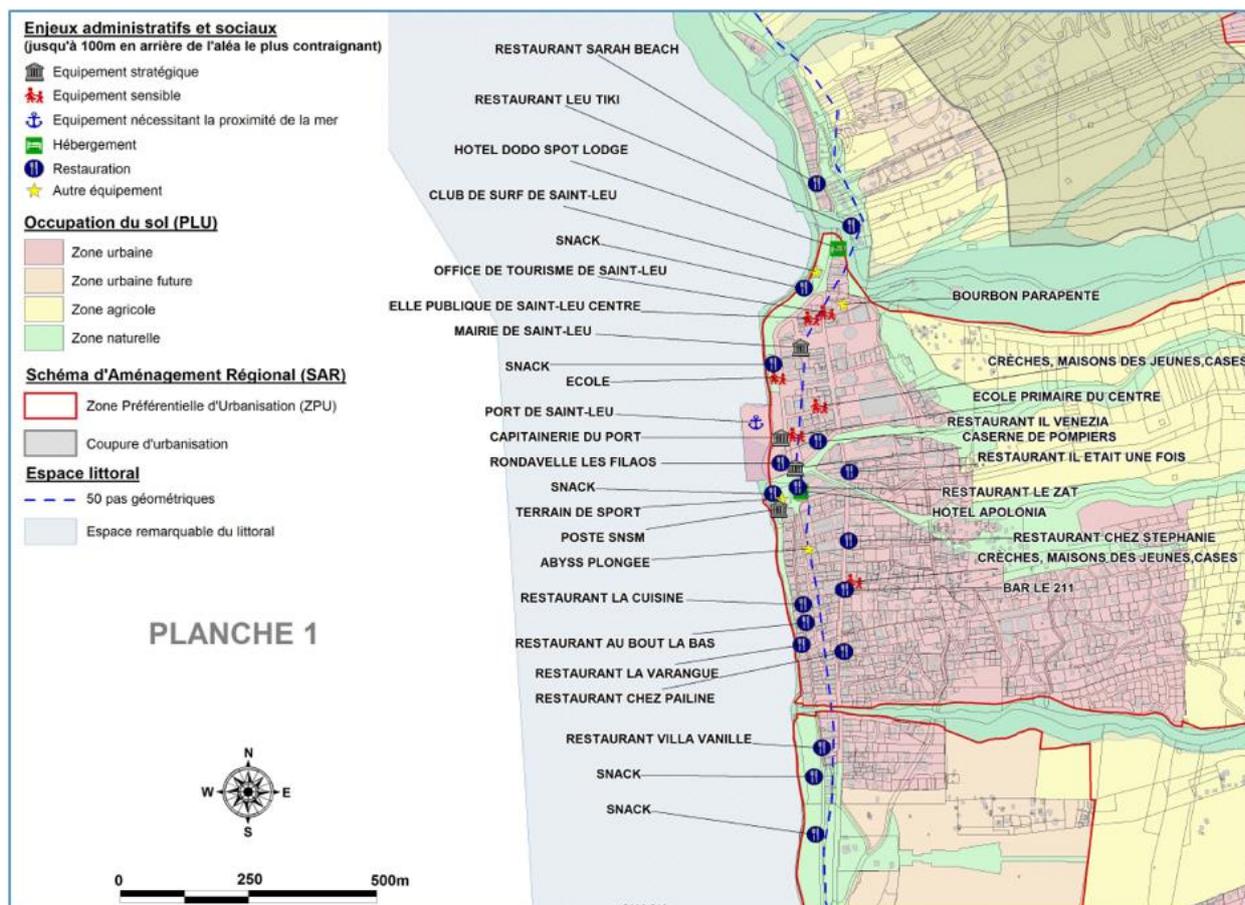


Figure 15 : Extrait de cartographie des enjeux littoraux de Saint-Leu (Annexe 5 du présent PPRL)

La figure suivante (Figure 16) présente deux photographies aériennes qui comparent le centre-ville de Saint-Leu entre 1950 et 2013. Cette figure illustre bien l'évolution de l'urbanisation au cours de ces dernières décennies augmentant ainsi la vulnérabilité du territoire face des phénomènes extrêmes tels que les épisodes cycloniques.



*Figure 16 : Photographie aérienne de 1950 et photographie aérienne de 2013
(remonterletemps.IGN.fr)*

4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels

4.1. PHENOMENES HISTORIQUES

Les données historiques sont disponibles sur la commune de Saint-Leu, en particulier le recensement détaillé (typologie) et géolocalisé (couches SIG) des dégâts liés aux houles australes de 2007 (Sogreah, 2007). Ces informations sont reportées sur la cartographie présentée en annexe 3 du présent PPRL (Figure 17).

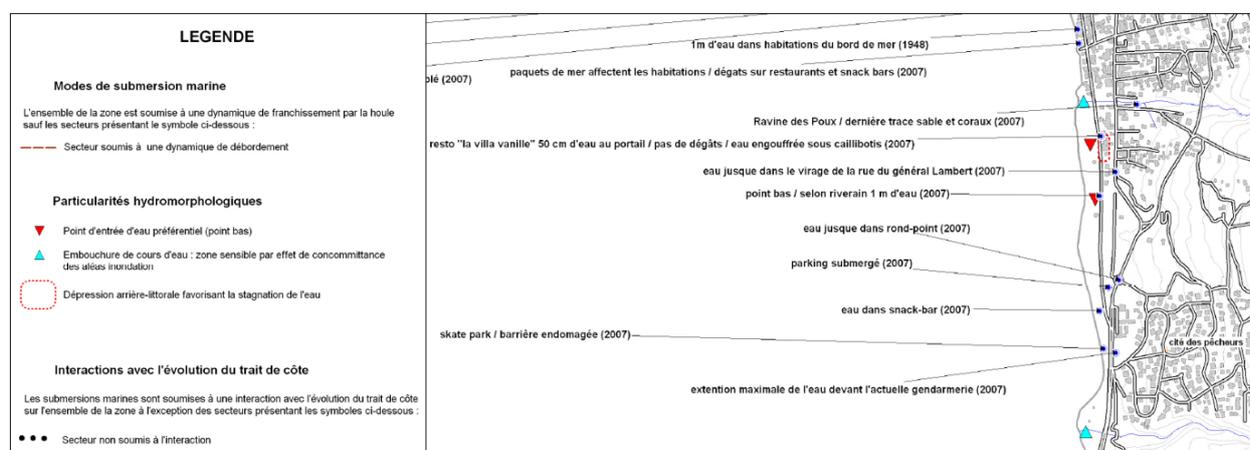


Figure 17 : Extrait de l'annexe 3 du présent PPRL "Carte de synthèse des modes de submersion et des données historiques de l'aléa submersion marine".

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-Leu dans la tourmente », de témoignages et des articles de journaux. La liste des événements marquant est présentée dans l'encart suivant.

« Dans l'arrondissement Sous le Vent, les seuls renseignements que nous possédions concernant Saint-Leu qui, une fois de plus, aurait été inondée : 0m80 dans la ville », Le Progrès, 1^{er} mars 1955

« Saint-Leu en partie inondé », Le Progrès, 19 mars 1952

« A Saint-Leu et à Saint-Paul, il y a eu, dit-on, 1m50 d'eau dans les rues », Le Peuple, 9 mars 1931

« La voie ferrée a été endommagée du côté de Saint-Leu et de Saint-Louis (remblais emportés sur une épaisseur de 50cm », Le Peuple, 3 mars 1927

« Ce qui est bien plus grave, c'est la submersion périodique des régions littorales de Saint-Paul à Saint-Leu (...). Les premières sont victimes et des torrents gonflés et furieux et de la mer (...). Et nous ne voyons aucune décision hardie qui mette fin à cette situation quasi-permanente. Paillotes et mesures des bourgs placés au-dessous du niveau des eaux de la mer, des étangs et des torrents, sont de dangereuses laideurs dont l'inactivité croissante de ces villes n'expliquent pas l'existence », Le Peuple, 16 mars 1928

« On enregistre des dégâts importants sur la voie ferrée entre Saint-Leu et l'Etang. Les remblais sur un assez long parcours ont été détruits. A Saint-Leu, le cyclone a revêtu le caractère d'une véritable trombe. On n'a pas beaucoup souffert du vent. L'eau par contre a occasionné des dégâts à certaines cultures et a dégradé les routes ainsi que la voie ferrée (...). De l'autre côté du ravin, c'est le sable qui a été porté par la mer sur la voie l'encombrant complètement. Les rails sont enfouis dans le sable », Le Peuple, 15 mai 1919

« Les panneaux de signalisation portant la mention « raz de marée » que l'on trouve au bord de la RN1 dans la traversée de l'Etang-Salé-les-Bains, personne n'y croit. A moins d'appartenir depuis assez longtemps à la communauté du « village », partie littorale de la commune, on les considérerait presque comme « comiques ». Mais depuis hier, plus d'un automobiliste de passage aura changé d'avis ! C'est en effet une véritable montée à l'assaut d'un océan déchaîné auquel on a assisté en ces lieux. Pour la rigueur, on peut lui ajouter un « mini », mais c'est bien d'un raz de marée qu'il était question, ici comme à Saint-Leu. La forte houle qui sévissait la veille – comme en d'autres régions du département – a en effet engendré un véritable débordement. Les effets s'en sont fait sentir dès les premières heures de la matinée, noyant maints jardins, provoquant l'alerte aux serpillères et plus tard, vers 9h1 faisant battre un drôle de ressac sur l'asphalte de la chaussée. Là s'est arrêté le dommage pour les particuliers, là s'arrêtait le pittoresque pour les chasseurs d'images. Beaucoup moins anodin pour les pêcheurs, le phénomène a été ressenti par cette catégorie en termes de pertes assez lourdes. « Brossées » par l'océan, les barques ont payé leur tribut. Certaines ont coulé, d'autres ont été fortement endommagées », Le Quotidien de la Réunion, 9 octobre 1981

4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELS

Depuis 1993, 14 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur la commune de Saint-Leu. 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	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
Mouvements de terrain	22/01/2002	24/01/2002	05/02/2002	08/02/2002
Inondations et coulées de boue	11/02/2005	11/02/2005	02/08/2005	10/08/2005
Inondations et coulées de boue	10/04/2005	10/04/2005	16/12/2005	30/12/2005
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	24/02/2007	27/02/2007	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 coulées de boue	30/01/2011	30/01/2011	30/03/2011	06/04/2011
Inondations et coulées de boue	05/02/2012	05/02/2012	11/07/2012	17/07/2012
Inondations et coulées de boue	01/01/2014	03/01/2014	17/01/2014	18/01/2014
Inondations et coulées de boue	17/01/2018	18/01/2018	31/01/2018	01/02/2018
Mouvements de terrain	18/01/2018	18/01/2018	31/01/2018	01/02/2018
Inondations et coulées de boue	23/04/2018	24/04/2018	23/05/2018	22/06/2018

Tableau 3 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Saint-Leu (source : www.georisques.gouv.fr – Base nationale de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques - GASPARE - mise à jour 18/01/2019)

Les ouvrages généraux de Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998), indiquent les cyclones majeurs ayant concernés La Réunion, et plus ou moins directement Saint-Leu, 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

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 PPRL³, 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.

A La Réunion, il faut également compter sur les apports biodétritiques liés à la présence de récifs coralliens frangeants (Figure 18).

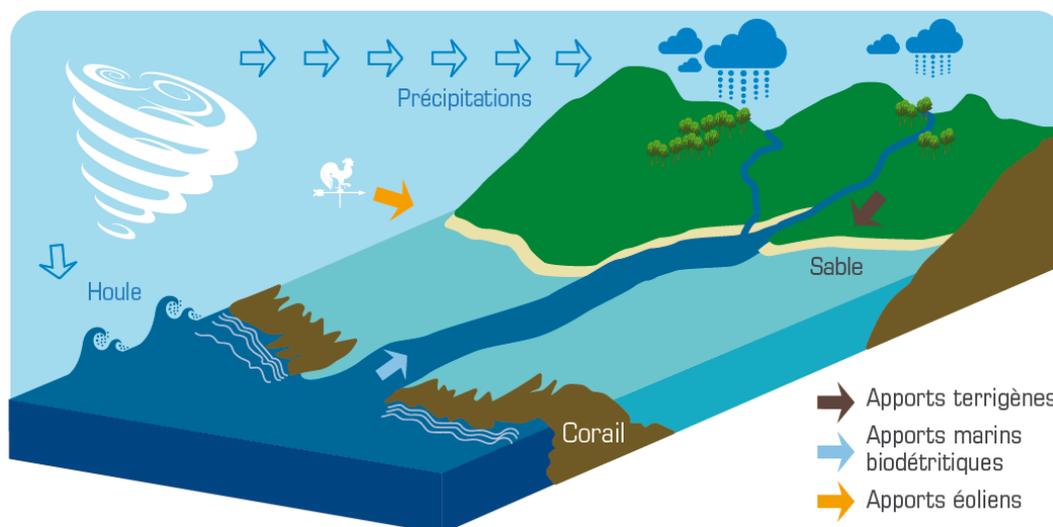


Figure 18 : Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

³ Guide méthodologique : Plan de Prévention des Risques littoraux, DGPR, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Mai 2014.

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 (Figure 19). 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 19 : 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 (Figure 20). Le phénomène érosif d'une plage peut être plus ou moins important en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur significative, longueur d'onde⁴, 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).

⁴ Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs

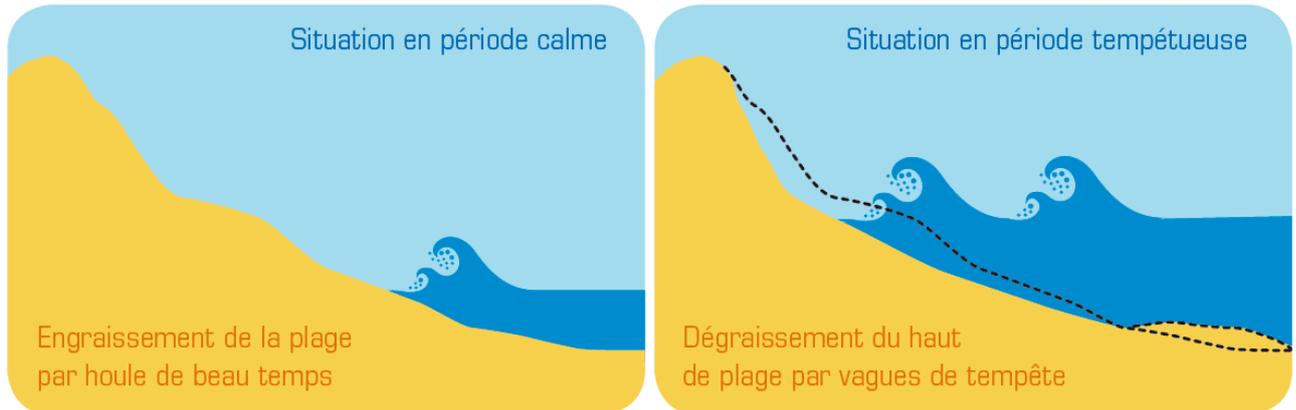


Figure 20 : Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)

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 21) :

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



Figure 21 : 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 22) :

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

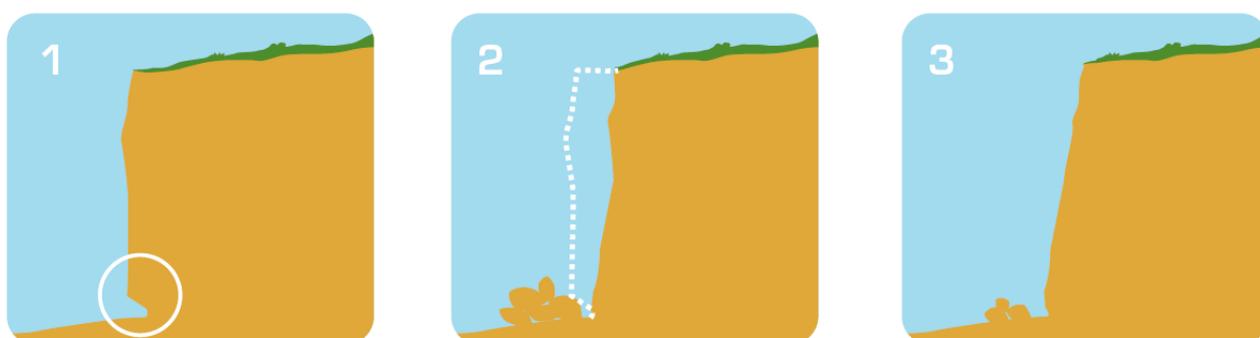


Figure 22 : Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)

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 la commune de Saint-Leu

La commune de Saint-Leu 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.

A titre d'exemple le secteur faisant face au cimetière de Saint-Leu où la position du beachrock et les traces d'érosion de la berme de haut de plage (micro-falaise, recul de la végétation) marquent une tendance à l'érosion (Figure 23).

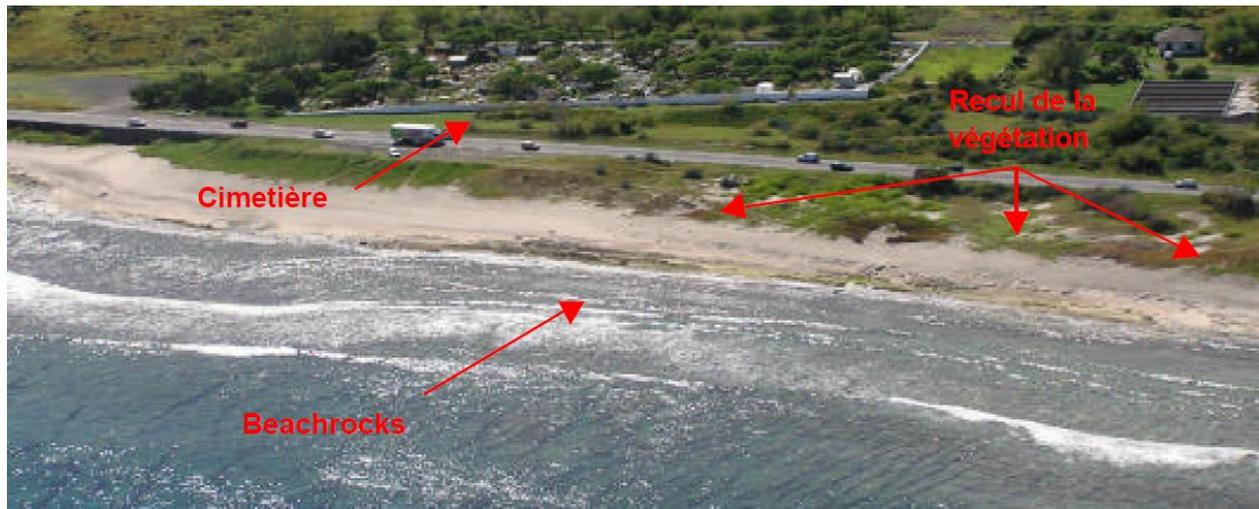


Figure 23 : Plage du cimetière au Sud de Saint-Leu (De La Torre, 2004)

Une faible portion de côte (environ 350 m) connaît également une érosion modérée vers le spot des surfeurs en raison des mur d'habitations construits sur la plage et des affouillements qu'ils provoquent lorsque la mer atteint leur pied.

4.3.3. Aléa 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 24) 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.

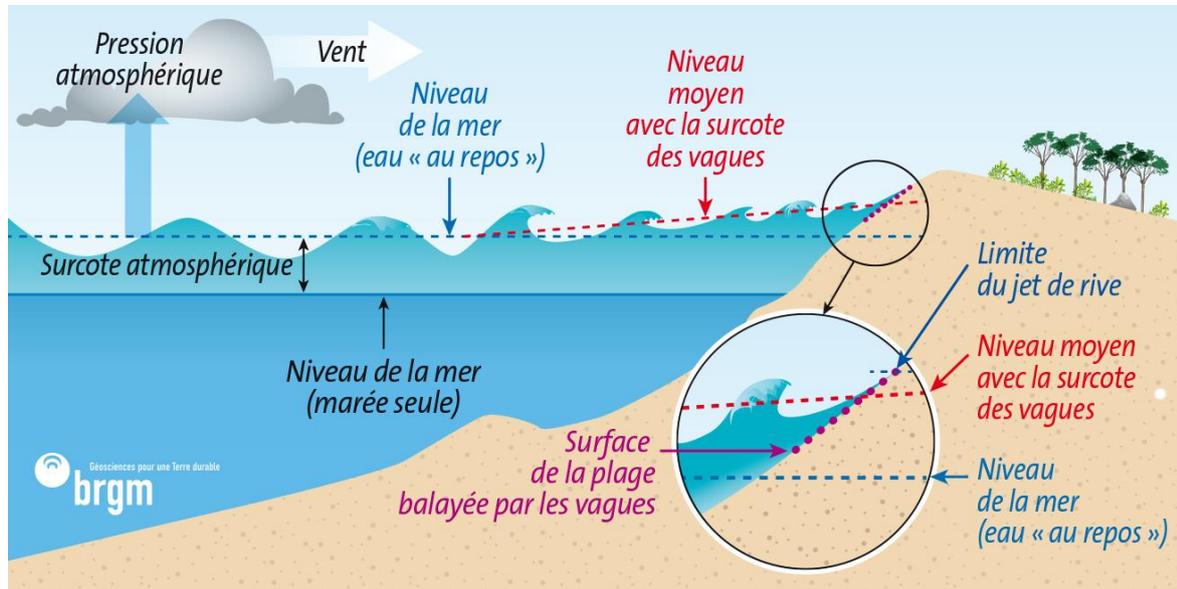


Figure 24 : Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).

On distingue traditionnellement plusieurs types de submersions marines (cf. Figure 25) :

- ✓ 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).

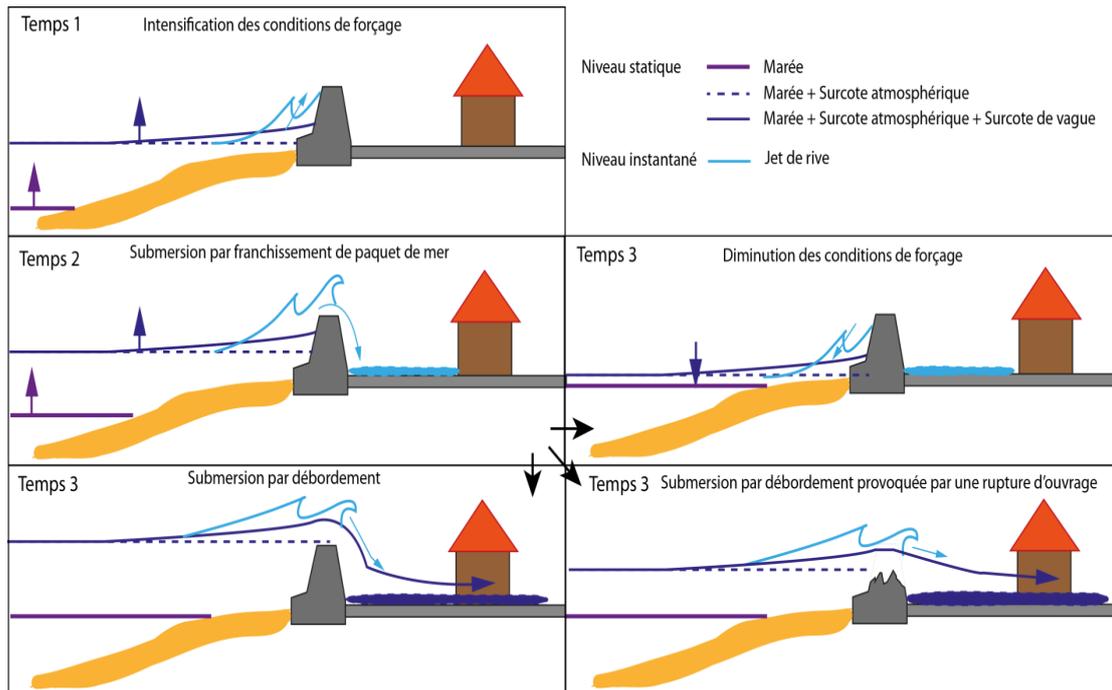


Figure 25 : Les différents types de submersion marine (Garcin et al, 2012)

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 50 cm. 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 50 cm), 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 26).

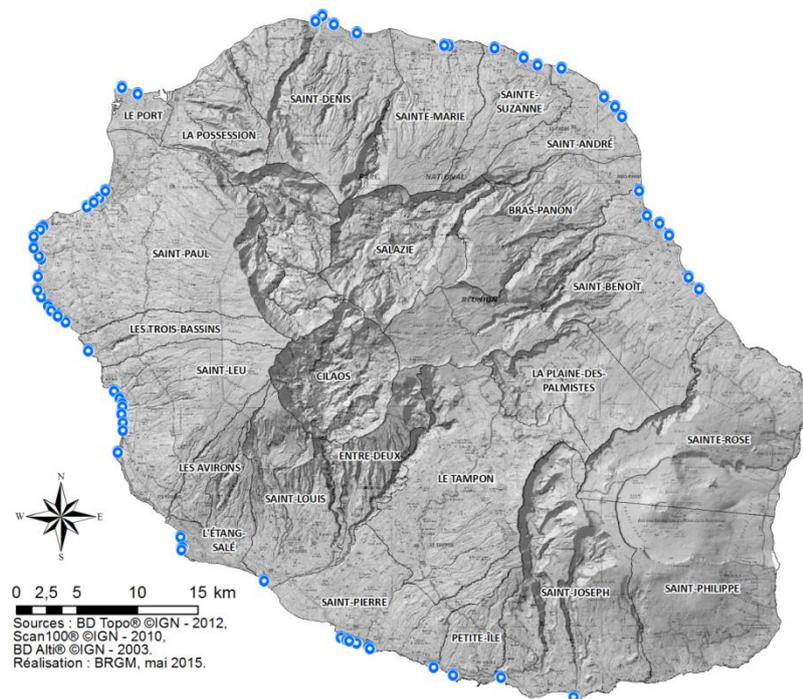


Figure 26 : Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois et al, 2014)



Figure 27 : 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 (exemple Figure 27). 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 (Figure 28). 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-Leu

Le littoral de Saint-Leu 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). Le présent PPRL se base en partie sur les évènements historiques recensés par SOGREAH dans son rapport concernant les dégâts liés aux houles australes de 2007 (SOGREAH, 2007). L'illustration suivante présente l'affouillement sous le chemin piétonnier.



Figure 28 : Affouillements sous le chemin piétonnier (SOGREAH, 2007)

L'analyse du modèle numérique de terrain (SHOM-IGN, 2012) communal réalisé à partir des données lidar⁵, montre que plusieurs secteurs présentent une importante vulnérabilité à la submersion en raison d'une altitude proche du niveau marin (2 m à 3 m NGR) en arrière du cordon littoral (Figure 29). Les points d'entrée d'eau préférentiels et les dépressions arrière littorale qui favorisent la stagnation des eaux en arrière du cordon littoral sont repérées schématiquement en figure suivante.

⁵ 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.

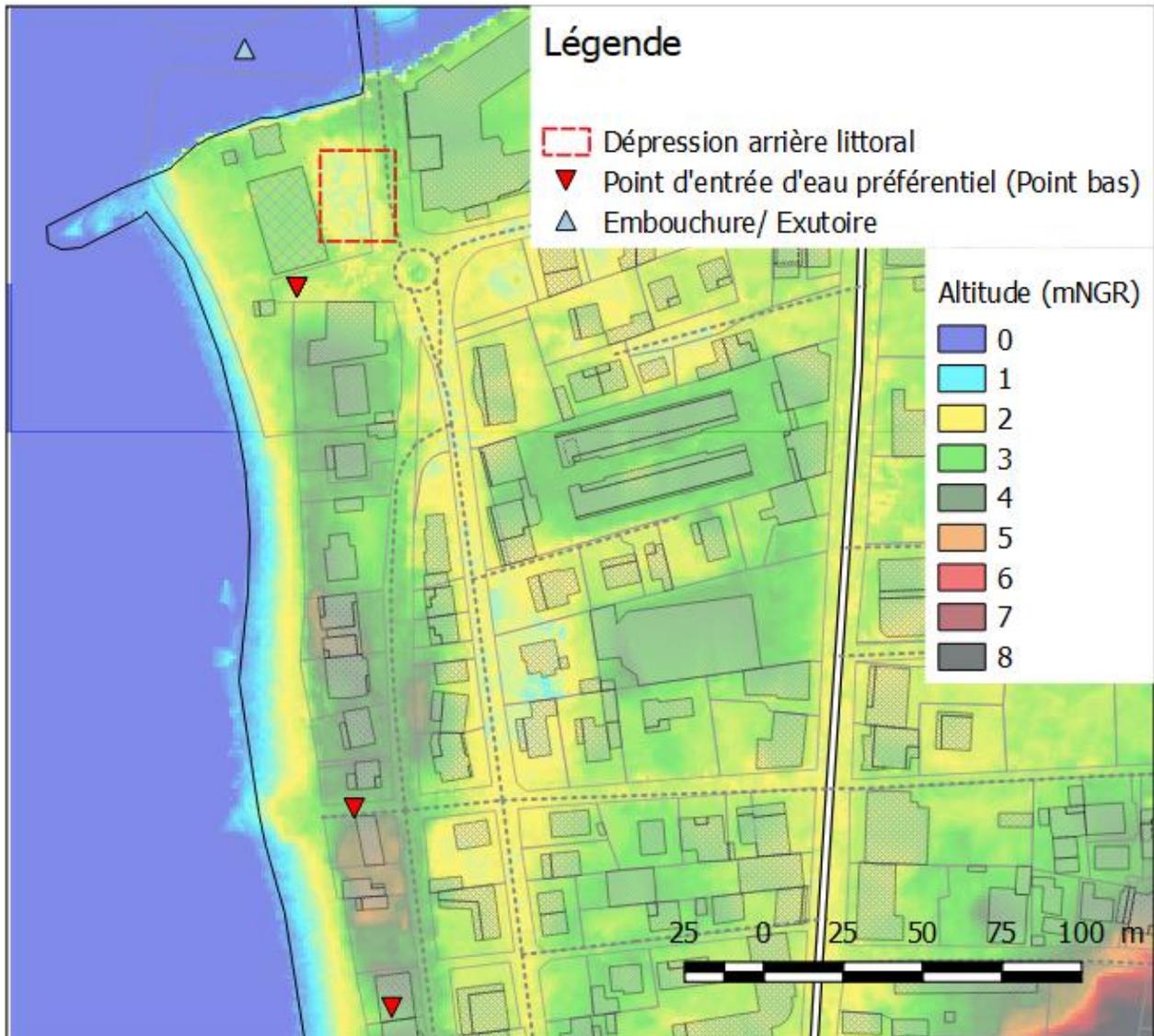


Figure 29 : Cartographie de la topographie du littoral de Saint-Leu (Litto3d, IGN-SHOM – fond : orthophotographie 2012, ©IGN)

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

5.1. CADRE METHODOLOGIQUE NATIONAL

Le présent document reprend les éléments décrits dans le rapport BRGM sur la caractérisation et la cartographie des aléas littoraux pour les communes du Sud-Ouest de la Réunion (De La Torre et al., 2012).

Du fait de l'évolution des connaissances sur les mécanismes physiques des tempêtes et du retour d'expérience post-Xynthia, le besoin s'est fait ressentir de mettre à jour le guide méthodologique national pour l'élaboration des PPRL (Garry *et al.*, 1997).

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

- Du recul L_{max} lié à évènement 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 5.2 et 5.3 :

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 (Lmax)	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	$Lr = 100 Tx + Lmax$		
Etape 2	Prise en compte des ouvrages de protection (vocation à fixer le trait de côte)		
Estimation du rôle à long terme	Capacité à retenir le recul et à résister aux 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 Lmax)		
Cartes du zonage de l'aléa recul du trait de côte	Zonage de l'aléa de référence (sans changement climatique) à échéance 2100	Position du trait de côte à échéance 2100 avec prise en compte du changement climatique	

Tableau 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 globalement sur une démarche comparable à celle proposée en 1997, soit 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, 2012).

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 ans⁶.

⁶ 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.

5.2.1. Préparation des photographies aériennes anciennes

Les photographies utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes couvrant la commune de Saint-Leu de 1978 à 2012 (Tableau 7).

Années	Nature des clichés	Echelle de prise de vue	Résolution image numérique
1950	Noir/Blanc	1 : 25000	1 pixel = 0.4 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
2012	Couleur	1 : 25000	1 pixel = 0.2 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 ». Celle de 1978 a été orthorectifiée spécifiquement pour les besoins du BRGM.

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 30) :

- 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 30 : Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral de Saint-Leu (© IGN)

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 10 m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à 10 m n'ont pas été conservés.

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 31 : Implantation des profils à Saint-Leu (sur orthophotographie 2008, © IGN)

Pour la commune de Saint-Leu, les transects sont implantés à des distances comprises entre 20 m et 50 m (Figure 31), et les taux d'évolution annuels sont calculés par un taux des points extrêmes (EPR) adaptée à l'échantillon de traits de côte.

Nom	Principes	Avantages	Inconvénient	Hypothèse de tendance linéaire	Intervalles de confiance	Incertitudes des données de base
Taux des points extrêmes (End Point rate - EPR)	Le taux est calculé à partir de la valeur la plus récente et la valeur la plus ancienne.	Simple à mettre en œuvre.	Faiblesse de l'information initiale.	Oui	Non	Non

Figure 32 : Méthode de détermination du taux de recul annuel EPR d'après Genz et al. (2007)

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

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 33), il convient de regrouper et moyenner les valeurs au sein de secteurs au comportement morphodynamique homogène.

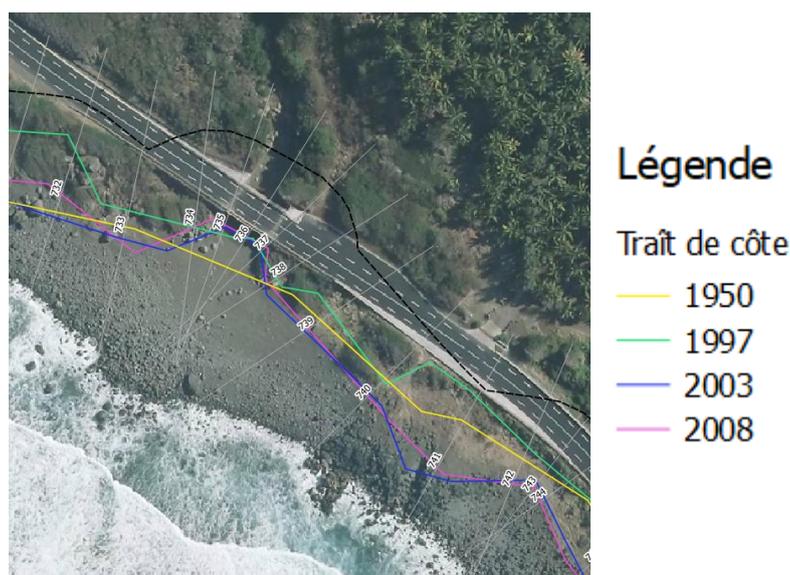


Figure 33 : Exemple d'artefact (en pointillés noir trait de côte 100Tx en « dent de scie ») généré par les profils niveau de la Ravine du trou sur la commune de Saint-Leu (© IGN)

Cas particulier des côtes rocheuses (falaise, cap, pointe) de Saint-Leu

Une analyse approfondie des clichés aériens utilisés lors de la digitalisation des traits de côte a montré que la position de ceux-ci était soumise à une forte incertitude sur ce type de côte. Les reculs calculés sur les côtes à falaise sont ainsi souvent liés aux incertitudes de digitalisation et non pas à un recul réel observé (Figure 34). Sur cette illustration, l'analyse diachronique montre une avancée de la falaise entre 1950 et 1978 alors qu'elle semble stable jusqu'en 2012. Le phénomène d'avancée est impossible et n'est que le reflet de la difficulté à digitaliser la limite du

trait de côte sur les falaises. La falaise sur ce secteur peut être considérée comme étant globalement stable à l'image de son évolution entre 1978 et 2012.

Sur ce type de côte, l'aléa recul du trait de côte est donc égal uniquement au recul lié à un évènement tempétueux majeur (Lmax) à partir du trait de côte de référence.

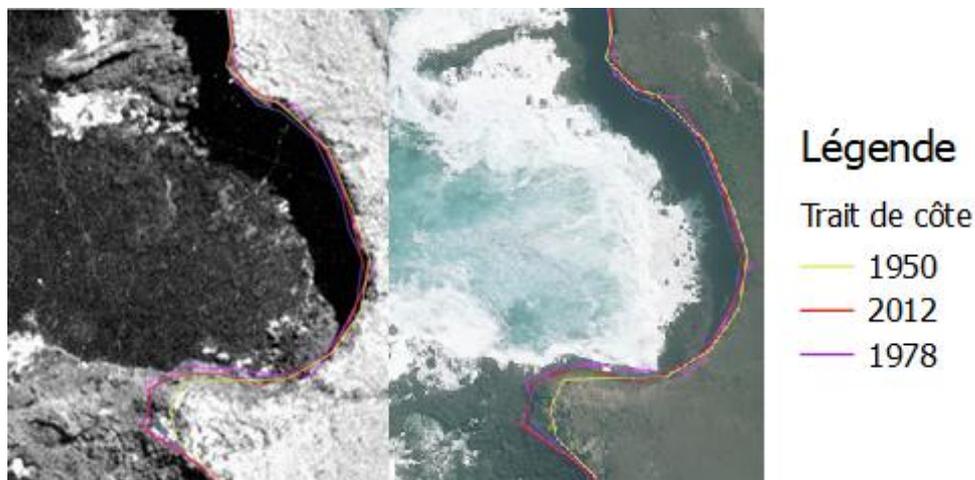


Figure 34 : Exemple d'erreur de définition et de digitalisation sur la partie sommitale d'une falaise (© IGN)

Au sein de grandes cellules hydrosédimentaires, plusieurs 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.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Secteurs homogènes	Type de côte	Tx par secteurs (m)	100TX par secteur (m)	Classes
3B-Pointe des Chât - N	Falaise	NC	NC	Stable
3B-Pointe des Chât- S	Falaise	NC	NC	Stable
Kelonia	Plage corallienne	-0.13	-13	Modéré
Pont et route ⁷	Plage corallienne aménagée	-0.17	-17	Modéré
Quartier face au spot	Plage corallienne aménagée	-0.14	-14	Modéré
Centre-ville Nord	Plage corallienne aménagée	stabilité	stabilité	Stable
Centre-ville Sud	Plage corallienne aménagée	-0.06	-6	Faible
Plages - four à chaux	Plage corallienne	-0.15	-15	Modéré
Cap	Falaise	NC	NC	Stable

⁷ Voir « Cas particulier du secteur de Cayenne et du centre-ville nord »

Station d'épuration/Quatre Robinets	Plage corallienne	-0.07	-7	Faible
Nord Cap au sel	Cap rocheux	NC	NC	Stable
Pointe de Bretagne à Cap du Portail	Falaise	NC	NC	Stable
Eglise Requins - La Veuve	Falaise	NC	NC	Stable
Ravine des Sables	Cordon de galets	-0.34	-34	Fort
Ravine Jacques Le Bon	Pointe rocheuse	NC	NC	Stable
Ravine du Trou	Cordon de galets	-0.21	-21	Fort
Nord Bois Blanc	Falaise	NC	NC	Stable
Bois Blanc	Cordon de galets	-0.16	-16	Modéré
Ravine des Avirons	Falaise	NC	NC	Stable

Tableau 8 : Caractéristiques du recul du trait de côte par cellule hydrosédimentaire

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), 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, les falaises. Sur les côtes artificialisées, on considère un recul nul du fait de l'entretien supposé des aménagements par les services publics et seul un Lmax estimé à 5 m est pris en considération.

Cas particulier du secteur de Cayenne et du centre-ville nord



Figure 35 : Secteur de Cayenne où une partie du trait de côte est artificialisée (encadré rouge : zone artificialisée) (© IGN)

Sur le secteur de Cayenne, une partie du trait de côte est artificialisée par la présence d'enrochement (Trait de côte en figuré carré), sur cette portion on considère un recul nul et l'on prend en compte uniquement le L_{max} (5 m). Sur la partie naturelle au sud, le recul et le L_{max} sont pris en compte (Tableau 8). Cette distinction se fait dans ce cas au sein d'une même cellule à comportement homogène.

Le secteur du centre-ville nord est également entièrement artificialisé, le zonage est égal au L_{max} (5 m).

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 $100T_x$ par secteurs homogènes. Afin de respecter une marge d'incertitude, les valeurs sont arrondies à 5 m près.

La largeur de la zone d'aléa résultante ($L_r = 100T_x + L_{max}$) est affectée en arrière du trait de côte de référence soit celui de 2008 pour la commune de Saint-Leu. Les valeurs par secteurs sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Secteurs homogènes	100 TX par secteur arrondi	Lmax	Lr
3B-Pointe des Chât - N	NC	-5	-5
3B-Pointe des Chât- S	- NC	-5	-5
Kelonia	-15	-5	-20
Pont et route	-10	-5	-20
Quartier face au spot	-15	-5	-20
Centre-ville Nord	0	-5	-5
Centre-ville Sud	-5	-5	-10
Plages - four à chaux	-15	-5	-20
Cap	NC	-5	-15
Station d'épuration/Quatre Robinets	-5	-5	-15
Nord Cap au sel	NC	-5	-5
Pointe de Bretagne à Cap du Portail	NC	-5	-5
Eglise Requins - La Veuve	NC	-5	-5
Ravine des Sables	-35	-10	-45
Ravine Jacques Le Bon	NC	-5	-5
Ravine du Trou	-20	-10	-30
Nord Bois Blanc	NC	-5	-5
Bois Blanc	-15	-10	-25
Ravine des Avirons	NC	-5	-5

Tableau 9 : Valeurs 100Tx ; Lmax et Lr appliquées par secteurs homogènes (NC : Pas de taux calculé)

La cartographie SIG de ces valeurs est réalisée par l'utilisation de l'outil « buffer » revenant à créer une zone tampon (selon la valeur Lr) 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 5 m, la zone de transition s'étale sur 50 m ; pour 10 m/100 m ; etc.).

Lorsque les aménagements présents sur le littoral se caractérisent par des ouvrages légers de particuliers (murs, palissades), ces aménagements ne sont pas considérés comme des ouvrages de défense au sens du guide national car ils n'ont pas été spécifiquement conçus pour lutter contre l'érosion. En général, sur ces secteurs sont appliqués les taux de reculs des secteurs adjacents.

Pour les plus gros ouvrages tels que le port de Saint-Leu et le littoral situé directement au Nord du port, bien qu'ils puissent contenir localement le recul du trait de côte avec des taux de recul calculés comme étant nuls, ils pourraient toutefois être impactés par un événement extrême et être donc affectés par ce Lmax.

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 propose d'appliquer :

- Une simple « règle de trois » entre les +60 cm 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 +60 cm d'altitude.

Le principe de la règle de trois a donc été appliqué sur l'ensemble des communes littorales (cartographie avec l'outil *buffer*) à l'exception des zones où la morphologie du littoral change avec notamment le passage vers l'intérieur des terres d'un cordon sédimentaire à une falaise ou d'une falaise côtière à un massif montagneux. Dans ces cas, étant 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) 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 36).

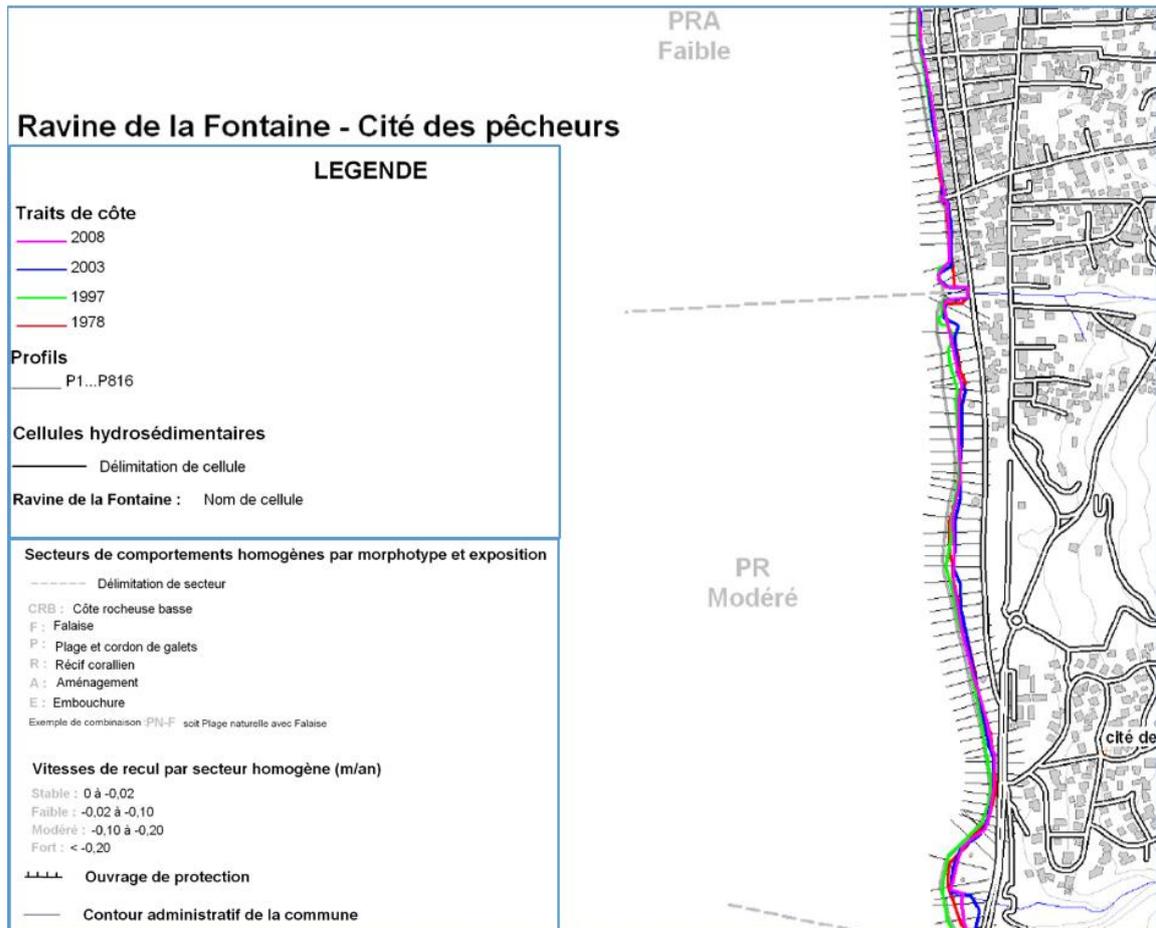


Figure 36 : Exemple d'un extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte

- une carte de l'aléa recul du trait de côte au 1/5000 (Annexe 2) 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 37).

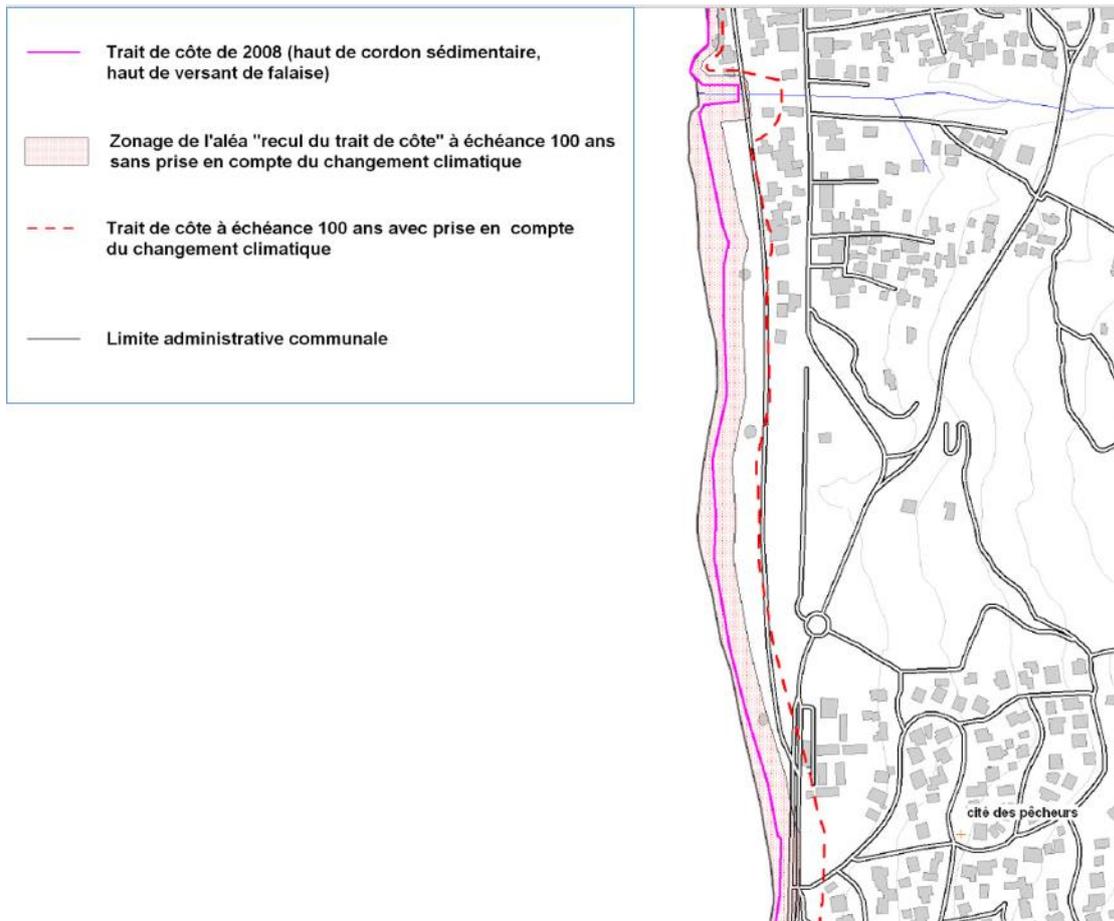


Figure 37 : Exemple de représentation du zonage aléa « recul du trait de côte » avec en trait rose la position du trait de côte en 2008 (haut de plage), en trait gris la limite administrative de la commune côté mer, une surface en pointillé rouge représentant le trait de côte à échéance 2100 avec pris en compte du changement climatique

6. Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine

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	

Figure 38 : Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine

6.2. CARACTERISATION DE L'ALEA SUBMERSIONS MARINES

6.2.1. Méthodologie et scénarios

Les phénomènes de submersion sur la commune

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

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

Pour la submersion par franchissement, plusieurs méthodes d'estimation sont possibles. Les formules empiriques de calcul du run-up⁸ 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 des communes du littoral Sud-Ouest de l'île. 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 » capable de calculer la submersion marine par franchissement. Pour cette commune, les modélisations ont été réalisées en 1D (profils).

Choix de l'évènement naturel de référence

Les calculs de probabilités conjointes (houle/niveau marin extrême, périodes de retour) nécessitent un nombre important d'événements observés. A La Réunion, les données concernant les événements cycloniques ne sont disponibles que depuis la fin du XX^{ème} siècle, et les cyclones y restent peu fréquents (comparativement aux tempêtes métropolitaines). Les données disponibles rendent donc incertains 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). Pour la commune de Saint-Leu, l'évènement de référence est donc :

- **Les houles australes de référence issues de l'évènement de mai 2007 (Figure 39).**

⁸ Run-up : altitude maximale atteinte par le jet de rive sous l'action des vagues.

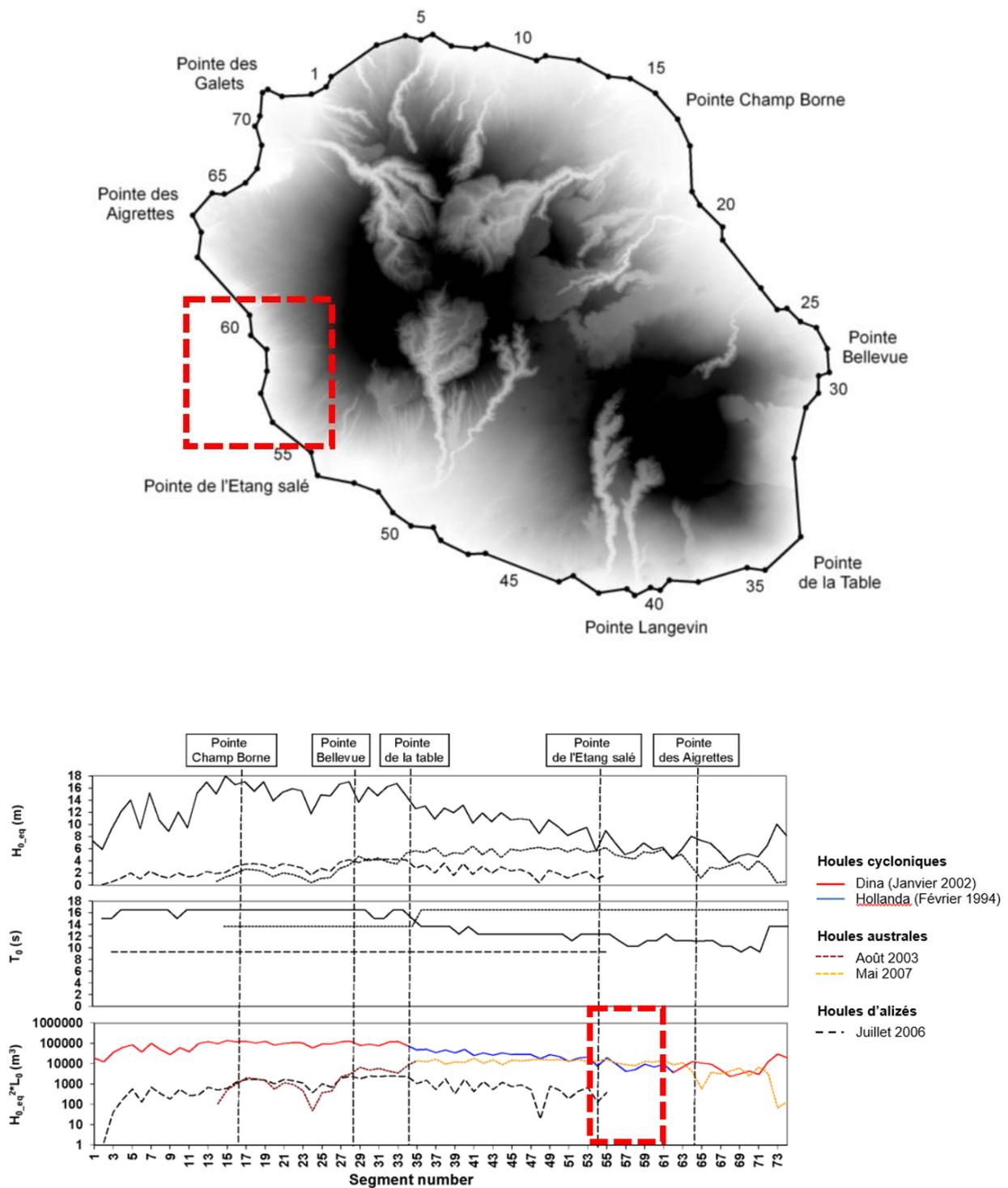


Figure 39 : Comparaison des régimes de houles en termes de hauteur de vague (graphiques du haut), période au large (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) sur l'ensemble de La Réunion (segments pour Saint-Leu encadrés en pointillés rouge) – (Lecacheux, 2012).

Scénarios de référence et prise en compte du changement climatique

Sur la base de cet évènement naturel de référence, et conformément à la méthodologie recommandée par le ministère en charge de l'écologie, deux scénarios sont ensuite considérés avec des hypothèses différentes permettant de tenir compte du changement climatique et de son impact sur l'élévation du niveau marin (cf. Figure 40) :

- **Un scénario de référence** intégrant une hypothèse d'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique de 20 cm intégrée au niveau marin de référence. Il permet de caractériser **l'aléa de « référence »** ;
- **Un scénario à échéance 100 ans** intégrant une hypothèse d'élévation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique de 60 cm (dont les 20 cm intégrés au scénario de référence). Il permet de caractériser **l'aléa « 2100 »** ;

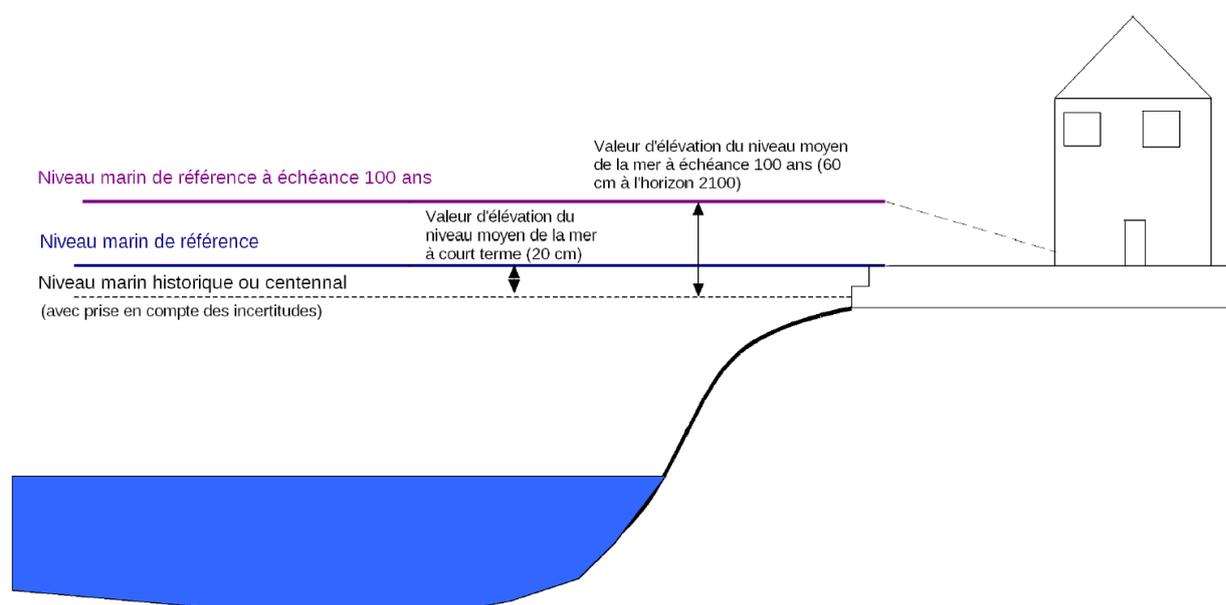


Figure 40 : Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2014)

Sur le secteur d'étude, il n'y a pas 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. Modélisation des submersions marines de référence

Données topo-bathymétriques

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

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

En 2D, les bâtiments susceptibles d'interagir avec les écoulements à terre sont pris en compte à travers la réalisation d'un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) à partir de la BDTopo (IGN), des données Litto3D. Les principales étapes nécessaires à cette construction, développées dans le cadre du projet ALDES (Alerte descendante aux tsunamis en Méditerranée Occidentale : Le Roy *et Pedreros*, 2011), sont schématisées dans la Figure 41 :

- Dans le MNE « brut » issu de Litto3D sont intégrés aussi bien le bâti que les arbres, les voitures, etc... Le croisement avec la couche « bâti » de la BDTopo 2008 de l'IGN permet d'en extraire les éléments correspondant strictement aux bâtiments.
- La superposition de cette couche « bâti 3D » au MNT généré avec les données Litto3D et les sondes Histolitt permet d'établir un MNE (Figure 41) ne prenant en compte comme « sursol » que le bâti.
- Enfin, des corrections manuelles peuvent être nécessaires pour tenir compte des bâtiments et/ou ouvrages qui ne figurent pas dans la BDTopo de 2008.

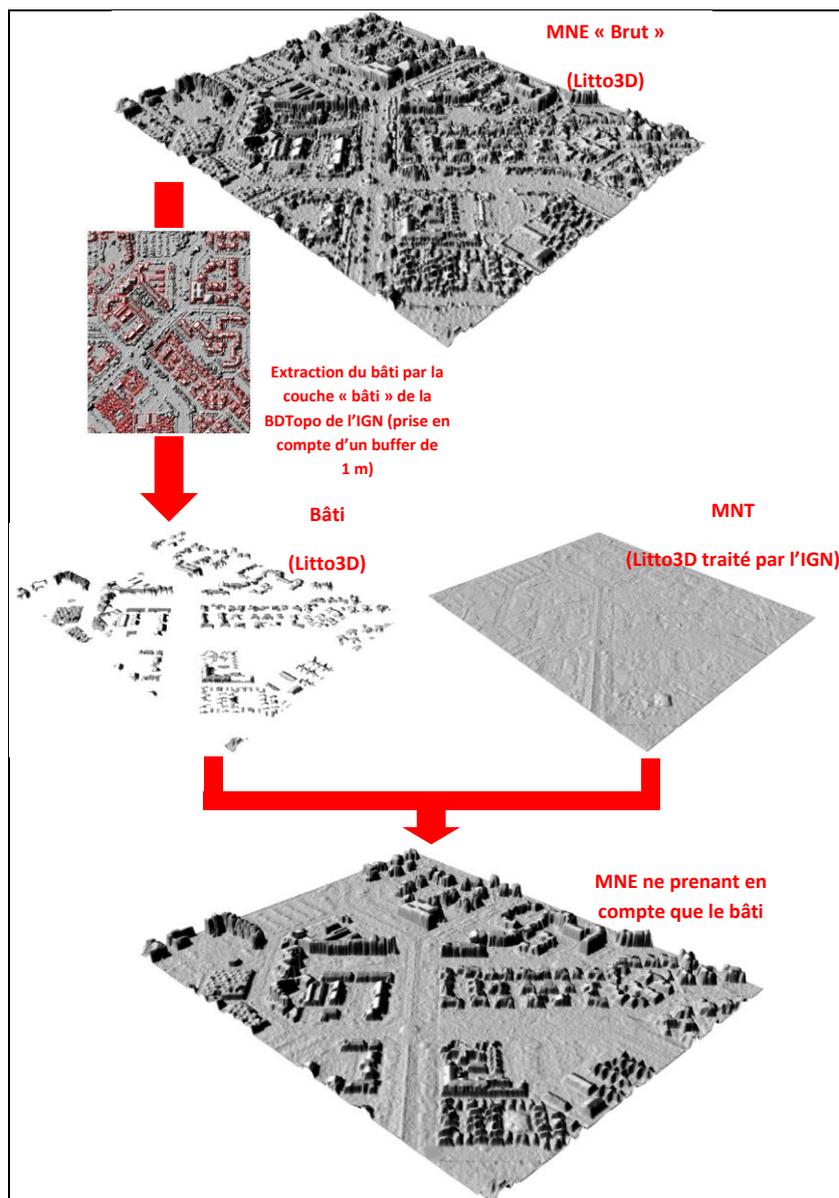


Figure 41 : Principales étapes nécessaires à la construction du MNE

Références altimétriques

Les références altimétriques utilisées pour cette étude sont issues du document de référence publié par le SHOM (SHOM, 2011). Seuls trois sites y sont référencés pour l'île de La Réunion : il s'agit des ports de la Pointe des Galets, de Saint-Leu et de Saint Pierre. Le port de Saint-Pierre est la référence pour cette étude (Tableau 10).

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
Saint-Pierre	0,92	0,70	0,50	0,20	0,02	-0,554

Tableau 10 : Références altimétriques maritimes pour les sites de Saint-Leu et Saint-Pierre : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et Zéro IGN89 (SHOM, 2011)

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). Le site de Saint-Pierre est retenu comme référence.

Pour mémoire, on retiendra que le niveau de plus haute mer astronomique (marée) se situe dans le secteur d'étude aux alentours de +0,36 m IGN89⁹.

Niveaux d'eau considérés

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

- Le niveau de marée prédite est calculé à l'aide du logiciel SHOMAR du SHOM à Saint-Pierre, à l'heure du pic estimé de la houle lors de l'évènement ; ce niveau de marée est ensuite ramené au zéro IGN89 par l'intermédiaire des références altimétriques présentées au (Figure 42).
- La surcote atmosphérique est prise en compte à partir des données disponibles pour l'évènement considéré.

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

Au final, les niveaux considérés sont donc les suivants :

Evénement de référence (secteurs)	Marée prédite (SHOMAR, /ZH)	Surcote atmosphérique	Niveau marin de référence à court-terme (/0 IGN89)	Niveau marin de référence à long-terme (/0 IGN89)
Houles australes (profils 1 à 4)	+0,68 m (13/05/2007 à 06h00 TU)	Inconnue	+0,33 m	+0,73 m

Figure 42 : Niveaux marins retenus pour les simulations de submersion

Stratégie de modélisation : Méthode adoptée pour les simulations

Localisation de la simulation

Sur la commune de Saint-Leu, un profil de modélisation 1D a été mis en place sur le littoral au sud du centre-ville (Figure 43).

⁹ Ce niveau est exactement à +0,32 m IGN89 à St Leu et à 0,366 m IGN89 à Saint-Pierre.

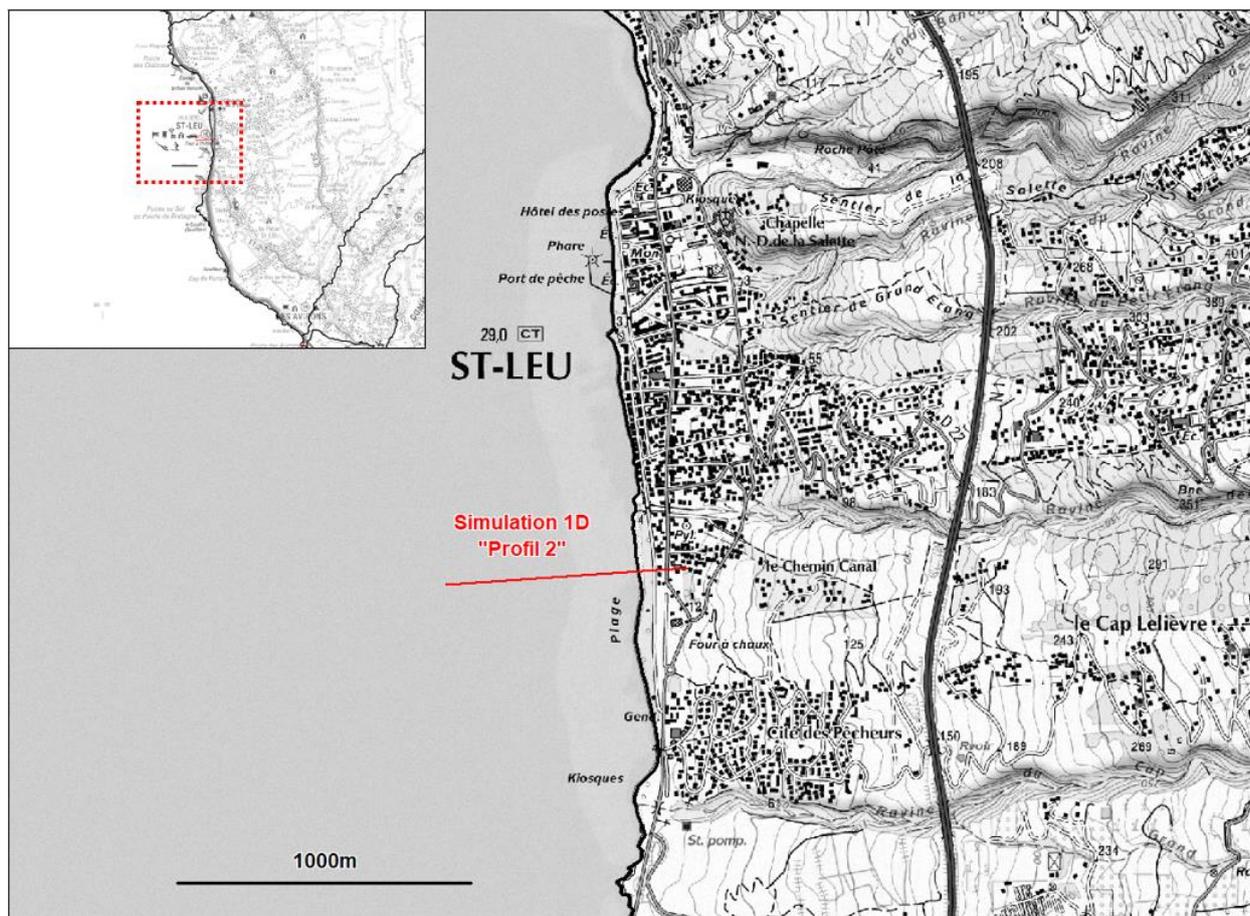


Figure 43 : Localisation du profil de simulation 1D à Saint-Leu (©IGN)

Méthode adoptée pour les simulations en 1D

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

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

- **Propagation de spectres à la côte par le code SWAN** en 1D, en conditions « maximisantes » (associant pic des vagues et niveau d'eau maximal, même si les deux phénomènes ne se sont pas produits simultanément lors de l'événement historique de référence) à partir du calcul des houles équivalentes au large orthogonales à la côte (Lecacheux *et al.*, 2012) ;
- **Génération de séries temporelles** au-delà de la zone de déferlement pour un couplage avec un code vague-à-vague ;

- **Simulation de la submersion en 1D avec le code SurfWB sur une durée de 30 minutes** (en conditions maximisantes), ce qui correspond à une centaine de vagues afin d'obtenir un nombre de vagues représentatif des phénomènes ;
- Selon les résultats sur 30 minutes :
 - o si aucun franchissement n'est constaté pour les conditions « maximisantes », ce résultat constitue le résultat final et permet de déterminer le run-up maximal atteint par les vagues ;
 - o si par contre un franchissement est constaté, il est nécessaire pour quantifier le volume d'eau à terre d'effectuer des **simulations en conditions instationnaires** (i.e. dont les conditions en termes de niveau d'eau et de caractéristiques des vagues évoluent au cours du temps) ; ces simulations permettent d'accéder aux instants auxquels le franchissement débute et s'achève, et aux débits franchissant associés.

Simulations SWAN en 1D

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

Les simulations de houles australes et cycloniques menées lors de l'étude HOULREU (résolution de 90 m, grilles de calcul notées R2O et R2S dans Pedreros *et al.*, 2009) et modifiées par Lecacheux *et al.* (2012) pour calculer les houles de référence au large orthogonales à la côte, sont exploitées suivant les 2 scénarios envisagés (court-terme et long-terme).

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

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

Les caractéristiques des houles de référence au large exploitées suivant les 2 scénarios envisagés sont présentées dans le tableau suivant. Ces caractéristiques ont été utilisées comme forçages pour SWAN sur le profil (Figure 44).

Profil	Lieu	Segment identifié par Lecacheux et al. (2012) (cf Figure 43)	HS (m)	Tp (s)
2	Saint-Leu	58	4.33	16.51

Figure 44 : Houles australes de référence : caractéristiques des vagues au large orthogonales à la côte utilisées en forçage du profil 2 (d'après Lecacheux *et al.*, 2012)

L'analyse des résultats permet d'identifier les zones de déferlement des vagues. Une extraction des spectres est réalisée après cette zone pour le profil 2 pour les deux scénarios, afin de réaliser le chainage avec le code SurfWB (qui ne prend pas en compte le phénomène de déferlement).

Génération d'une série temporelle

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

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

Chaque série temporelle est ensuite « rétro-analysée » de manière à vérifier la cohérence entre les paramètres issus de SWAN et ceux propres aux séries temporelles générées. Ces comparaisons sont présentées dans le Tableau 11.

	Profil Saint-Leu (Scénario référence +20 cm)			Profil Saint-Leu (Scénario échéance à 100 ans +60 cm)	
	Hs (m)	Tmoy (s)		Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	1,80	14,76	SWAN	2,00	14,71
Série tempo	1,74	15,39	Série tempo	1,95	15,25
Ecart	0,06	0,63	Ecart	0,05	0,54

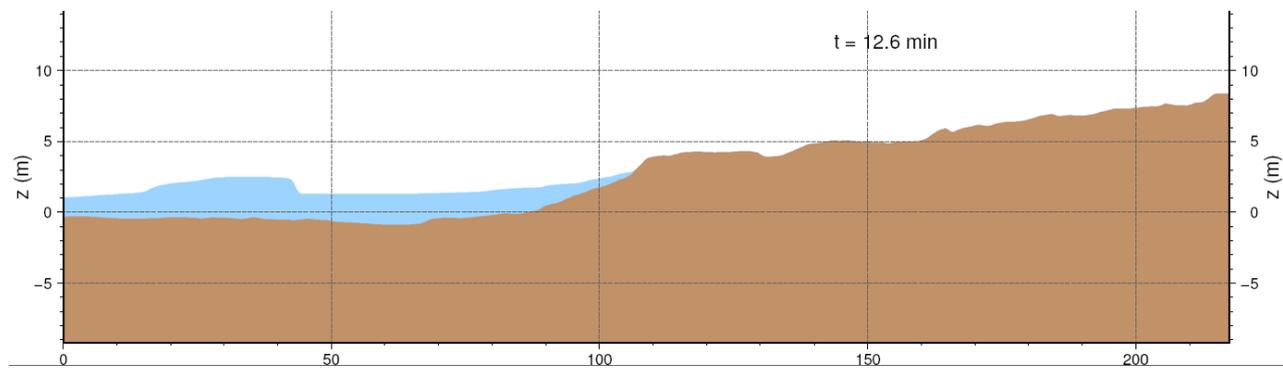
Tableau 11 : Evénement de référence « Houles Australes Mai 2007 » : comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée du profil de Saint-Leu calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour les 2 scénarios

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

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

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

Les résultats obtenus par ces simulations permettent de connaître à tout instant la surface libre de l'eau le long du profil observé (cf. Figure 45), 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).



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

6.2.3. Résultat des simulations 1D des houles de référence

Simulations de submersion en conditions stationnaires sur 30 minutes

Les simulations de submersion en 1D ont été menées en utilisant des séries temporelles de 30 minutes reconstituées à partir des spectres de houles calculés par le code SWAN, en conditions maximisantes. Les niveaux d'eau utilisés sont de 0,33m pour le scénario « de référence » et de 0,73m pour le scénario à échéance 100 ans « 2100 ».

Sur le profil, la simulation sur 30 minutes (Figure 46) montre l'altitude maximum du run-up obtenu. Il s'agit du résultat final de cette modélisation.

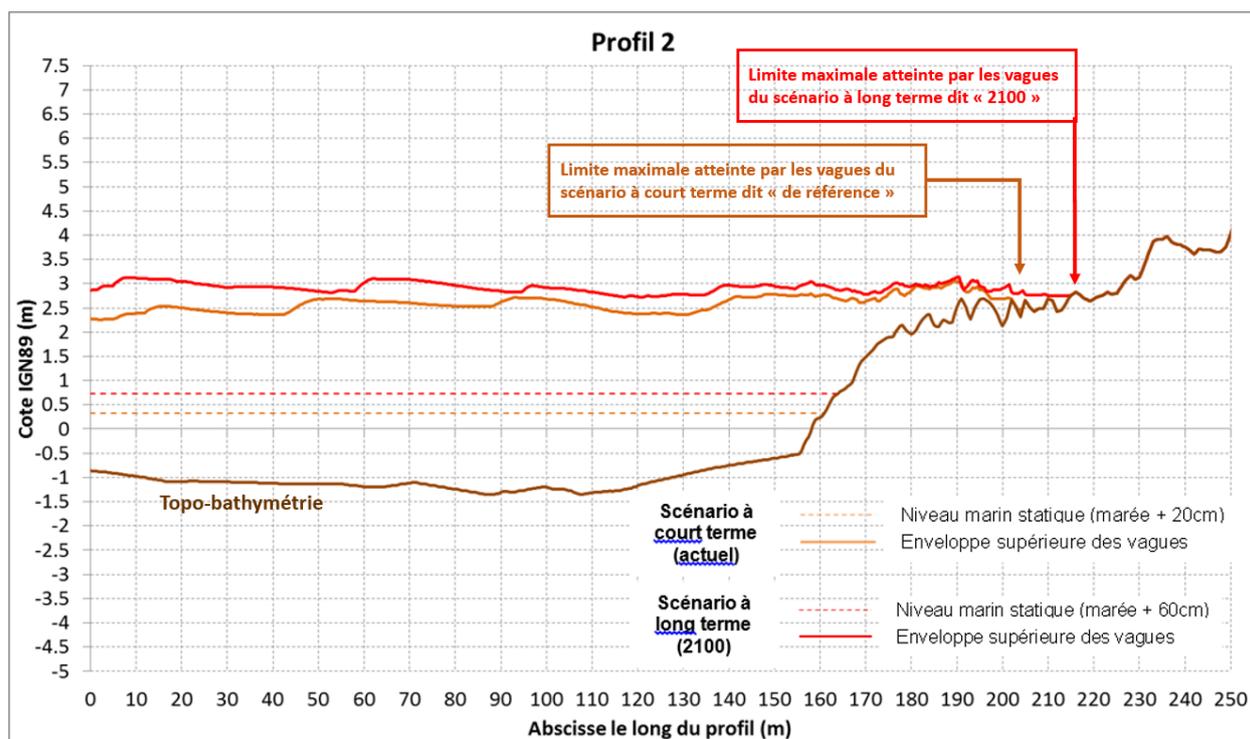


Figure 46 : Houles australes : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil 2 pour les scénarios à court-terme et à long-terme pour 30 minutes simulées

L'influence du niveau d'eau est faible sur le profil 2 (au nord de la cité des Pêcheurs à Saint-Leu), puisque les résultats diffèrent assez peu entre le scénario à court-terme et le scénario à long-terme. La figure suivante représente le résultat de simulation de l'évènement de référence sur le profil de Saint-Leu en vue planimétrique (Figure 47).

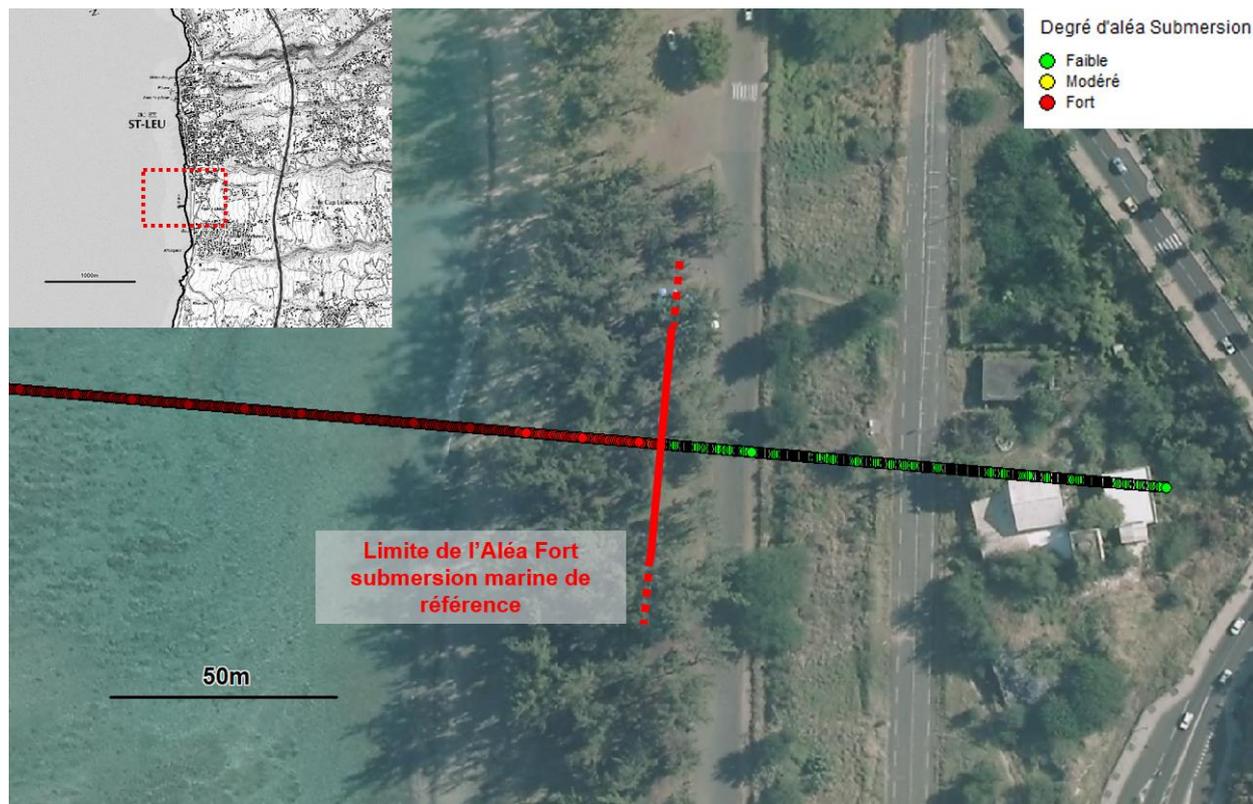


Figure 47 : Extrait cartographique des résultats de modélisation 1D de submersion du scénario de référence (Fond : Ortho photographie @IGN)

Synthèse

La Figure 48 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 modélisées.

Profil	Scénario à court-terme		Scénario à long-terme	
	Altitude moyenne atteinte à terre par les vagues ¹⁰ (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte à terre par les vagues ⁶ (m, IGN89)	Altitude moyenne atteinte à terre par les vagues ⁶ (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte à terre par les vagues ⁶ (m, IGN89)
2	2,5	2,7	2,6	2,7

Figure 48 : Synthèse des résultats obtenus sur le profil 2 pour chaque scénario

¹⁰ Jet de rive compris en haut de rivage

6.2.4. Données historiques et validation

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

- Le recensement détaillé (typologie) et géolocalisé (couches SIG) des dégâts liés aux houles cycloniques et australes de 2007 (Sogreah, 2007 et du BRGM, 2013).
- Prise de contact avec les services techniques communaux
- Visites et enquêtes de terrain sur les différents sites sensibles.
- Revue de presse « dans la tourmente »

L'ensemble des informations recueillies et géo-localisables sont synthétisées dans l'annexe n°3.

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 (Figure 49) :

		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

Figure 49 : Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (MEDDTL, 2012)

Partant des hauteurs d'eau et vitesses de submersions issues de la modélisation et de la morphologie du littoral, 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 (hauteur d'eau supérieure ou égale à 0,5 m et écoulement rapide), pouvant induire des projections de matériaux sédimentaires (galets, fragments de coraux) et de débris ;
- **Modéré**, pour les secteurs qui subissent des écoulements rapides de lames d'eau de hauteurs inférieures à 0,5 m. 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 recueillies (cf chapitre 6.2.4)
- Des données issues des modélisations (hauteur et vitesse d'écoulement)

Les résultats des modèles sont traités sous SIG par des analyses thématiques permettant une analyse croisée des informations de vitesse et de hauteur d'eau pour qualifier l'aléa selon les critères énoncés au chapitre précédent.

Une analyse de la cohérence des résultats est ensuite menée en confrontant le résultat de l'analyse thématique brute avec :

- Les données historiques connues sur le site.
- Une analyse experte du MNT pour comprendre les modes d'écoulement des submersions.

Sur les secteurs traités à l'aide des modèles 1D, une fois validés ou corrigés par l'expertise, les résultats des modèles sont étendus et spatialisés suivant une approche iso-altimétrique. L'expertise permet de définir l'emprise et la cohérence de cette spatialisation suivant les typologies des littoraux (plages, falaises) et leurs caractéristiques morphologiques (altitude du cordon, points d'entrée d'eau préférentiels, « cuvettes ») identifiées à partir du MNT, des orthophotographies et des connaissances terrain.

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

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

Enfin, un zonage complémentaire suivant la même qualification est réalisé pour l'aléa submersion marine à l'échéance 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 5 m à 10 m de distance est rajoutée en plan en arrière du zonage de référence. Cette distance est adaptée par catégorie d'aléa selon la configuration morphologique du site.

6.3.3. Résultats cartographiques

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

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

Il en résulte la superposition d'un grand nombre d'informations sur les cartes d'aléa submersions marine. Les informations concernant les deux scénarios ci-dessus sont différenciées par l'usage

de surfaces colorées pour l'aléa de référence, et de lignes discontinues pour l'aléa à échéance 100 ans (dit aléa 2100).

Les résultats sont présentés sous la forme de deux types de cartes (Figure 50 & Figure 51)

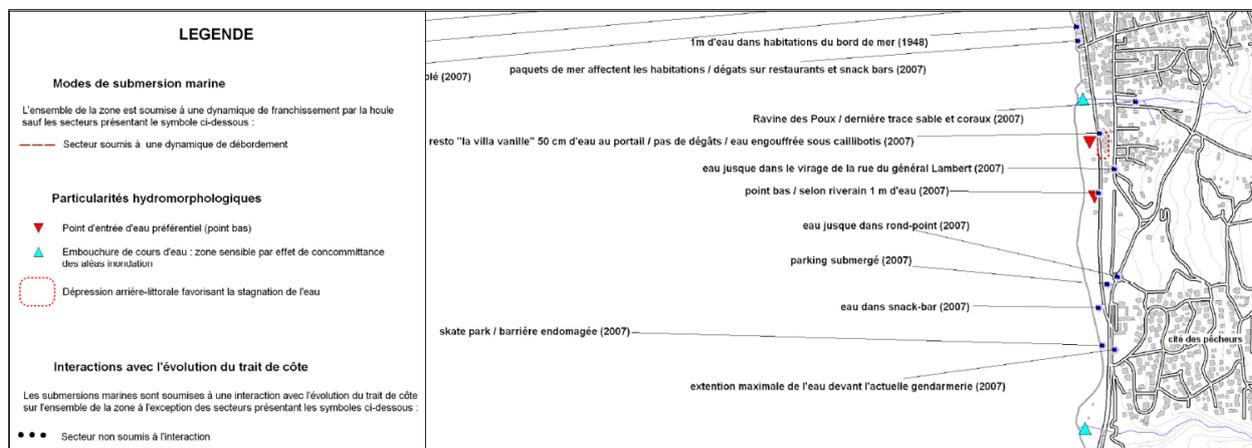


Figure 50 : carte de synthèse au 1/10 000 (Annexe 3) présentant les modes de submersions, les particularités hydro-morphologiques (point d'entrée d'eau préférentiel, embouchures, dépressions arrière-littorales), les secteurs non soumis à une interaction avec l'évolution du trait de côte et les données historiques disponibles

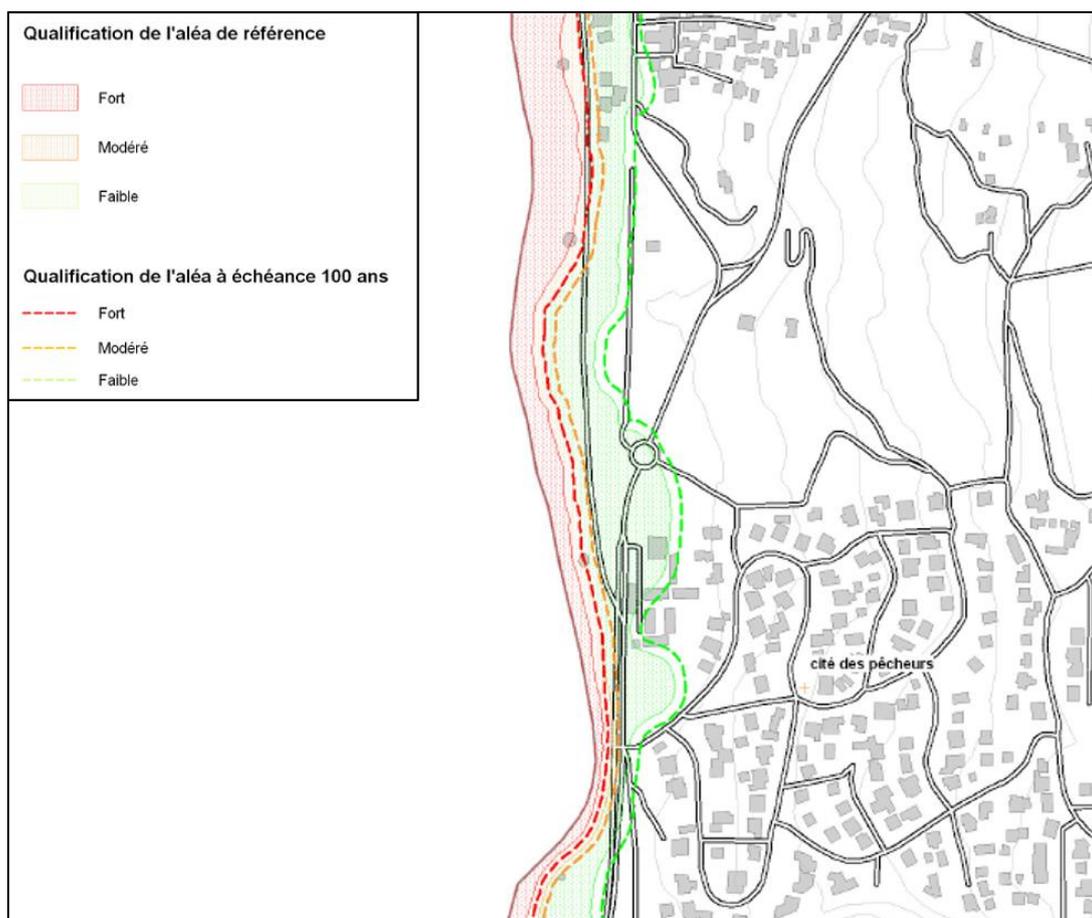


Figure 51 : Carte de zonage au 1/5000 (Annexe 4) de l'aléa de référence et de l'aléa à échéance 100 ans

7. Elaboration du zonage réglementaire

7.1. METHODOLOGIE

L'élaboration du zonage réglementaire constitue l'ultime étape cartographique du Plan de Prévention des Risques 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 interdites ou autorisées avec des 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 et services techniques de plusieurs collectivités) a été mis en place au premier semestre 2015 afin d'élaborer la trame d'un règlement-type « PPR littoral » réunionnais. Ce règlement-type a servi de base au PPR littoral de la commune de Saint-Leu.

7.1.1. Les espaces urbanisés et non-urbanisés

La prise en considération des espaces urbanisés et non-urbanisés (Figure 52) 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 ;

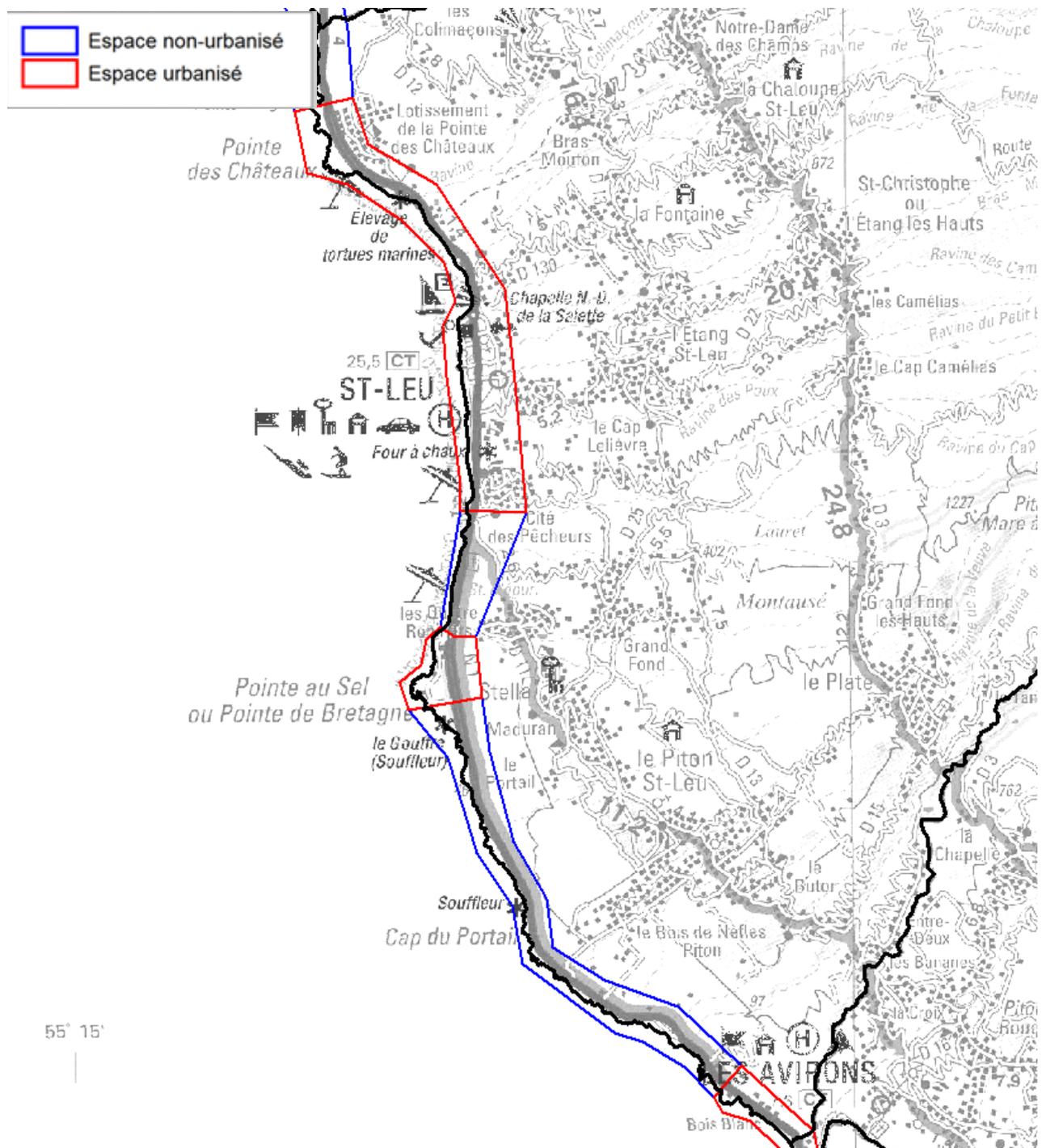


Figure 52 : Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Saint-Leu

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-Leu, 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 12 : 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 13 : Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés

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-Leu, 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 (Figure 53) est la transcription du croisement entre les études techniques (qui ont notamment conduit à l'élaboration des cartes d'aléas) et l'identification des enjeux du territoire en termes d'interdictions, de prescriptions et de recommandations (Tableau 14 & Tableau 15).

La DEAL de La 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-Leu, 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-Leu 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			
		Fort réf.	Modéré réf.	Faible réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Nul réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100
RECULE DU TRAIT DE COTE	Fort	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Fort 2100 ou Nul	Rouge	Rouge	Rouge	Bleu

Tableau 14 : Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces non-urbanisés

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

Tableau 15 : Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces urbanisés

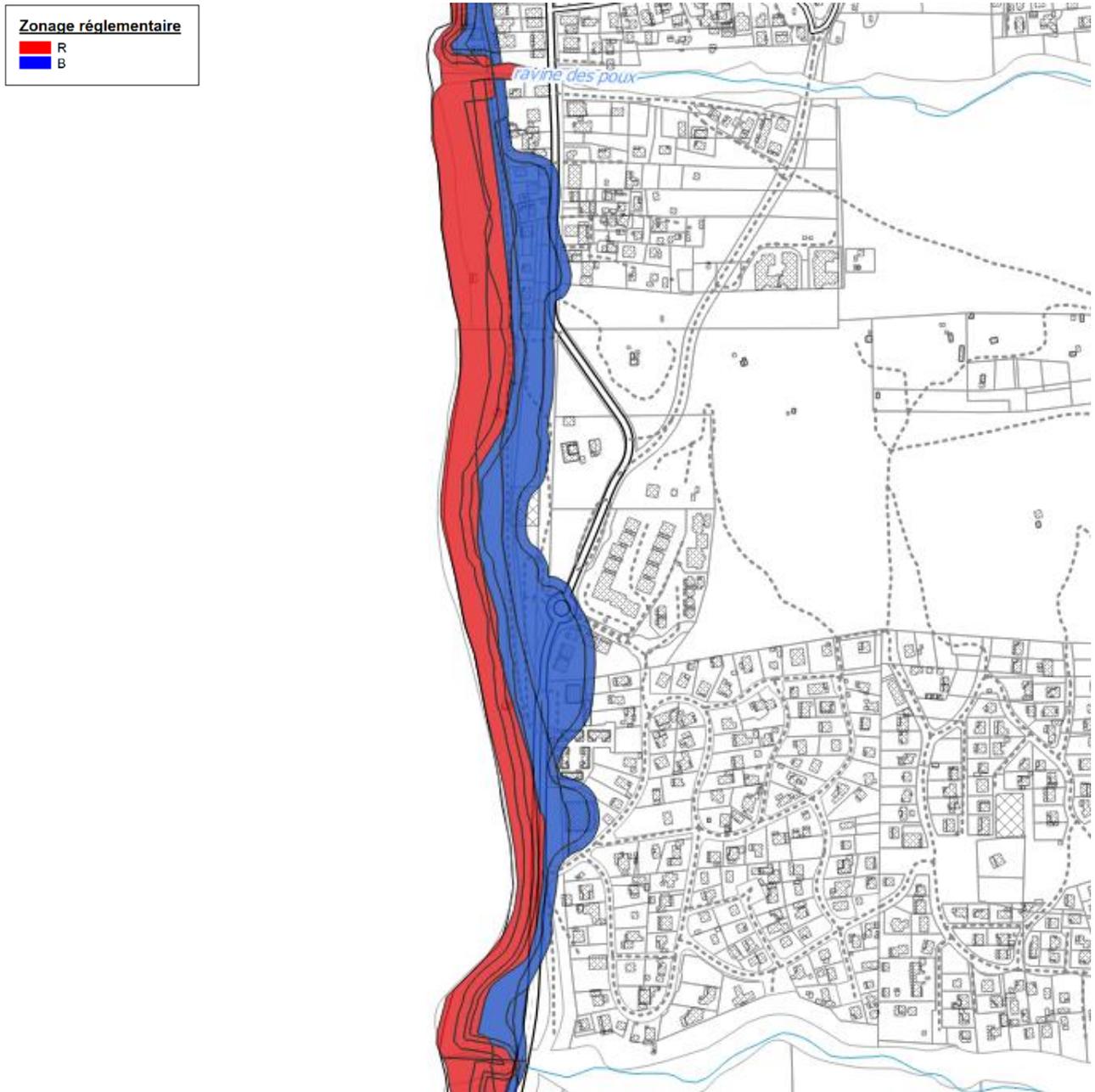


Figure 53 : Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Saint-Leu

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
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
TCO	Communauté d'agglomération du Territoire de la Côte Ouest

Termes techniques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Falaise : Escarpement vertical ou subvertical.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9. Principaux textes officiels

9.1. LEGISLATION - REGLEMENTATION

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

9.2. PRINCIPALES CIRCULAIRES

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

9.3. PUBLICATION DE GUIDES

1. Guide général « Plans de Prévention des Risques (PPR) naturels prévisibles » (paru à la documentation Française – 1997) ;
2. Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL – Analyse et cartographie des aléas littoraux – Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – Novembre 2011 – 90 p.
3. Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, DGPR, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie – Mai 2014 – Version finale -- 169 p.
4. Références Altimétriques Maritimes - Ports de France métropolitaine et d'outre-mer - Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée – SHOM, Service hydrographique et océanologique de la Marine. Édition 2016

10. Bibliographie

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

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

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

Chateauminos 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.

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.

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., Grasz 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.

Genz et al., (2007) THE PREDICTIVE ACCURACY OF SHORELINE CHANGE RATE METHODS AND ALONGSHORE BEACH VARIATION ON Maui ? Hawaii. Journal of Coastal Reserch, 23(1), 87-105. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

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

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
- MEDDTL (2012)** – Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL – Analyse et cartographie des aléas littoraux – Novembre 2011 – 90 p.
- Météo-France** (2007) – Note de synthèse – Evaluation du risque liée à la surcote cyclonique sur les côtes réunionnaises – 8 p.
- Pedrerros 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.
- Pedrerros 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.
- Pedrerros 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) – Risques liés aux houles cycloniques et australes – Recensement des dégâts liés aux évènements récents – Rapport 4700483 R2 - 23 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



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