



DEPARTEMENT DE LA REUNION
Commune de Saint-André

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX

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

NOTE DE PRESENTATION

Janvier 2024

Enquête publique


**PRÉFET
DE LA RÉGION
RÉUNION**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

 Géosciences pour une Terre durable
brgm

Avertissement général sur les limites d'étude du document PPR

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

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

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

Ce document a été établi dans une logique de prévention (et non d'exposition) en s'appuyant sur les connaissances disponibles. Ainsi, le 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	9
1.1. Organisation de la gestion des risques.....	9
1.2. Prévention des risques naturels	9
1.3. Plan de prevention des risques (PPR) naturels	11
1.4. Catastrophes naturelles majeures à La Réunion	12
2. PRESENTATION DU PPR	13
2.1. Contexte réglementaire du PPR	13
2.2. Procédure réglementaire	14
2.2.1. Secteurs géographiques concernés	14
2.2.2. État des réflexions menées	14
2.2.3. Démarches à mener	15
2.2.4. Rappel du régime d'assurance en vigueur	16
2.2.5. Infractions au PPR et sanctions.....	18
2.3. Expropriation et Mesure de sauvegarde	19
2.4. Responsabilités	19
2.4.1. Etablissement du PPR.....	19
2.4.2. Autorisation d'occuper le sol.....	19
3. PRESENTATION DE LA COMMUNE	21
3.1. Contexte de la zone d'étude	21
3.1.1. Situation géographique.....	21
3.1.2. Contexte géologique.....	22
3.1.3. Contexte géomorphologique littoral.....	25
3.1.4. Contexte climatique	29
3.2. Enjeux et vulnérabilité	34
4. HISTORICITE ET CARACTERISATION DES PHENOMENES NATURELS	37
4.1. Phénomènes historiques.....	37
4.2. Arrêtés de catastrophes naturelles	39
4.3. Caractérisation des aléas littoraux.....	41
4.3.1. Aléa recul du trait de côte (RTC)	41
4.3.2. Aléa submersion marine	47
5. CARACTERISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA REcul DU TRAIT DE COTE.....	53

5.1.	Définitions et notions générales.....	53
5.2.	Aléa recul du trait de côte.....	53
5.2.1.	Cadre méthodologique national.....	53
5.2.2.	Estimation de l'aléa recul du trait de côte.....	55
5.2.3.	Zonage de l'aléa recul du trait de côte.....	60
5.3.	Aléa submersion marine.....	63
5.3.1.	Cadre méthodologique national.....	63
5.3.2.	Méthodologie et scénarios.....	65
5.3.3.	Modélisation des submersions marines de référence.....	69
5.3.4.	Analyse des résultats des simulations SWASH 1D.....	76
5.3.5.	Zonage cartographique de l'aléa submersion marine.....	79
5.3.6.	Cas particulier : Secteur de Bois Rouge.....	83
6.	LEXIQUE DES SIGLES ET TERMES TECHNIQUES.....	89
7.	PRINCIPAUX TEXTES OFFICIELS.....	93
7.1.	Législation - Réglementation.....	93
7.2.	Principales circulaires.....	93
7.3.	Publication de guides.....	94
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	95

Liste des figures

Figure 1 : Délimitation du territoire communal de Saint-André (Fond ©IGN scan100®-2010) -----	21
Figure 2 : Cartographie géologique de la commune de Saint-André d'après la carte géologique à 1/100 000 (BRGM, LGSR, 2006) -----	22
Figure 3 : Réseau hydrographique de la commune de Saint-André -----	26
Figure 4 : Localisation des différents faciès littoraux présents sur la commune de Saint-André (BRGM, 2021) --	27
Figure 5 : A gauche : Photo de l'érosion du haut de plage au niveau du quartier de Champ-Borne ; A droite : Photo de l'opération de remblaiement effectuée par la commune aux abords du restaurant « Beau Rivage ». -----	28
Figure 6 : A gauche : Photo de l'usine sucrière de Bois Rouge; A droite : Photo de la plage de galet situé au-devant de l'usine sucrière de Bois-Rouge. -----	28
Figure 7 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)-----	29
Figure 8 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)-----	30
Figure 9 : Localisation des stations météo à proximité de Saint-André (©IGN Scan100® - 2010) -----	31
Figure 10 - 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, le scénario est donc majorant puisque la côte Nord de l'île passe dans le 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. -----	32
Figure 11 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008) -----	33
Figure 12 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009). -----	34
Figure 13 : Evolution de la population de la commune de Saint-André (source : INSEE) -----	35
Figure 14 : Extrait de la cartographie des enjeux du littoral de la commune de Saint-André (Annexe 5)-----	36
Figure 15 : Extrait de l'annexe 3 « Carte de synthèse des modes de submersion et des données historiques de l'aléa submersion marine » de la commune de Saint-André. -----	39
Figure 16 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)-----	41
Figure 17 – Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012) -----	42
Figure 18 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012) -----	43
Figure 19 - Les manifestations de l'érosion des cordons sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012) --	44
Figure 20 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012) -----	45
Figure 21 : Erosion du littoral du quartier de Champ-Borne (Campagne OBSCOT ; 2020) -----	46
Figure 22 : Erosion du haut de plage derrière le restaurant Le Beau Rivage (Campagne OBSCOT, 2018) -----	46
Figure 23 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (BRGM). -----	47
Figure 24. Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012) -----	48
Figure 25 - Sites sensibles à l'action des houles (BRGM, mai 2015)-----	49
Figure 26 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)-----	49
Figure 27 : Extrait de la carte des événements historiques de submersion marine (Annexe 3 du projet de PPRL) 50	
Figure 28 : Secteur de Bois Rouge et du Parc du Colosse de la commune de Saint-André dont l'altitude est située entre 2 et 3 m NGR (MNT Litto3d IGN/SHOM)-----	51
Figure 29 – Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral de la côte nord-est: a. limite en pied d'aménagement (ortho 2011); b. limite de végétation (ortho 2011); c. limite de haut de versant (lidar) ---	56
Figure 30 - Exemple d'implantation des profils à Sainte-Suzanne -----	57
Figure 31 – Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009) -----	58
Figure 32 – Exemple d'artefact généré par les profils au sud de la Rivière des Marsouins sur la commune de St-Benoît : de fortes disparités sont observées entre des transects très proches) - Orthophoto IGN© 2012 -----	58
Figure 33 : Délimitation des cellules hydro-sédimentaires et des 10 secteurs homogènes de la commune de Saint-André (BRGM, 2020)-----	59
Figure 34 : Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte de Saint-André (cf. Annexe 1)62	
Figure 35 : Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur la commune de Saint-André (cf. Annexe 2)-----	62
Figure 36 : Présentation schématique des niveaux d'eau de l'évènement submersion marine par débordement selon les 2 scénarios PPRL -----	66
Figure 37 : Schémas de la qualification des degrés d'aléa débordement-----	66
Figure 38 – Comparaison des houles engendrées par différents évènements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – (Lecacheux et al., 2012)-----	68

Figure 39 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2014)

69

Figure 40 : Principales étapes nécessaires à la construction du MNE (Le Roy et al., 2012) – données Litto3D ©IGN. 70

Figure 41 : Hauteur significative des vagues en rouge (en mètres, échelle de gauche) et niveau de la mer en bleu incluant la marée prédite et la surcote atmosphérique estimée (en mètres IGN89, échelle de droite) les 22 et 23 janvier 2002 (cyclone Dina) pour les 2 profils réalisés (4.1 et 4.2) sur la commune de Saint-André----- 72

Figure 42 : Localisation des transects de la simulation 1D à Saint-André ----- 73

Figure 43 – Aperçu de la propagation des vagues le long d'un profil pendant la simulation ----- 75

Figure 44 : Evènement de référence « cyclone Dina » : niveau d'eau maximal obtenu le long du profil 4.1 à Saint-André pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Profils en travers ----- 76

Figure 45 : Evènement de référence « cyclone Dina » : Limites de l'aléa fort le long du profil 4.1 pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée –Vue en plan (Fond orthophotographie 2011, IGN©)----- 77

Figure 46 : Evènement de référence « cyclone Dina » : niveau d'eau maximal obtenu le long du profil 4.2 à Saint-André pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Profils en travers ----- 78

Figure 47 : Evènement de référence « cyclone Dina » : Limites de l'aléa fort le long du profil 4.2 pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée –Vue en plan (Fond orthophotographie 2011, IGN©)----- 78

Figure 48 - Caractéristiques du zonage changement climatique ----- 80

Figure 49 : Extrait de la carte de synthèse de l'historique de la submersion marine de la commune de Saint-André (cf. Annexe 3) ----- 82

Figure 50 : Extrait de la carte d'aléa submersion marine de la commune de Saint-André (cf. Annexe 4)----- 83

Figure 51 – Synthèse de la méthodologie utilisée par ARTELIA pour estimer l'aléa submersion marine----- 84

Figure 52 – Extrait des données topographiques utilisée pour l'étude ARTELIA ----- 86

Figure 53 – Extrait cartographique de l'aléa submersion marine de référence actuel sur le secteur de Bois-Rouge88

Figure 54 – Extrait cartographique de l'aléa submersion marine à échéance 2100 sur le secteur de Bois-Rouge 88

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evénements historiques majeurs survenus à La Réunion----- 12

Tableau 2 : Précipitations journalières décennales et centennales issues du GEDC, 1992 (en mm). Valeurs en gras correspondent à celles présentées dans la PRGI GRSJ (2009). ----- 31

Tableau 3 : Evolution de la population de Saint-André et de la densité moyenne (hab/km²) au cours du temps (Insee, 2018)----- 34

Tableau 4 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Saint-André (source : www.georisques.gouv.fr – Base nationale de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques - GASPARE - mise à jour 18/01/2019) ----- 40

Tableau 5 : Liste des cyclones, tempêtes tropicales et épisodes pluvio-orageux majeurs ayant concerné la commune de Saint-André. Sources : Météo France, firinga.com, archives diverses ----- 40

Tableau 6 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012) ----- 45

Tableau 7 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude)----- 54

Tableau 8 – Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées----- 55

Tableau 9 : Calculs de recul du trait de côte (référence 2017 – échéance 2100) par secteurs homogènes sur la commune de Saint-André----- 60

Tableau 10 : Valeurs 100Tx ; Lmax et Lr par secteurs homogènes pour la commune de Saint-André ----- 60

Tableau 11– Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude)----- 64

Tableau 12 – Références altimétriques maritimes pour la Pointe des Galets, 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) ----- 70

Tableau 13 - Niveaux marins retenus pour la simulation de submersion----- 72

Tableau 14 – Evènement de référence « cyclone Dina » : résultat du modèle SWAN au droit des deux profils à 50m de profondeur, avec correction d'incidence (Hs équivalent à une houle orthogonales à la côte) ----- 74

Tableau 15 – Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (Guide PPRL, MEDDTL, 2012 et DGPR, 2013) ----- 79

Préambule

Ce dossier est le **Plan de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) littoraux « submersion marine et recul du trait de côte » de la commune de Saint-André**. 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 1/10 000 ème (annexes 1 et 3) ;
 - une cartographie des aléas naturels (submersion marine et recul du trait de côte) à l'échelle du 1/5 000 ème sur l'ensemble du linéaire côtier (annexes 2 et 4) ;
 - une cartographie des équipements sensibles (enjeux) de la commune à l'échelle 1/10 000 ème (annexe 5).
 - Une cartographie réglementaire par prescription à l'échelle du 1/5 000 ème sur l'ensemble du linéaire côtier (annexe 6)
- ✓ les documents réglementaires :
 - la note de présentation, décrivant le territoire de Saint-André et les phénomènes naturels qui le concernent, ainsi que les règles méthodologiques adoptées.

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

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

Art 1^{er} – 1-3^e alinéa

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

1. Introduction

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

Saint-André, commune peuplée de 56 902 habitants (population recensée par l'INSEE en 2019), est affectée par des phénomènes d'érosion littorale et de submersion marine, comme en témoignent les cartes de phénomènes historiques (annexes 1 et 3 du dossier PPRL), impactant plus ou moins durement les hommes et les activités.

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

1.1. ORGANISATION DE LA GESTION DES RISQUES

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

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

1.2. PREVENTION DES RISQUES NATURELS

La politique de prévention des risques naturels a pris un essor particulier en France en 1994 suite à une succession d'événements catastrophiques ayant affecté depuis 1987 le territoire national. Il est apparu alors de manière évidente qu'un développement urbain mal maîtrisé pouvait aggraver considérablement les catastrophes, en particulier lorsque les zones exposées sont urbanisées.

L'extension urbaine peut même contribuer à les aggraver au travers d'aménagements hydrauliquement non-transparents et pouvant accentuer les effets des submersions marines (notamment en cas de rupture) ou accélérer les processus érosifs. Ces phénomènes sont largement constatés sur l'île de la Réunion qui subit régulièrement les effets dévastateurs des cyclones et houles australes et qui présente de fortes densités urbaines en zone littorale (cf. tableau des événements majeurs historiques présenté en 1.4). Les inondations consécutives à la tempête Xynthia de février 2010 en métropole l'ont également mis en exergue.

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

Les responsabilités et obligations du maire, en particulier en ce qui concerne l'information préventive des citoyens et les mesures de sauvegarde qui les concernent, sont définies par l'article L.125-2 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 indique 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-André les phénomènes de submersion marine et les phénomènes d'érosion côtière. La submersion marine est un phénomène tempétueux (ce qui exclut le tsunami qui a pour origine un phénomène sismique ou un glissement des fonds marins).

1.4. CATASTROPHES NATURELLES MAJEURES A LA REUNION

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

Tableau 1 : Evénements historiques majeurs survenus à La Réunion

2. Présentation du PPR

2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DU PPR

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

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

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

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

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

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

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

Objectif général de l'outil PPR

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

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

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

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

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

2.2. PROCEDURE REGLEMENTAIRE

2.2.1. Secteurs géographiques concernés

La procédure réglementaire est définie par les articles R.562-1 à R.562-9 du code de l'environnement. Le point de départ de la présente procédure d'élaboration du PPR est l'arrêté préfectoral de prescription n° 2016-02286 SG/DRCTCV en date du 18 novembre 2016 prorogé par arrêté préfectoral n°3446/SG/DCL/BU du 4 novembre 2019.

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

2.2.2. État des réflexions menées

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

- novembre 2014 : rapport de la caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du PPRL des communes Nord-Est de La Réunion ;
- 2 décembre 2014 : présentation des cartes d'aléas érosion trait de côte et submersion marine de la commune de Saint-André ;
- 8 juin 2015 : Notification du PàC Littoral (RTC et submersion marine) ;
- 18 novembre 2016 : Prescription de l'élaboration d'un PPR « recul du trait de côte » et « submersion marine » par arrêté préfectoral n° 2016-02286/SG/DRCTCV ;
- 4 novembre 2019 : Prorogation du délai d'approbation d'un PPR « recul du trait de côte » et « submersion marine » par arrêté n° 3447 SG/DCL/BU ;
- juillet 2020 - juillet 2022 : échange sur une étude concernant la détermination des aléas submersion marine du site de Bois Rouge ;
- 16 février 2023 : Présentation à la mairie et aux entreprises concernées de la cartographie actualisée de l'aléa submersion marine du site de Bois Rouge ;

- 14 mars 2023 : Porter à Connaissance actualisé des cartographies de l'aléa « submersion marine »
- du 27 avril au 26 mai 2023 inclus : organisation d'une phase de concertation avec le public sur le projet de cartographie des aléas littoraux, du zonage réglementaire et du règlement associé
- 4 septembre 2023 : Finalisation du projet PPR pour le lancement de la phase de consultation officielle avec les pièces écrites (note de présentation et règlement), les documents cartographiques (aléas et réglementaire) ainsi que les annexes.

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

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

Si le projet de plan contient des mesures de prévention des incendies de forêt ou de leurs effets ou des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde relevant de la compétence des départements et des régions, ces dispositions sont soumises à l'avis des organes délibérants de ces collectivités territoriales. Les services départementaux d'incendie et de secours intéressés sont consultés sur les mesures de prévention des incendies de forêt ou de leurs effets. Si le projet de plan concerne des terrains agricoles ou forestiers, les dispositions relatives à ces terrains sont soumises à l'avis de la chambre d'agriculture et du « Centre national » de la propriété forestière.

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

Les consultations officielles des différentes personnes publiques (commune, CIREST, ONF, Chambre d'agriculture, DAAF et CNPF) se sont déroulées du 2 octobre 2023 au 3 décembre 2023.

Le bilan de concertation établie pour le lancement de l'enquête publique est joint en annexe de la présente note de présentation. Ce bilan rappelle quelle a été la concertation menée tout au long des études d'élaboration du projet de PPRL qui s'achève après les consultations officielles.

2.2.3. Démarches à mener

Après cette phase de consultation, le dossier est soumis à une enquête publique puis approuvé conformément aux articles R. 562-7 et R. 562-9 :

« Art. R. 562-8 Le projet de plan est soumis par le préfet à une enquête publique dans les formes prévues par les articles R. 123-6 à R. 123-23, sous réserve des dispositions des deux alinéas qui suivent. Les avis recueillis en application des trois premiers alinéas de l'article R. 562-7 sont consignés ou annexés aux registres d'enquête dans les conditions prévues par l'article R. 123-17. Les maires des communes sur le territoire desquelles le plan doit s'appliquer sont entendus par le commissaire enquêteur ou par la commission d'enquête une fois consigné ou annexé aux registres d'enquête l'avis des conseils municipaux.

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

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

2.2.4. 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.

2.2.5. 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. »*

2.3. 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.

2.4. RESPONSABILITES

2.4.1. 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. »

2.4.2. Autorisation d'occuper le sol

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

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

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

3. Présentation de la commune

3.1. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1. Situation géographique

Saint-André se situe au nord-est de l'île de La Réunion. La commune s'étend sur la plaine nord-est du Piton des Neiges, allant des bordures du cirque de Salazie jusqu'à l'Océan Indien et s'inscrivant entre deux rivières majeures : la Grande Rivière Saint-Jean au nord et la Rivière du Mât au sud (Figure 1).

Cette commune possède une superficie de 54,37 km², soit environ 2 % de la surface totale de l'île de La Réunion.

Avec 56 902 habitants recensés en 2019 et une densité de 1072 habitants par km², la ville de Saint-André a observé, depuis le début des années 2000, une augmentation de sa population de l'ordre de 29 %. Celle-ci représente aujourd'hui 6,5 % de la population totale de l'île.

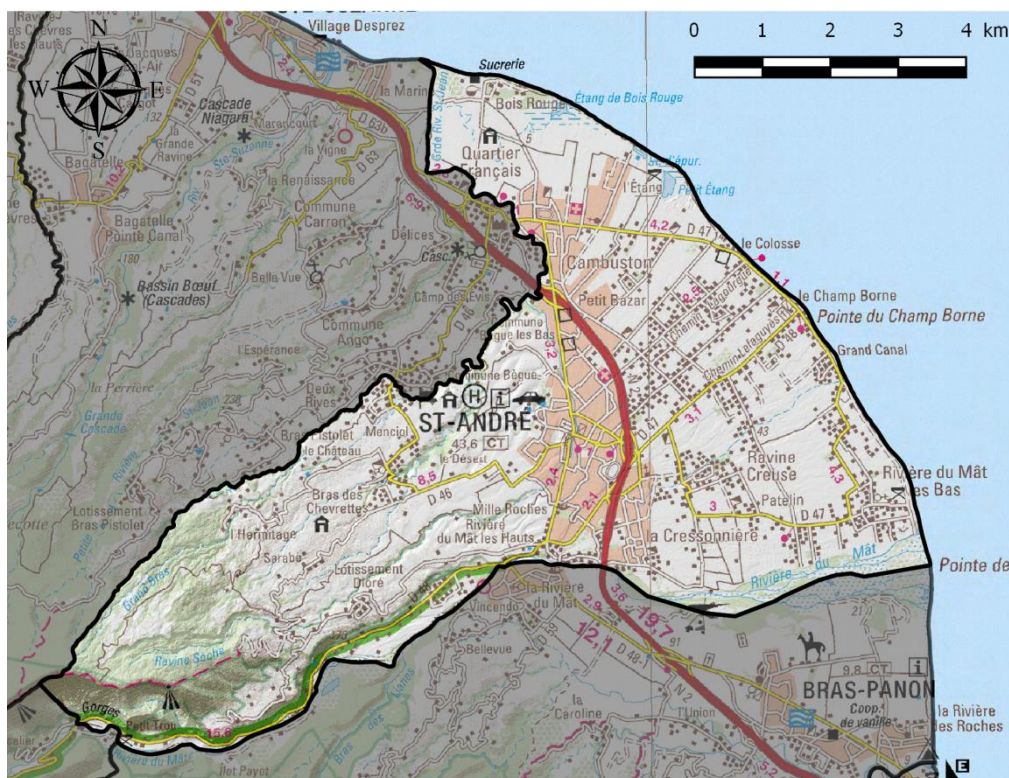


Figure 1 : Délimitation du territoire communal de Saint-André (Fond ©IGN scan100®-2010)

Le territoire de Saint-André s'étend selon un axe principal Nord-Est – Sud-Ouest et possède une forme de Y avec une largeur amont d'un peu moins de 2 km, une largeur aval au niveau de la façade littorale de 11,5 km et une longueur suivant un axe Nord-Est - Sud-Ouest d'environ 12 km.

Les limites communales sont essentiellement naturelles, avec :

- Au nord-est, la bordure littorale,
- au sud, la rivière du Mât,
- au nord-ouest, la Grande Rivière Saint-Jean,

- au sud-ouest, la crête du Cassé du cirque de Salazie.

La commune de Saint-André est limitrophe avec les communes de Sainte-Suzanne sur sa bordure nord-ouest, Salazie sur sa bordure sud-ouest et Bras-Panon sur sa bordure sud.

Saint-André fait partie de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST). Elle en est la plus grande commune.

3.1.2. Contexte géologique

La commune de Saint-André s’inscrit dans le contexte géologique du massif du Piton des Neiges. Ce massif se caractérise par des périodes d’activité éruptive importantes (épanchements de coulées de lave et/ou de mise en place de formations pyroclastiques), séparés par de longues périodes de calme au cours desquelles les roches massives et les dépôts pyroclastiques ont été soumis à l’érosion. Des vallées se sont formées, des reliefs se sont individualisés. Des dépôts alluvionnaires et des brèches de pente, de remaniement, ont comblé les dépressions. Lors de la reprise de l’activité volcanique, des coulées de lave se sont épanchées sur les flancs du massif volcanique en empruntant d’abord les vallées (Figure 2).

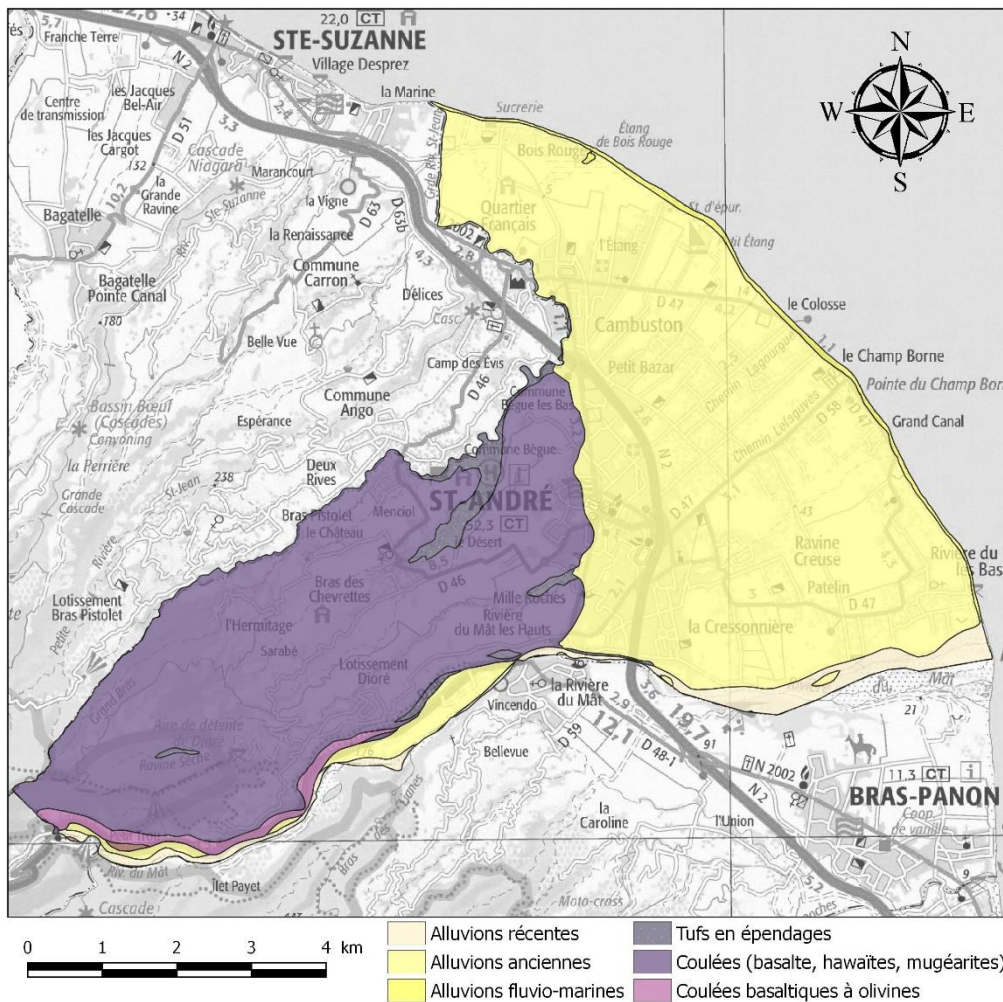


Figure 2 : Cartographie géologique de la commune de Saint-André d’après la carte géologique à 1/100 000 (BRGM, LGSR, 2006)

Les formations volcaniques

Les séries anciennes : Coulées basaltiques à olivine

En se référant à la carte géologique à l'échelle du 1/50 000 (Billard, 1975), au niveau de l'encaissement de la Rivière du Mât 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 confèrent une perméabilité faible.

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

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

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

Les séries récentes : Coulées basaltiques à feldspaths et andésites (β2)

Les formations plus récentes sont issues de la phase III et IV (entre 350 000 et 70 000 ans) de l'activité du massif du Piton des Neiges et constituent la grande majorité de la planèze de Saint-André. Ces phases sont caractérisées par des laves de plus en plus différenciées (porphyriques ou aphyriques) et par une augmentation de l'activité explosive du Piton des Neiges.

Malgré leur faible volume par rapport aux basaltes (inférieur à 10 %), ces produits différenciés viennent recouvrir les basaltes antérieurs et tendent à être surreprésentés en surface des planèzes, étant donné leur caractère plus récent. D'un point de vue pétrographique, il s'agit de leuco-basaltes (48 à 52 % de SiO₂) et d'andésites alcalines (hawaïtes, mugéarites). Un faciès particulier se distingue, en raison des phénocristaux de feldspaths plagioclases qui peuvent représenter jusqu'à 50 % de la roche (hawaïte). Ce faciès, localement connu sous le nom de « roche pintade », a une valeur de repère stratigraphique.

Ces formations se présentent généralement sous la forme d'empilements de bancs compacts de laves d'épaisseur métrique à décimétrique et de bancs de scories d'épaisseur métrique. L'altération de ces formations est comparable à celle des séries anciennes, mais reste moins intense.

Les séries récentes : Tufs en épandages (tf)

Dans l'encaissement des ravines majeures (Bras des Chevrettes, Ravine Sèche et Grande Rivière Saint-Jean), affleurent des formations pyroclastiques d'une épaisseur importante (plusieurs décimètres parfois). 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-André, on note la présence de différentes formations superficielles (alluviales et détritiques notamment). On distingue parmi elles :

Les formations alluviales :

- *des alluvions fluviales anciennes (Fy)*, elles constituent l'essentiel de la partie basse de la commune et représentent le cône alluvial ancien de la Rivière du Mât. Dans leur partie nord, ces alluvions rejoignent celles de la Rivière Sainte-Suzanne pour former le secteur de la Marine, à l'embouchure de la Grande Rivière Saint-Jean. Il s'agit d'alluvions de granulométrie variable (allant des silts aux blocs), principalement de nature basaltiques ou andésitiques, dont la taille peut atteindre le m³. On peut aussi y trouver des passées limono-sableuses, de poches argileuses, parfois interstratifiées avec des coulées boueuses indurées. L'épaisseur de ces alluvions est de l'ordre de la centaine de mètres. Elles présentent une perméabilité assez élevée (hormis les zones argileuses) et la nappe d'eau est proche de la surface en certains endroits.
- *des alluvions fluviales récentes (Fz)*, on les rencontre principalement dans le lit de la Rivière du Mât et de façon plus importante dans sa partie aval. Il s'agit d'un mélange hétérogène de sables fins à grossiers, de graviers, de galets et de blocs basaltiques et andésitiques dont la taille peut atteindre le m³. L'épaisseur de ces formations est variable. Elle peut atteindre plusieurs dizaines à centaine de mètres.
- *des alluvions fluvio-marines (Fm)*, comprenant des argiles, des silts, des limons, des sables et des galets basaltiques et andésitiques. Elles se concentrent essentiellement sur le littoral.

Les formations détritiques :

- *des dépôts de glissement en masse, de coulées de débris, des éboulis (E)*. On rencontre les éboulis (anciens ou récents) essentiellement au pied du rempart de la Rivière du Mât. Ils sont généralement constitués par un mélange hétérogène d'éléments fins et d'éléments grossiers de taille décimétrique à métrique. La pente des talus varie de 40 à 45°. Ce sont des dépôts de faible volume pour lesquels le mode de mise en place est principalement gravitaire. Leur épaisseur est très variable, allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres.

Les produits de l'altération ou les formations remaniées :

- *des colluvions*. Il s'agit de formes d'accumulation avec une matrice argilisée et comportant des blocs basaltiques généralement de taille réduite, issue d'anciens glissement (ponctuel ou en masse).
- *des altérites*. L'ensemble des séries volcaniques présente une altération météorique poussée (action des eaux en milieu tropical), qui a affecté la texture et la structure du matériel originel. L'altération qui se développe depuis la surface est plus ou moins développée (avec de fortes variations spatiales) mais peut descendre à plusieurs mètres de profondeur. Les coulées de lave et les matériaux pyroclastiques (scories, cendres) les plus anciens qui ont subi plusieurs cycles d'altération sont, de ce fait, plus altérés et des sols se sont développés à partir de ces formations géologiques.

3.1.3. Contexte géomorphologique littoral

Généralités

Le territoire communal s'organise en plusieurs entités morphologiques : la planèze (plateau volcanique incliné) couverte de forêts dans les Hauts, puis de champs de cannes à plus basse altitude ; le cône alluvial de la Rivière du Mât ; et le rempart longeant cette même rivière et qui remonte jusqu'à l'entrée du cirque de Salazie. Les particularités de ces entités ont des conséquences sur l'hydrologie de la commune.

- La **planèze** résulte des différentes phases d'épanchement volcanique du Piton des Neiges. Elle est limitée au sud par le rempart de la Rivière du Mât, et incisée de façon régulière par quelques ravines d'encaissement faible à moyen (10 à 80 m), ces dernières distinguant plusieurs sous-ensembles locaux (Dioré, ...). Les pentes sont relativement élevées dans les Hauts (20 à 60°) et souvent recouvertes par la forêt. En descendant en altitude, les pentes diminuent (de 5 à 20° hors ravines) et l'occupation des sols se dédie davantage à l'activité agricole (canne principalement) et à l'urbanisation.
- La **plaine alluviale** résulte des apports sédimentaires anciens de la Rivière du Mât. Elle se caractérise par des pentes relativement faibles (entre 0 et 5°) et se partage entre secteurs urbanisés et surfaces agricoles. Cette plaine concentre l'essentiel de la population, avec notamment la majeure partie du centre-ville et les nombreux secteurs résidentiels situés entre le centre-ville et le littoral.
- La **Rivière du Mât** se présente sous la forme d'un rempart en sortie du cirque de Salazie (pentes fortes, en moyenne, 50 à 75°), puis sous la forme d'alluvions récentes fréquemment remaniées lors des phénomènes de crues. Cette rivière se caractérise par des débits importants et un transport solide majeur, même à l'échelle de la Réunion, étant donné qu'elle constitue le seul exutoire pour tout le cirque de Salazie.
- La **zone littorale** entre la côte océanique et l'altitude 250 m environ, en grande partie dédiée à l'urbanisation et aux activités agricoles. D'une longueur d'environ 11 km, elle est limitée à l'est par l'embouchure de la rivière du Mât et à l'ouest par le cône alluvial de la Grande rivière Saint-Jean.

Le réseau hydrographique de la commune de Saint-André est très développé avec quatre ravines principales dont deux délimitent le territoire communal (Grande rivière Saint-Jean au nord et la Rivière du Mât au sud) et deux autres traversant respectivement les hauts et le centre-ville de la commune (Bras des Chevrettes et Ravine sèche) avant de se jeter dans la Grande rivière Saint-Jean (Figure 3).

Les ravines de Saint-André prennent leur source pour la plupart dans les hauts de la planèze et s'écoulent en direction de l'océan. Ce sont principalement des cours d'eau non permanents, c'est-à-dire qu'ils n'entrent en fonctionnement que lors des épisodes pluvieux et contribuent alors aux apports terrigènes (alluvions/colluvions) qui vont être remobilisés tout le long du littoral.

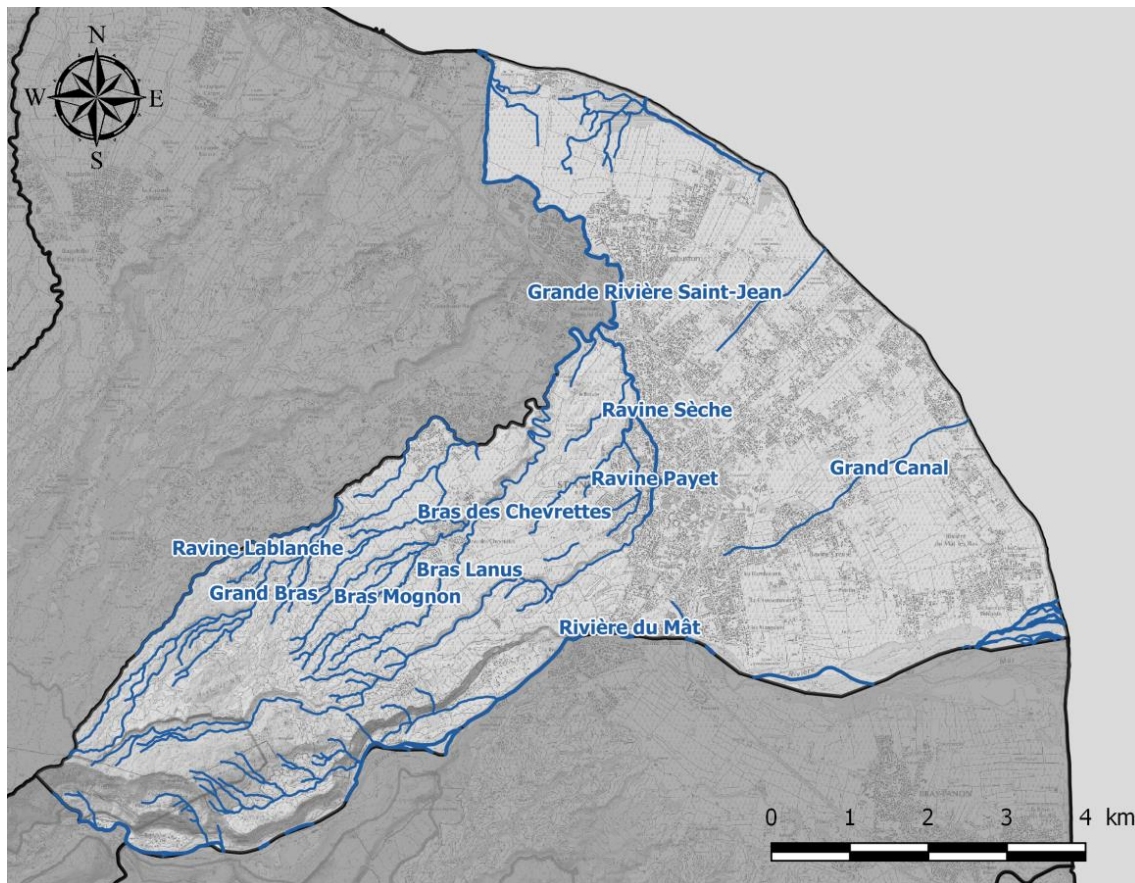


Figure 3 : Réseau hydrographique de la commune de Saint-André

Le secteur littoral est principalement occupé par d'anciennes plaines alluviales. Du fait de l'origine de ces terrains, ils sont associés à des altitudes basses et des pentes faibles. L'intégralité du front littoral est quant à lui constitué de formations alluvionnaires fluviomarines.

Faciès littoraux et dynamiques sédimentaires

Le littoral de Saint-André est situé sur la côte nord-est de la Réunion, et est donc soumis aux régimes d'alizés et ponctuellement exposé aux houles cycloniques. Ce littoral, long d'environ 11 km, est composé de différents faciès littoraux découpés en plusieurs secteurs du sud-est au nord-ouest (sens de la dérive littorale) présenté en Figure 4.

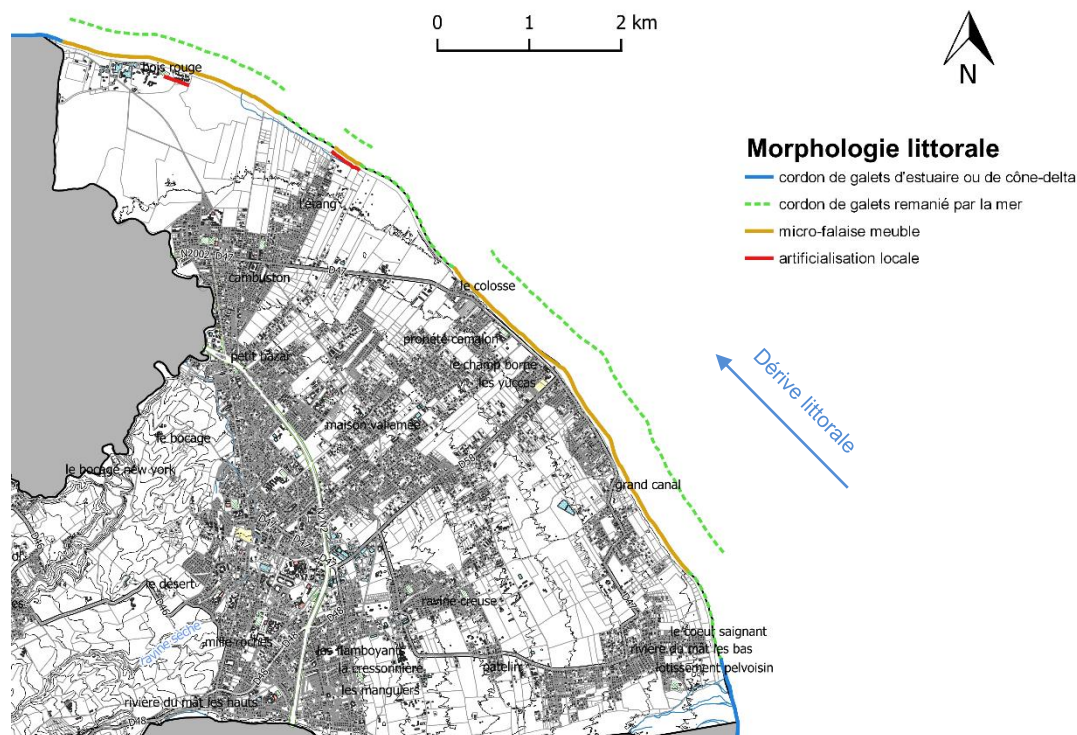


Figure 4 : Localisation des différents faciès littoraux présents sur la commune de Saint-André (BRGM, 2021)

- Le premier secteur constitue l'embouchure de la Rivière du Mât. Long d'environ 700 m, ce littoral est essentiellement constitué d'un cordon de galets de cône-delta composés d'alluvions fluviatiles récents. Ce secteur présente une dynamique morphologique très forte dépendante des apports sédimentaires du bassin versant et de leur remobilisation par les houles d'alizés et cycloniques ;
- Le secteur suivant, allant du quartier du Cœur saignant au quartier de Champ Borne, est constitué d'un cordon de galets, dont les sédiments proviennent essentiellement des apports sédimentaires de la Rivière du Mât et de la dérive littorale. Ce cordon littoral est principalement orienté est-nord-est et en grande majorité surplombé par des falaises meubles fortement impactées par la houle et les événements cycloniques. Cette zone constitue une zone urbaine importante de la commune ;
- Le secteur suivant concerne le quartier de Champ Borne jusqu'au quartier du Colosse. Cette portion du littoral présente la particularité d'avoir bénéficié d'apports anthropiques sous la forme de remblais notamment sur le quartier de Champ-Borne où l'impact des houles est particulièrement visible (Figure 5, gauche).
Il s'agit de l'un des secteurs les plus sensibles à l'érosion côtière de la commune de Saint-André et nécessite une attention particulière.



Figure 5 : A gauche : Photo de l'érosion du haut de plage au niveau du quartier de Champ-Borne ; **A droite** : Photo de l'opération de remblaiement effectuée par la commune aux abords du restaurant « Beau Rivage ».

- Le secteur suivant, long d'environ 3.7 km, s'étend du quartier du Colosse jusqu'au quartier de Bois Rouge. Tout comme le reste de la commune, ce secteur est principalement composé de cordons de galets remaniés par la mer et surplombé de microfalaises meubles en haut de plage. Il s'agit en grande majorité d'un littoral naturel comprenant le petit étang à proximité du Parc du Colosse et la réserve naturelle de Bois Rouge pouvant être soumis à des submersions marines en période cyclonique.
- Le dernier secteur s'étend de Bois Rouge jusqu'à l'embouchure de la grande rivière Saint-Jean à l'extrême nord-ouest de la commune de Saint-André. Composé de cordons de galets remaniés par la mer, surplombé de microfalaises meubles et végétalisées (Figure 6, droite). Il s'agit d'un secteur à forts enjeux dû à la présence de l'usine sucrière en bordure de littoral (Figure 6, gauche).



Figure 6 : A gauche : Photo de l'usine sucrière de Bois Rouge ; **A droite** : Photo de la plage de galet située au-devant de l'usine sucrière de Bois-Rouge.

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-André située dans l'est de l'île, est directement exposée et se retrouve sur la côte dite « au vent ».

Pluviométrie

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 « au vent », la commune de Saint-André affiche des valeurs de pluviométrie importantes. Les précipitations moyennes annuelles dans le secteur de Saint-André sont importantes, comprises entre 2 500 mm sur le littoral est et un peu moins de 4 000 mm au niveau du Pont de l'Escalier à la limite communale avec Salazie (Atlas climatique de la Réunion, Météo France, Figure 7).

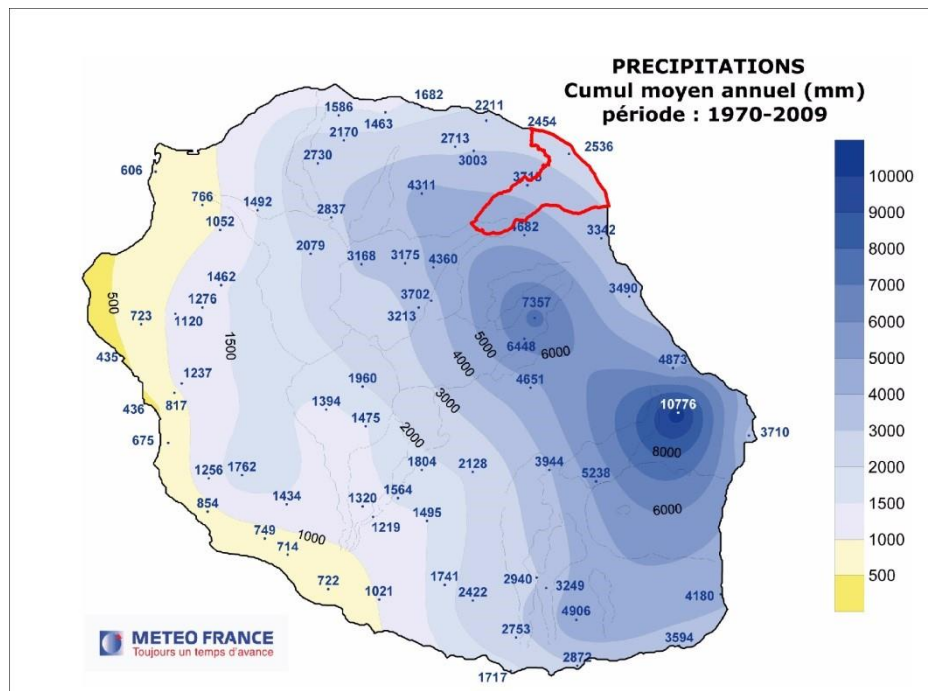


Figure 7 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)

Météo France Réunion a réalisé une carte de zonage pluviométrique en 2010, tenant compte du relief (Figure 7), qui qualifie les secteurs soumis à un régime pluviométrique similaire à proche. La commune de Saint-André est concernée par la région 5 qui regroupe la partie nord-est de l'île, de Sainte-Suzanne à Saint-Benoît. Cette région est très humide tout au long de l'année en lien avec

son exposition directe aux alizés de secteur est, et plus particulièrement lors de la saison des pluies, de novembre à avril. Les cumuls de précipitation peuvent atteindre plus de 4000 mm/an.

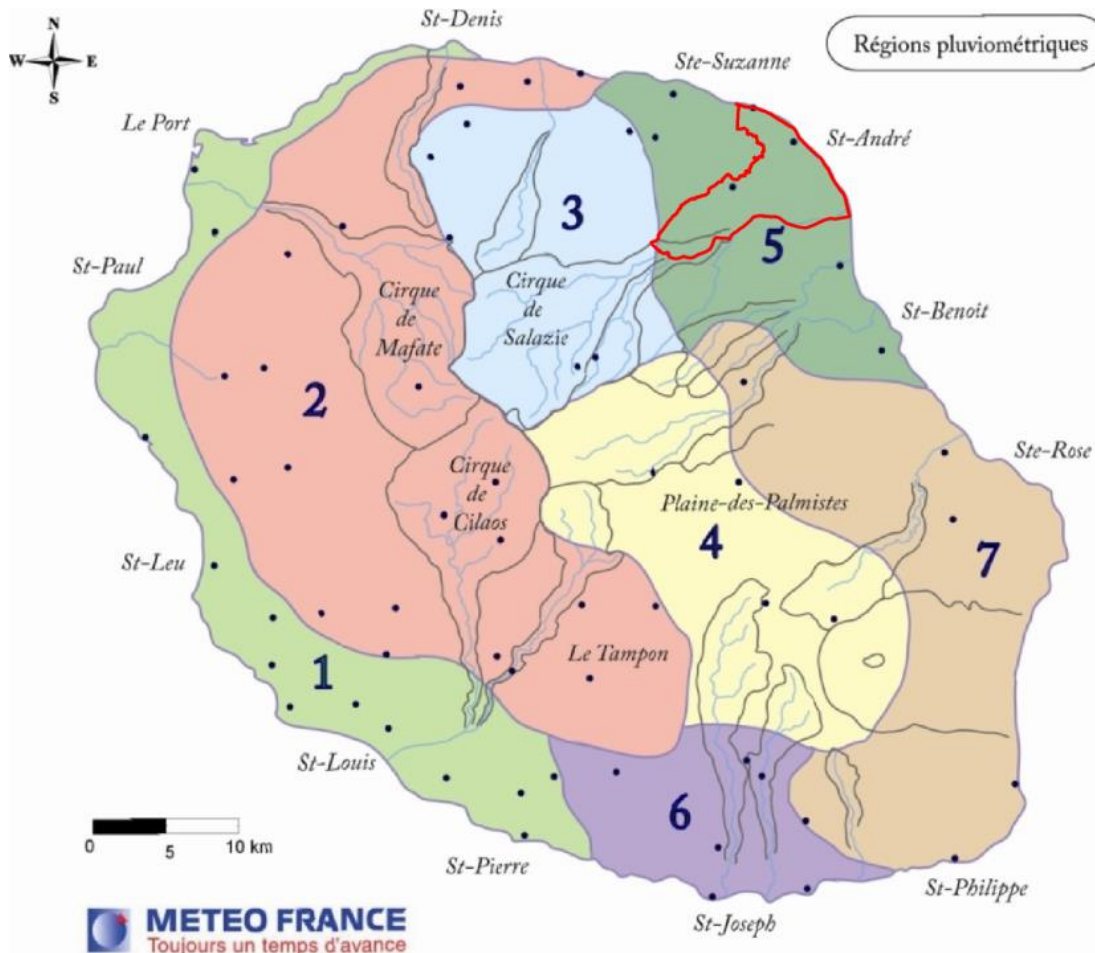


Figure 8 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)

Concernant les stations météorologiques, trois stations sont installées et suivies sur le territoire de Saint-André, auxquelles on peut ajouter trois autres stations fermées aujourd'hui.

Le suivi de ces données par Météo France permet ainsi de caractériser la pluviométrie à l'échelle du territoire communal (Figure 9). Les stations météorologiques concernées sont les suivantes :

- Bois-Rouge (altitude : 3 m, installée en 1952) ;
- Le Colosse (altitude : 16 m, installée en 1957) ;
- Menciol (altitude : 181 m, installée en 1953) ;
- Saint-André Terre Rouge (altitude : 95 m ; ouverte en 1965 et fermée en 1988)
- Ravine Creuse (altitude : 80 m ; ouverte en 1953 et fermée en 1970)
- L'Etang Cambuston (altitude : 10 m ; ouverte en 1971 et fermée en 2000)

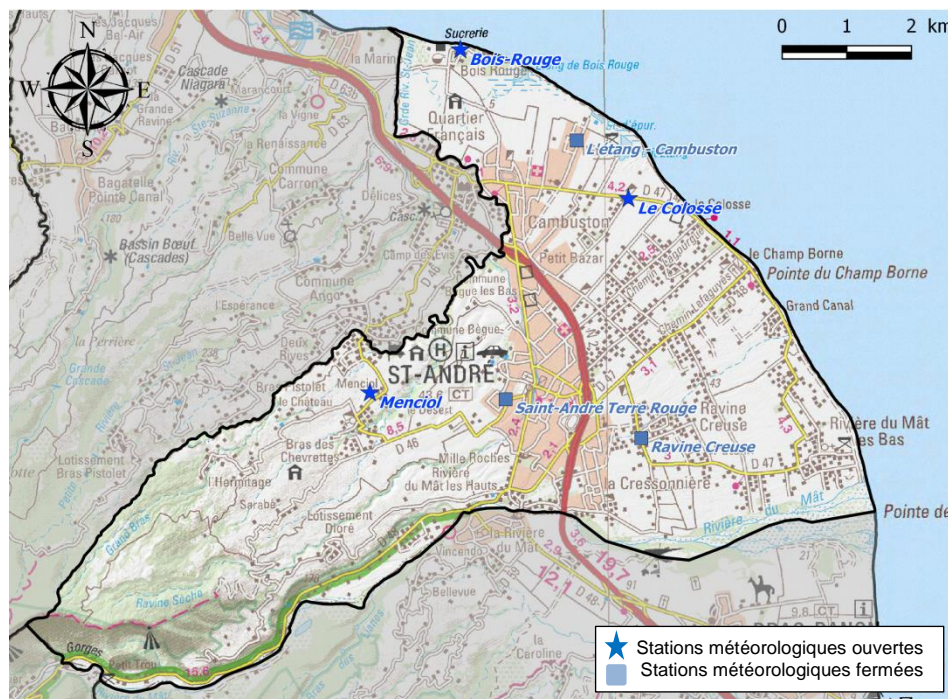


Figure 9 : Localisation des stations météo à proximité de Saint-André (©IGN Scan100® - 2010)

Le GEDC (Guide d'Estimation des Débits de Crues de la Réunion de 1992), propose, à partir d'une analyse statistique, des valeurs de pluies journalières décennales et centennales pour les stations suivies avec respectivement de 10 à 25 ans de mesures.

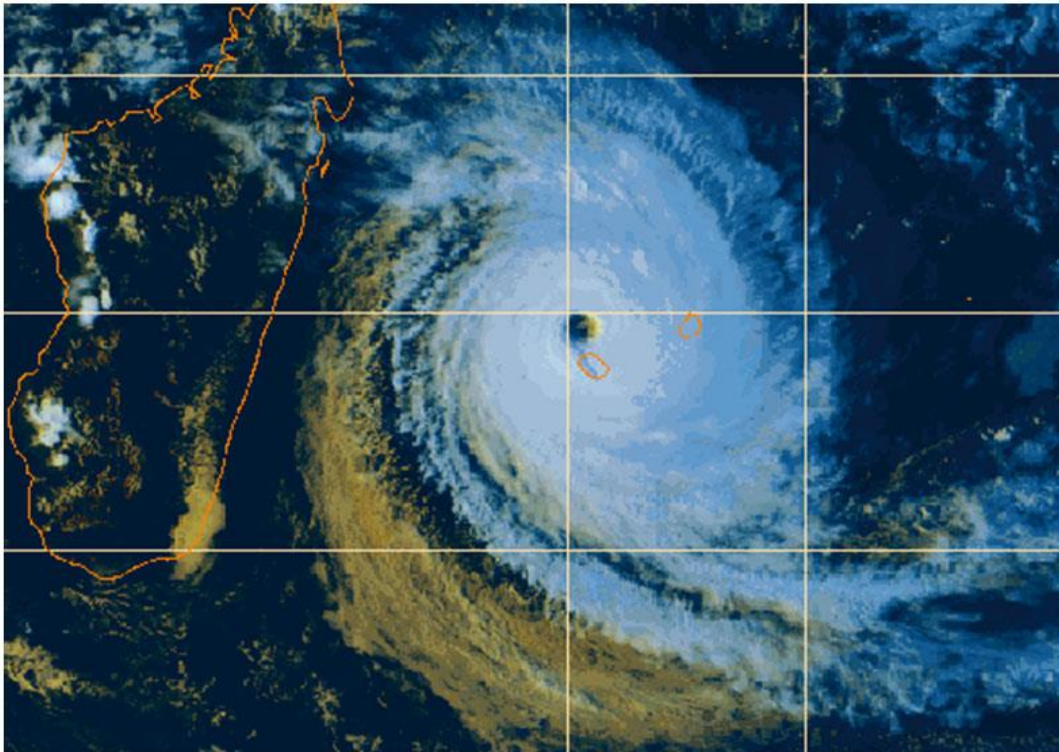
Les valeurs caractéristiques pour quelques stations représentatives de Saint-André sont présentées dans le Tableau 2 :

Nom station	Altitude (m)	Pluie Journalière Décennale (PJ ₁₀ en mm)	Pluie Journalière Centennale (PJ ₁₀₀ en mm = 1.6* PJ ₁₀)
Bois-Rouge	3	255 (241)	408 (349)
Le Colosse	16	274 (247)	438,4 (358)
Menciol	181	362 (355)	579,2 (514)
Saint-André Terre Rouge	95	322 (314)	515,2 (454)
Ravine Creuse	80	294	470,4
L'étang Cambuston	10	329	526,4

Tableau 2 : Précipitations journalières décennales et centennales issues du GEDC, 1992 (en mm). Valeurs en gras correspondent à celles présentées dans la PRGI GRSJ (2009).

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 10 et Figure 11), soit par l'Est de La Réunion.



*Figure 10 - 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, le scénario est donc majorant puisque la côte Nord de l'île passe dans le 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 impacté la quasi-totalité de l'île reste Gamède (février 2007), et ce en contournant La Réunion par le Nord-ouest. La difficulté de prévision de sa trajectoire s'est par ailleurs fait ressentir. Après être passé au Nord de l'île, ce dernier est en effet resté stationnaire plusieurs jours avant de se rapprocher de nouveau de l'île, générant de fortes précipitations, un important vent de Nord-Ouest et une houle destructrice en continu sur les façades Nord et Ouest.

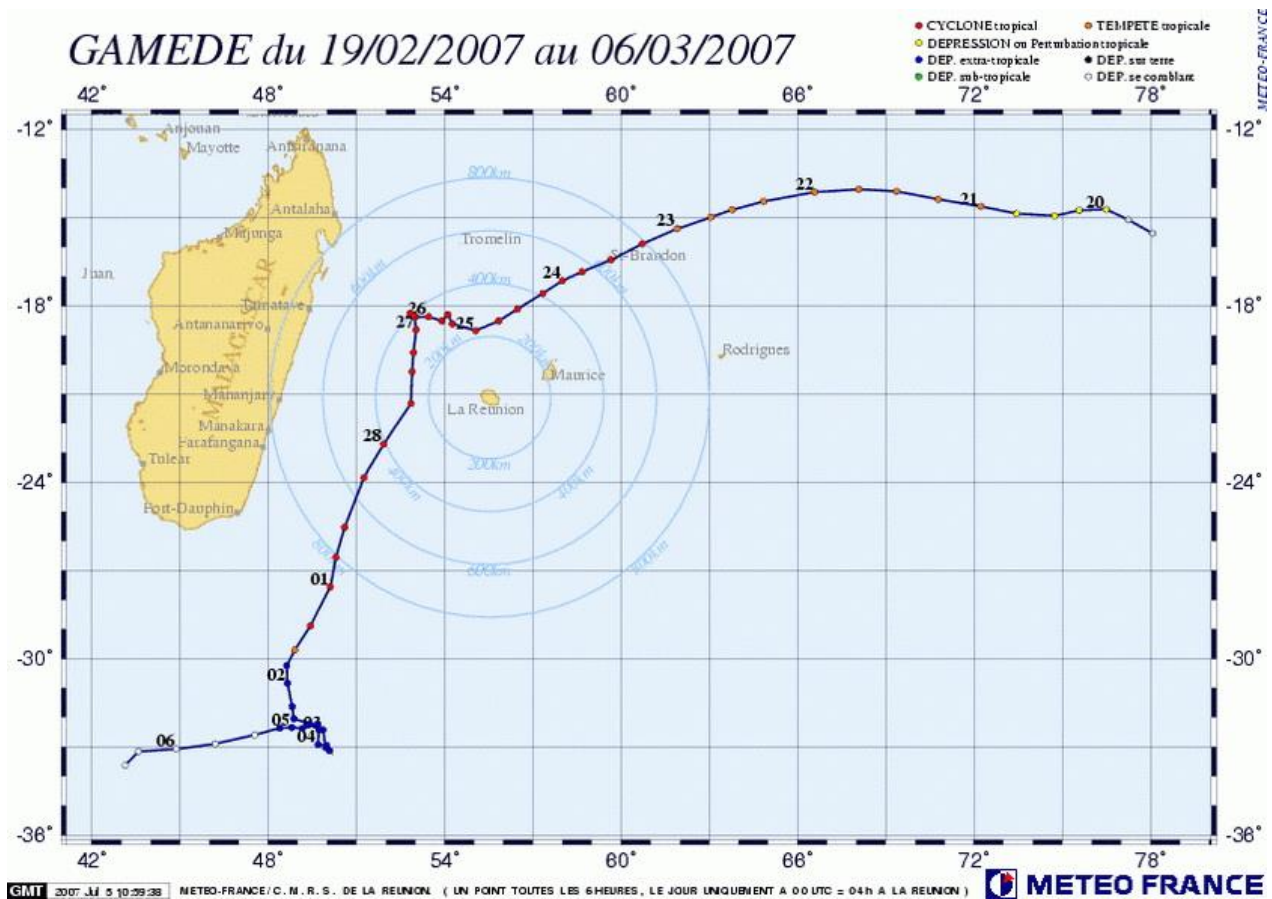


Figure 11 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)

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 quelque peu ressentir ces dernières décennies, bien que des cyclones tels que Clotilda (1987), Firinga (1989), Dina (2002), Gamède (2007) ou Béjisa (2014) aient engendré des dégâts considérables sur les biens et les personnes. Les événements les plus récents tels que les tempêtes tropicales de 2018, Berguitta et Fakir montrent bien encore une fois la vulnérabilité du territoire face à ces phénomènes.

Les houles

La commune de Saint-André n'est soumise qu'à l'influence cyclonique estivale ainsi qu'aux houles d'alizés et n'est en revanche pas concernée par les houles australes de Sud-Ouest. Si les houles d'Alizés ne sont pas assez énergétiques pour générer des dégâts le long du littoral, elles contribuent à la dynamique sédimentaire en créant une dérive littorale dominante orientée du sud-est vers le nord-ouest. Les houles cycloniques quant à elle en fonction de la trajectoire et de l'intensité du cyclone peuvent avoir différents effets, agir comme les houles d'Alizés, modifier la dérive littorale ou générer d'importants dégâts (cf. Figure 12).

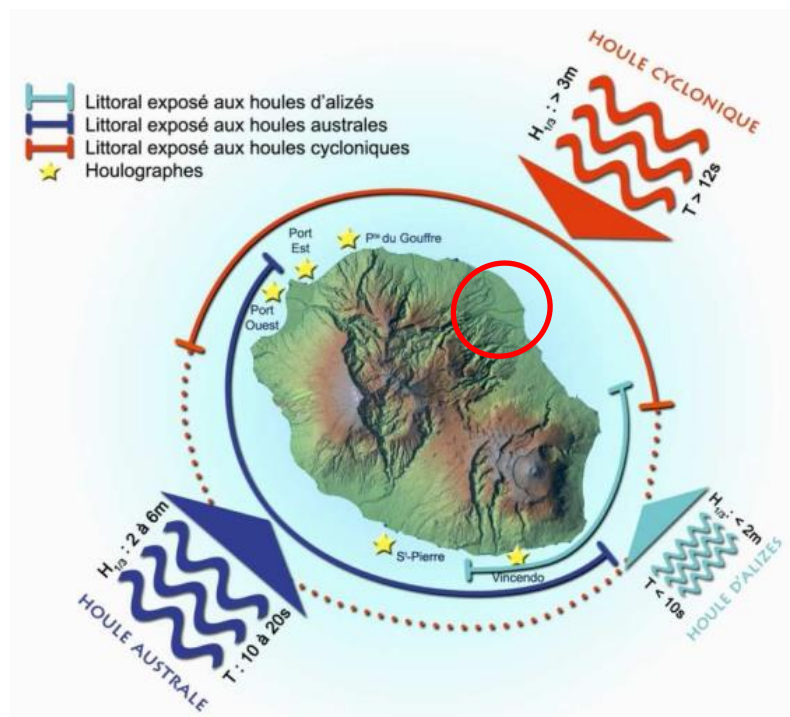


Figure 12 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).

3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE

Évaluée à 19 255 personnes en 1961, la population de Saint-André a augmenté de façon régulière jusqu'au milieu des années 2000. Depuis 2006, la population continue à augmenter, mais de façon moins importante. En 2016, Saint-André compte 56 088 habitants (correspondant à un accroissement démographique de près de 85 % en un peu plus de 30 ans, Figure 13).

La densité démographique en 2015 était de 1050 hab./km², contre 363 hab. /km² sur l'ensemble de l'île de La Réunion (Tableau 3).

Année	1961	1967	1974	1982	1990	1999	2006	2007	2008	2010	2012	2015
Nombre d'habitants	19255	22094	25231	30075	35049	43174	51817	51964	52956	53955	54721	55730
Densité moyenne (hab/km ²)	363	416	475	567	660	814	976	979	998	1017	1031	1050

Tableau 3 : Evolution de la population de Saint-André et de la densité moyenne (hab/km²) au cours du temps (Insee, 2018)

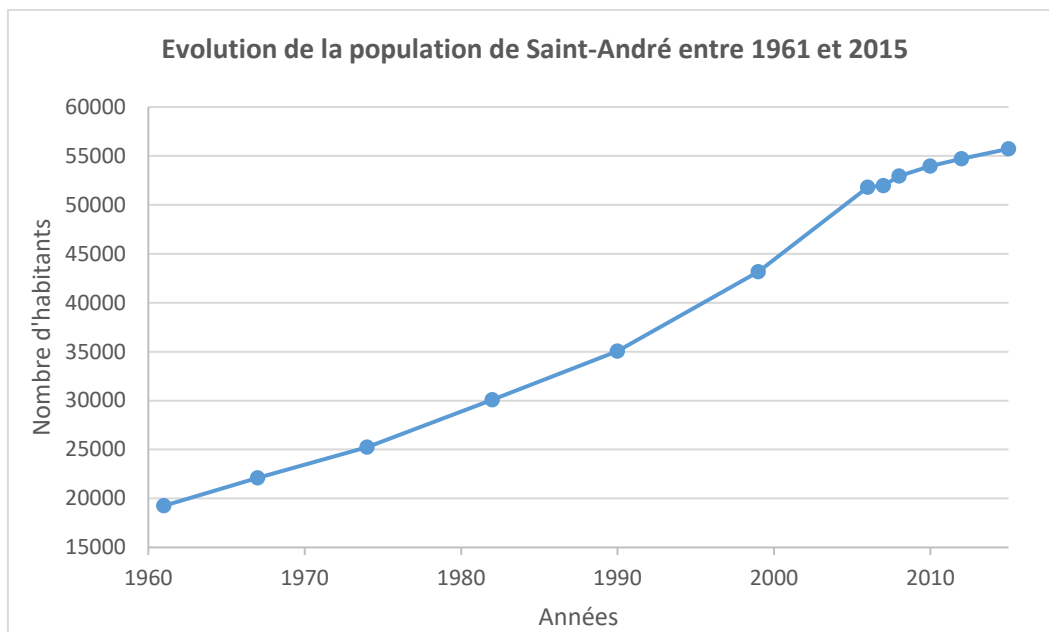


Figure 13 : Evolution de la population de la commune de Saint-André (source : INSEE)

La commune de Saint-André se divise en plusieurs secteurs d'habitation dont le plus important se concentre autour de la Ravine Sèche et de la RN 2. Il s'étend de la limite communale avec Sainte-Suzanne au nord à celle avec Bras-Panon au sud (Cambuston, Petit Bazar, centre-ville, Cressonnière).

D'autres zones plus ou moins urbanisées correspondent (liste non exhaustive) :

- aux secteurs de Champ-Borne, Ravine Creuse, Rivière-du-Mât-les-Bas, situés entre le secteur urbain majeur et la bordure littorale ;
- aux secteurs de Rivière-du-Mât-les-Hauts, l'Îlet, Bras-Citronnier et Petit-Trou, situés en rive gauche de la Rivière du Mât, de l'aval vers l'amont ;
- au secteur Bras-des-Chevrettes ;
- aux secteurs Menciol et Mon Repos ;
- aux lieux-dits « Le Château », « Bras-Mousseline », « L'Hermitage », « Sarabé », et « Lotissement Dioré ».

Le parc de logement s'établissait en 2015 à 21098 unités (constitué à 91 % de résidences principales), soit une augmentation de 15 % depuis 2010 illustrant une très forte pression foncière existant sur la commune de Saint-André.

Les principaux enjeux répertoriés et cartographiés dans le PPR de Saint-André (annexe 5 du présent dossier) sont les suivants :

- la zone industrielle de Bois-Rouge, avec l'usine sucrière, la centrale thermique et divers industriels ;
- les services de sécurité et de secours (gendarmerie, caserne de pompiers, hôpitaux et centres de soins, etc.) ;
- les espaces communaux, les Z.A.C., les zones d'insalubrité (R.H.I.) ;
- les voies de circulation (RN 2, RN 2002, RD 46, RD 47, RD 48, RD 58, Avenue Ile de France) ;
- le réseau d'Adduction d'Eau Potable (captages, stations de traitement) ;

- les installations classées soumises à autorisation ;
- les établissements d’enseignement (écoles, collèges, lycées) ;
- les bâtiments administratifs (mairies principales et annexes, etc.) ;
- les autres établissements recevant du public (lieux de culte, maisons de retraite, etc.) ;
- les sites et services touristiques (gîtes, campings, etc.) ;
- les zones agricoles (plantations de cannes à sucre).

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 localisés sur un document cartographique figurant en annexe à ce dossier et présentés en Figure 14.

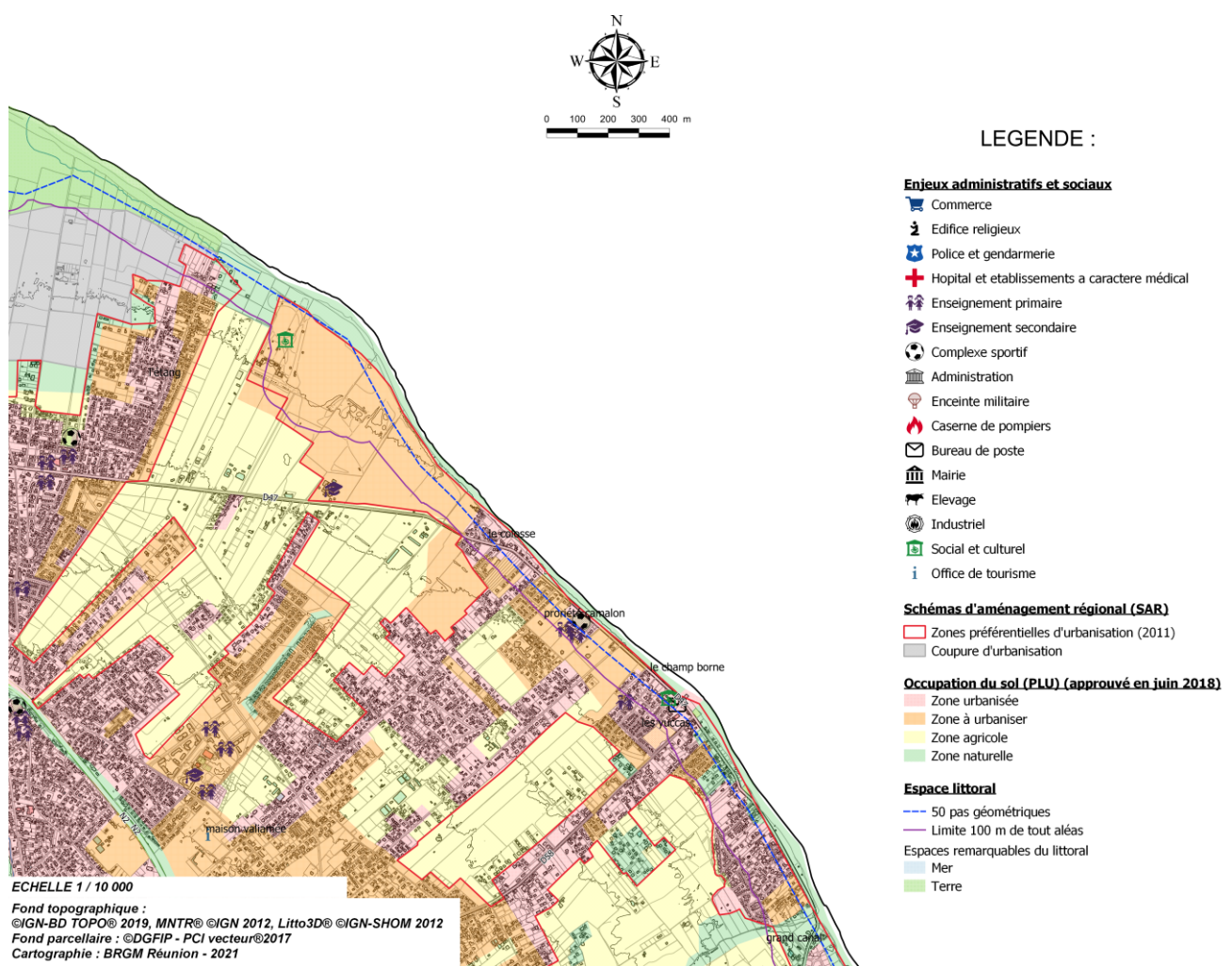


Figure 14 : Extrait de la cartographie des enjeux du littoral de la commune de Saint-André (Annexe 5)

4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels

4.1. PHENOMENES HISTORIQUES

L'ensemble des événements recensés ayant affecté par le passé le territoire communal de Saint-André est reporté en annexes 1 et 3 (cartes des phénomènes historiques érosion et submersion marine). Cette connaissance historique est principalement issue de l'analyse d'archives, notamment de la revue de presse de la DDE « Saint-André dans la tourmente », d'articles de journaux et d'enquêtes de terrain réalisées en mai 2013.

Cyclone de février 1874

« Dans la nuit du 27 au 28, par le calme le plus profond, une petite trombe venant de la mer a franchi les pas géométriques dans les environs de la Ravine-Creuse, et a enlevé sur son passage deux cases de pauvres gens, et a fait sentir son action sur les arbres et les plantations jusqu'à 5 ou 600 mètres à l'intérieur des terres. » Rapport au Directeur de l'Intérieur, 4 février 1874

Cyclone de Février 1892

« Les cabanons des engagés de cet établissement ont été fortement endommagés. Le raz de marée a été violent, les lames ont pénétré même jusqu'aux camps, enlevées leurs toitures en tuiles. Les hommes ont perdu tous leurs animaux ; le pont de cette marine a été enlevé par la force de la mer (...) ». Rapport au Directeur de l'Intérieur, 21 février 1892.

Cyclone de Mars 1904 :

« Le raz de marée existe de la Possession à Sainte-Rose, les lames deviennent de plus en plus énormes, et menacent de tout enlever bientôt si elles grossissent encore ».

« Dans la partie du Vent, on signale de nombreux remblais emportés par la mer. Sans communication régulière, on ignore si les ponts n'ont pas souffert ».

« Au Bois-Rouge, la mer a transporté d'énormes galets jusque dans l'usine, le pavillon de l'employé situé en avant de l'établissement a eu la porte enfoncée par la mer, et c'est par la fenêtre qu'a pu s'échapper l'employé ». Le journal de l'île de la Réunion, 25 mars 1904.

Cyclone de Février 1932 :

« Les écuries de Bois-Rouge, ainsi qu'un pan de mur de la distillerie, ont été enlevés par la mer. Un grand garage nouvellement bâti (...) a été écrasé ». Les Feuilles Hebdomadaires, 14 février 1932.

Cyclone d'Avril 1944 :

« Le cimetière a été envahi par la mer et le village est presque détruit ». Le Progrès, 13 avril 1944.

Cyclone de Février 1948 :

« L'usine de Bois-Rouge a été, comme en 1945, très sévèrement atteinte par la mer et la violence des vents ». Le Progrès, 2 février 1948.

Cyclone JENNY 1962 :

« Mairie sinistrée, toiture enlevée. Dégâts considérables aux habitations. Un wagon vide, avec roues bloquées par caillebotis a été poussé sur les rails jusqu'au pk 13.700 et renversé. Au Champ-Borne, plusieurs cases emportées par la mer ». JIR, 2 mars 1962.

Cyclone CLOTILDA 1987 :

« Le nombre d'interventions des pompiers seuls – 150 – donne la mesure de celui des familles gravement touchées par les inondations. Celles-ci furent particulièrement graves à Champ-Borne, Rivière-du-Mât les Bas, Ravine-Creuse et Dioré. Quant au Chemin Maunier, on aurait pu y circuler en barque au plus fort du passage Clotilda ». Le Quotidien, supplément spécial Clotilda, 1987.

Cyclone COLINA 1993 :

« Tout le littoral de Champ-Borne a été dévasté par la mer, seuls quelques pieds de vacoas ont résisté aux assauts de Colina. Les vagues ont emporté une partie de Beau-Rivage... » Le Réunionnais, 21 janvier 1993.

« Mais c'est à Champ-Borne que Colina a frappé le plus spectaculairement. La mer déchaînée s'est acharnée toute la nuit sur les remblais, et au petit matin, on découvrait le restaurant « Le Beau Rivage », situé juste face à la mer, dans un triste état. Les déferlantes, qui avaient gagné sur près de 10 mètres de plage de galets et près de trois mètres d'élévation, avaient littéralement dévasté l'avant de l'établissement, situé juste à côté des ruines de l'église de Champ-Borne, détruite par le tristement cyclone Jenny en 1962 ». Le Quotidien, 21 janvier 1993.

Les événements survenus sur le littoral de Saint-André ont été recensés par une enquête de terrain dont les témoignages ont été recoupés avec les brochures de presse (Figure 15).

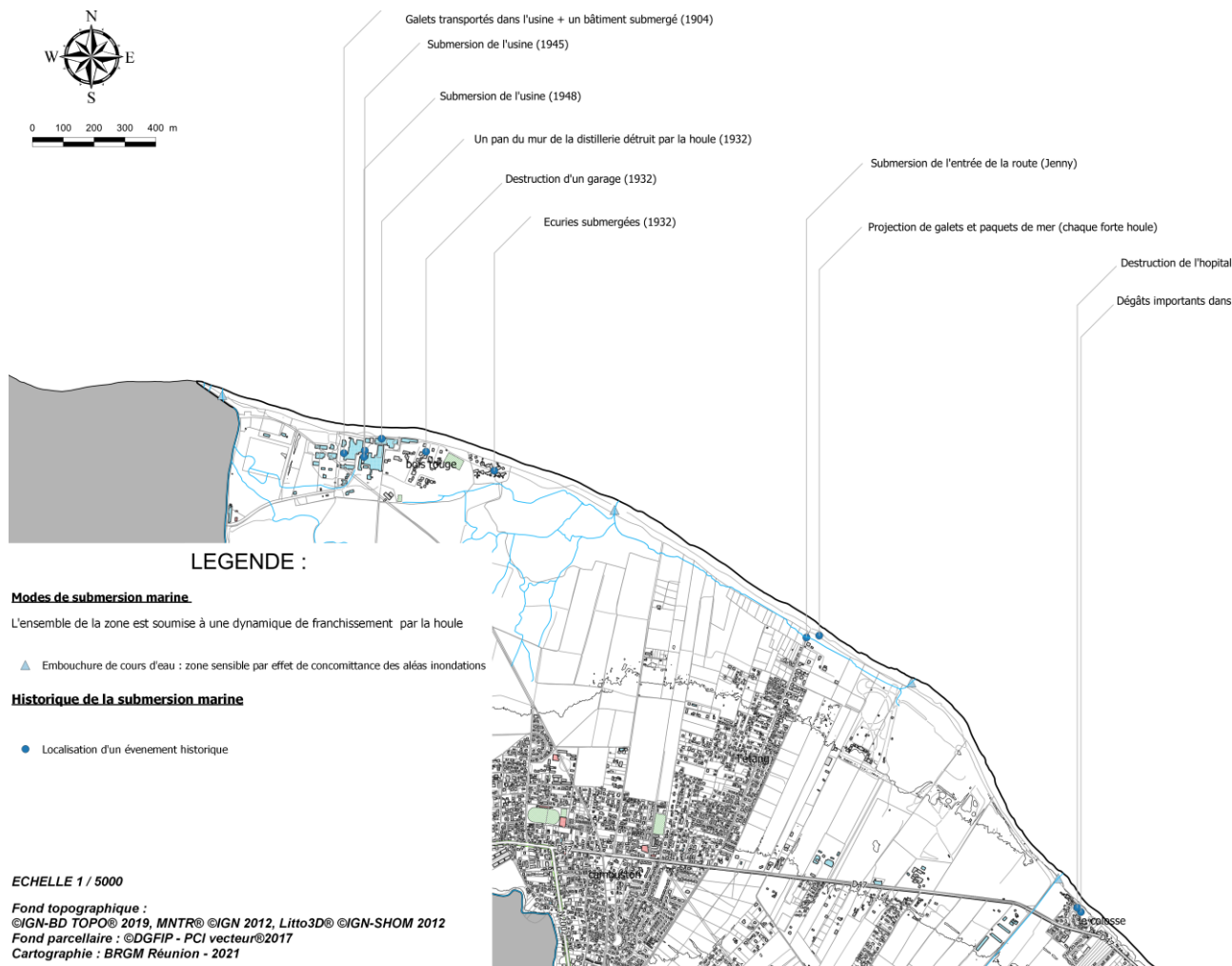


Figure 15 : Extrait de l'annexe 3 « Carte de synthèse des modes de submersion et des données historiques de l'aléa submersion marine » de la commune de Saint-André.

4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES

Depuis 1993, 10 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur la commune. Le tableau ci-après en présente la liste dont 3 imputables aux problématiques littorales.

Type de catastrophe	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
<i>Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues</i>	18/01/1993	20/01/1993	18/05/1993	12/06/1993
<i>Inondations et coulées de boue</i>	15/02/1993	17/03/1993	07/10/1993	24/10/1993
<i>Inondations et coulées de boue</i>	27/02/1993	03/03/1993	14/06/1993	27/06/1993
<i>Inondations et coulées de boue</i>	10/02/1994	12/02/1994	12/04/1994	23/04/1994
<i>Inondations et coulées de boue</i>	24/02/1998	25/02/1998	26/05/1998	11/06/1998
<i>Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues</i>	22/01/2002	23/01/2002	08/04/2002	18/04/2002

<i>Inondations et coulées de boue</i>	22/01/2002	23/01/2002	08/04/2002	18/04/2002
<i>Mouvements de terrain</i>	22/01/2002	23/01/2002	08/04/2002	18/04/2002
<i>Inondations et coulées de boue</i>	16/02/2005	18/02/2005	02/08/2005	10/08/2005
<i>Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues</i>	24/02/2007	28/02/2007	23/03/2007	28/03/2007

Tableau 4 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Saint-André (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-André (Tableau 5). D'autres informations d'archives et bulletins météorologiques complètent ces informations, couvrant une période plus large (1948 à 2016). Les cyclones majeurs ayant eu peu d'influence sur la commune de Saint-André n'ont pas été considérés (Béjisa, Dumile, etc.).

Cyclones	Nature du phénomène	Passage au plus près des côtes réunionnaises	Pression minimale (hPa)	Vents maximum (km/h)	Hauteur de houle
Abela (12/07 – 20/07/2016)	Forte tempête tropicale	-	987	130 (en mer)	-
Daya (07/02 – 13/02/2016)	Tempête tropicale modérée	375 km au Nord	983	100 (en mer)	-
Jade (03/04 – 12/04/2009)	Forte tempête tropicale	450 km au Sud-Ouest	948	170 (en mer)	-
Gamède (23/02 – 28/02/2007)	Cyclone tropical intense	230 km au Nord et à l'Ouest ; deux passages	935	137 (au Port)	H _{1/3} : 7 m et H _{max} : 11,7 m à la Pointe du Gouffre
Diwa (02/03 – 11/03/2006)	Forte tempête tropicale	150 km au Nord-Ouest	980	> 190 à Sainte-Rose	-
Dina (17/01 – 26/01/2002)	Cyclone tropical intense	65 km au Sud-Ouest	910	> 180 (sur le littoral)	H _{1/3} : > 4,2 m et H _{max} : > 6,3 m à la Pointe du Gouffre
Fortes pluies (03/02 – 05/02/1998 et 19/02 – 25/02/1998)	Episode pluvio-orageux	D2 : 160 km à l'Ouest	-	100	-
Fortes pluies (13/02 – 17/02/1993 et 27/02 – 05/03/1993)	Episode pluvio-orageux	-	-	-	-
Colina (14/01 – 21/01/1993)	Cyclone tropical	Sur l'île, le 19 Janvier	970	191 (à Gillot)	H _{1/3} : 6,1 m et H _{max} : 9,4 m à Sainte-Marie
Firinga (25/01 -07/02/1989)	Cyclone tropical	Sur l'île, le 29 Janvier à Saint-Benoît, ressort au niveau du Port	954	216 (à Terre-Sainte)	-
Clotilda (09/02 – 22/02/1987)	Dépression tropicale	Sur l'île, le 13 Février	970	173 (à Gillot)	H _{1/3} : 2,28 m au Port-Ouest
Hyacinthe (15/01 – 30/01/1980)	Cyclone tropical	70 km au Sud ; 3 passages	978 (au Port)	137 (à Gillot)	-
Fifi (29/01 – 05/02/1977)	Cyclone tropical	130 km à l'Ouest	958 (au centre)	97 (à Gillot)	-
Inès (08/03 – 19/03/1975)	Tempête tropicale modérée	50 km au Nord	988 (au centre)	115 (en mer)	-
Denise (03/01 – 11/01/1966)	Cyclone tropical	Sur l'île, dans la nuit du 8 au 9 Janvier	978 (à Gillot)	180 (au Chaudron)	-
1948	Cyclone tropical très intense	30 km à l'Ouest	910 (au centre)	310 (en mer)	-

Tableau 5 : Liste des cyclones, tempêtes tropicales et épisodes pluvio-orageux majeurs ayant concerné la commune de Saint-André. Sources : Météo France, firinga.com, archives diverses

4.3. CARACTERISATION DES ALEAS LITTORAUX

4.3.1. Aléa recul du trait de côte (RTC)

Considérations générales sur l'aléa RTC

D'après le guide national pour l'élaboration des PPRL¹, 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 (cf. Figure 16) :

- Les facteurs météorologiques : précipitations et vent (météorisation) ;
- Les facteurs hydrodynamiques : marée, houle (couple période/hauteur), surcote atmosphérique et surcote liée au déferlement des vagues à la côte ;
- 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.

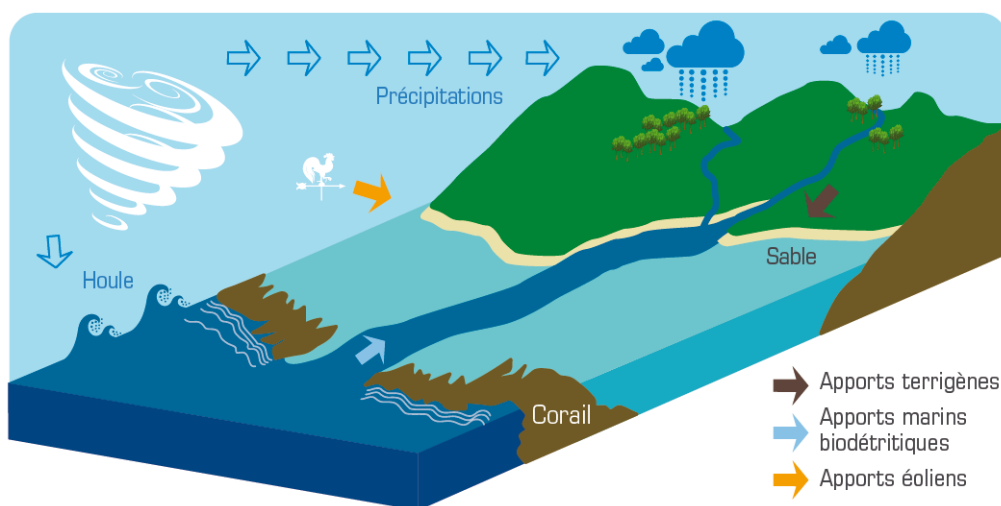


Figure 16 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

¹ 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 correspondant au secteur de dynamique sédimentaire cohérente. La cellule délimite un tronçon de littoral le long duquel les dynamiques sont comparables (sens des courants, dynamique dans les petits fonds). La cellule hydro-sédimentaire définit par ailleurs le sens de transit et donc la redistribution des sédiments le long de la plage (Sud-est/Nord-ouest à Saint-André). Ses limites dépendent généralement :

- 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., cf. Figure 17).



Figure 17 – Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012)

Tel que défini dans le cadre de l'élaboration de ce 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 (cf. Figure 18). Cette accélération des phénomènes est liée à la longueur d'onde², plus importante lors de fortes houles. 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).

² Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs

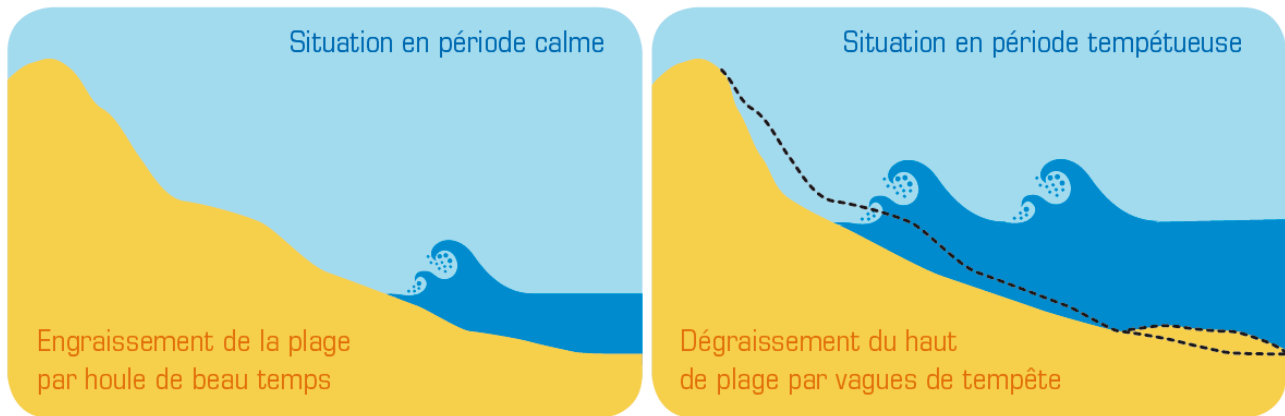


Figure 18 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)

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 19) :

- 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 19 - Les manifestations de l'érosion des cordons sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)

Suite à des événements exceptionnels et en fonction des stocks sédimentaires disponibles, deux types de dynamiques peuvent se produire sur les cordons sédimentaires :

- une reconstitution du cordon sédimentaire (sable et/ou galets) autrement appelée « résilience » et correspondant à la capacité du trait de côte à se recharger naturellement à la suite d'un événement impactant ;
- 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 20) :

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

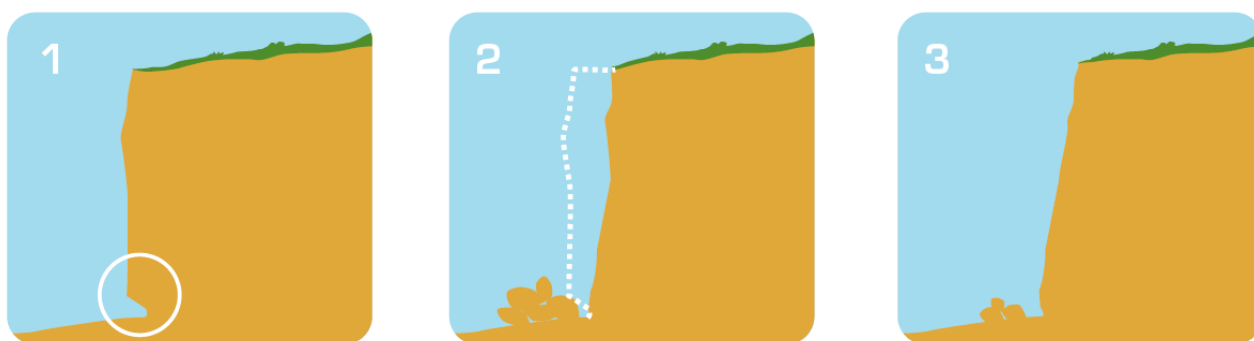


Figure 20 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)

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 250 km de côtes (cf. *Tableau 6*).

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

L'aléa RTC sur la commune de Saint-André

La commune de Saint-André connaît une problématique d'érosion du trait de côte sur plusieurs portions de son linéaire côtier. Mais également plusieurs dynamiques de stabilité sur certains secteurs le long de son littoral.

Les embouchures de la Rivière du Mât et de la Grande rivière Saint-Jean, sont par exemple soumises à des processus relativement rapides et peuvent connaître des phases successives d'érosion et d'accrétion intenses en lien avec les dynamiques hydrauliques maritimes et fluviales.

Cette dynamique peut également être accentuée par des aménagements. C'est par exemple le cas des aménagements de remblais sur le littoral du secteur de Champ-Borne. Ces derniers participent à l'avancée du trait de côte mais engendrent par la même occasion une érosion plus importante de ce secteur.

L'étude de l'évolution de la position du trait de côte réalisée dans le cadre de ce PPRL montre que le reste de la commune est soumis à un phénomène de recul, les processus s'accroissant lors d'événements exceptionnels tels que les houles cycloniques (Annexe 1).

L'orientation de la côte joue également un rôle non-négligeable dans les vitesses d'évolution. Au vu de son exposition Nord-ouest / Sud-est, la commune est particulièrement sujette à l'érosion liée aux

houles cycloniques estivales en provenance du Nord-est. Cet impact, couplé à une dynamique d'élévation du niveau de la mer, se fait notamment ressentir sur le littoral de Champ-Borne (Figure 21 & Figure 22)



Figure 21 : Erosion du littoral du quartier de Champ-Borne (Campagne OBSCOT ; 2020)



Figure 22 : Erosion du haut de plage derrière le restaurant Le Beau Rivage (Campagne OBSCOT, 2018)

4.3.2. 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 23) 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 à la côte engendre également une surcote très locale qui contribue à l'élévation du niveau moyen de la mer (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.

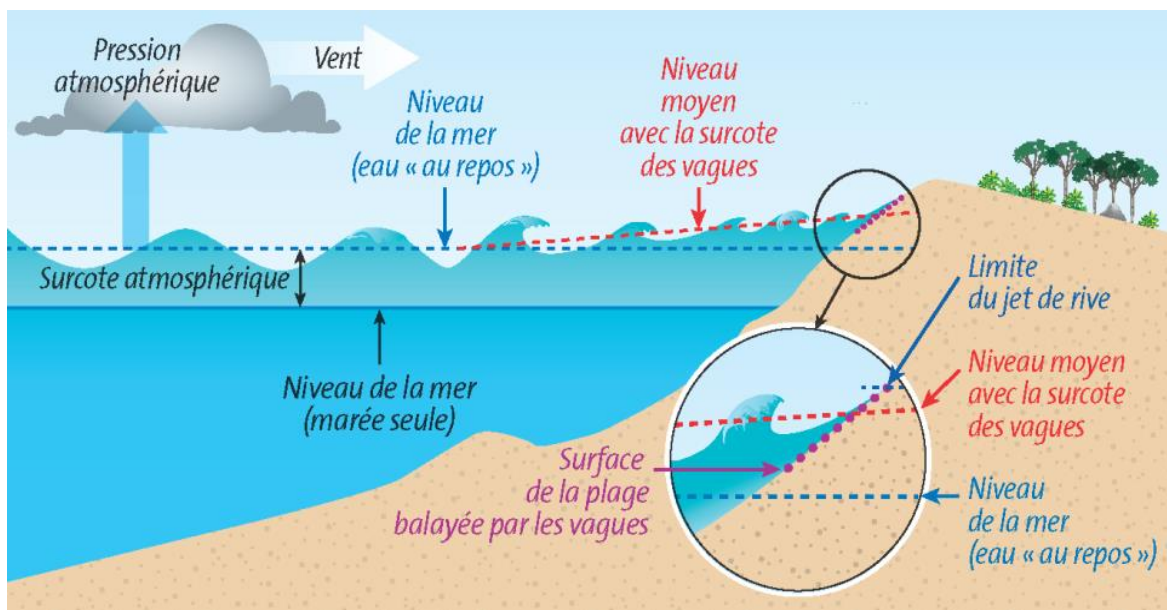


Figure 23 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (BRGM).

On distingue traditionnellement plusieurs types de submersions marines (cf. Figure 24) :

- ✓ 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).

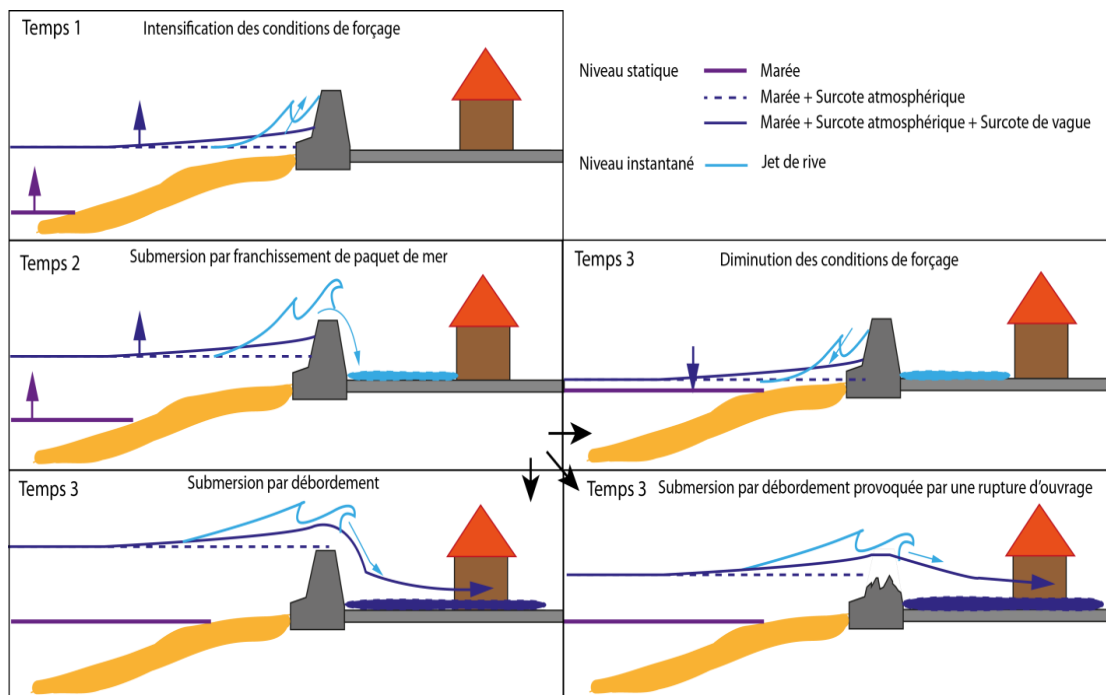


Figure 24. Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)

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

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

Par ailleurs, la concomitance d'un cyclone avec un coefficient de marée élevé et une marée haute accroît le risque de submersion par franchissement ou débordement. Toutefois, le marnage étant relativement faible à La Réunion (inférieur à 1 m), cette action n'est pas aussi significative que sur d'autres façades littorales.

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 telle que la baie de Saint-Paul ou le centre-ville de Sainte-Suzanne. (Figure 25 et Figure 26).

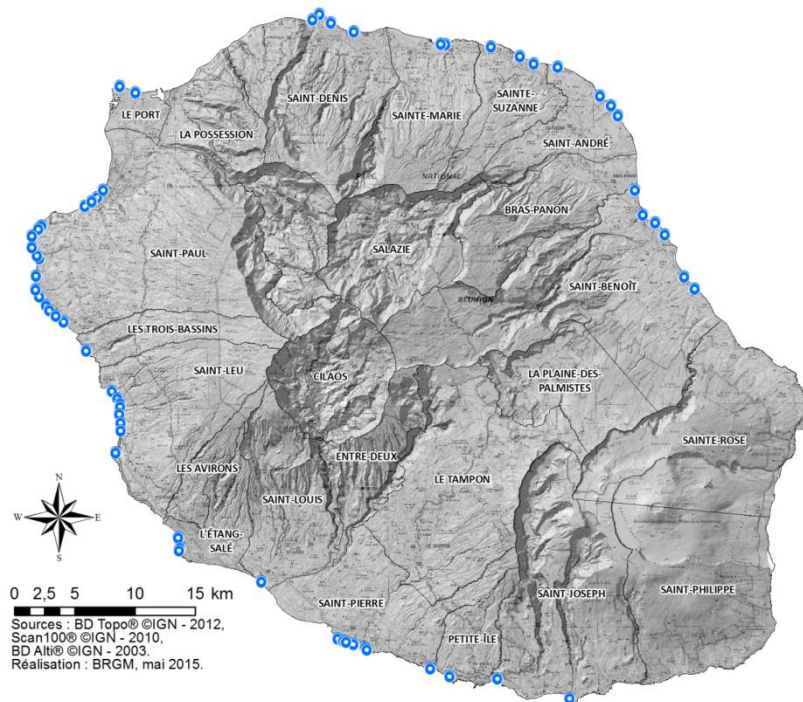


Figure 25 - Sites sensibles à l'action des houles (BRGM, mai 2015)



Figure 26 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)

On note également 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 comme c'est le cas pour la commune de Saint-André.

D'autres aléas accompagnent la submersion marine. Il s'agit principalement des effets de dissipation d'énergie des phénomènes marins induisant des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents. Son effet est directement lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures (Figure 27).

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

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

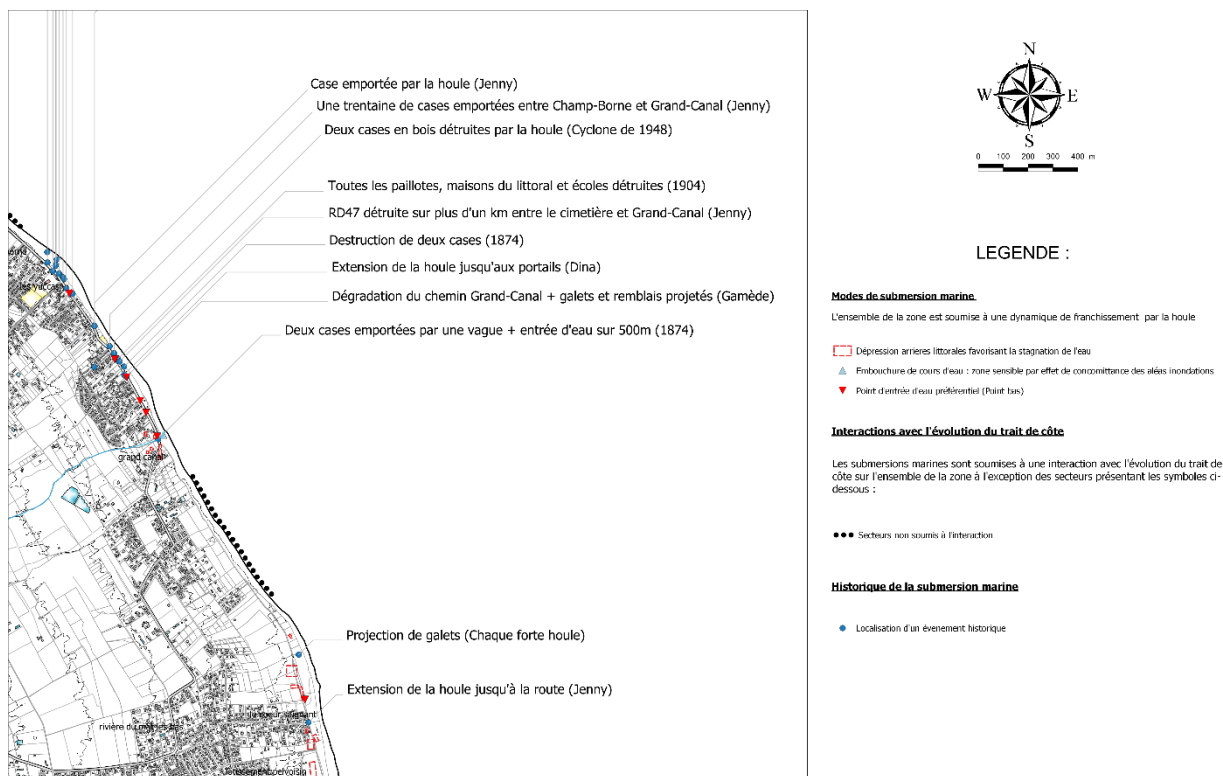


Figure 27 : Extrait de la carte des événements historiques de submersion marine (Annexe 3 du projet de PPRL)

L'aléa submersion marine à Saint-André

Le littoral de Saint-André est particulièrement vulnérable à la submersion marine. Historiquement, de nombreux événements ont été recensés, et ce dès le XIX^{ème} siècle.

L'analyse du MNT (modèle numérique de terrain) communal réalisé à partir des données lidar³, montre que plusieurs secteurs de la commune de Saint-André sont vulnérables à la submersion marine (Figure 28).



Figure 28 : Secteur de Bois Rouge et du Parc du Colosse de la commune de Saint-André dont l'altitude est située entre 2 et 3 m NGR (MNT Litto3d IGN/SHOM)

Par cette approche altimétrique, il est possible de mettre en avant les quartiers fréquemment soumis à l'aléa submersion marine. Dans le cas de la commune de Saint-André, les secteurs de Bois Rouge, du Parc du Colosse et le secteur de Champ-Borne sont exposés aux risques d'inondations par submersions marines (< 5 m NGR). Ces secteurs ont effectivement été submergés par paquets de mer lors d'évènements historiques et de nombreux dégâts et victimes ont également été recensés.

³ 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.

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

La caractérisation et la cartographie de l'aléa du présent projet sont inspirées des travaux réalisés en 2014 (Chateauminois et al., 2014).

5.1. DEFINITIONS ET NOTIONS GENERALES

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

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

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

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

5.2. ALEA REcul DU TRAIT DE COTE

5.2.1. Cadre méthodologique national

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

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

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

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

Tableau 7 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude)

⁴ Vitesse d'évolution annuelle

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

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

Pour ce faire, l'analyse de la cinématique du trait de côte se base 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 2100⁵.

Préparation des photographies aériennes anciennes

Les photographies utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes couvrant l'ensemble du linéaire côtier de Saint-André de 1950 à 2017 (cf. Tableau 8).

Années	Nature des clichés	Echelle de prise de vue	Résolution image numérique
1950	Noir & Blanc	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
1978	Couleur et Noir & Blanc	1 : 20 000	1 pixel = 0.5 m
1989	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5m
1997	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 1 m
2003	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2008	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2011	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.2m
2017	Couleur	1 : 25000	1 pixel = 0.2m

Tableau 8 – Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées

Les photographies aériennes de 1950, 1978 et 1989 ont été numérisées à 1200dpi puis géo-référencées par la méthode d'ajustement dite « spline » grâce au logiciel ArcGis 10.0. Le géo-référencement a été privilégié à l'ortho-rectification, les certificats de calibration⁶ de ces missions IGN n'étant pas disponibles. Cependant, le littoral de Saint-André étant majoritairement constitué de côtes basses, les faibles déformations des photographies dues au relief ont pu être compensées par

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

⁶ Les certificats de calibration contiennent toutes les informations nécessaires au calage des clichés (focale, altitude, cap, ouverture de l'objectif, centroïde des clichés, marques fiduciaires...).

l'intermédiaire du géo-référencement. Pour les secteurs à falaises, un plus grand nombre de points d'amers ont été appliqués de façon à corriger les distorsions potentielles.

Les clichés de 1997, 2003, 2008, 2011 et 2017 sont issus de la « BD Ortho » de l'IGN.

Définition et numérisation des traits de côte

Le trait de côte de référence a été matérialisé en fonction de la limite haute du littoral, tel que défini dans le guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL, à savoir (Figure 29) :

- la limite de végétation ou le pied des aménagements ou ouvrages pour les côtes basses (à partir de l'ortho 2017) ;
- la partie sommitale du versant pour les côtes à falaise (à partir du MNT lidar).



Figure 29 – Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral de la côte nord-est :
a. limite en pied d'aménagement (ortho 2011); b. limite de végétation (ortho 2011); c. limite de haut de versant (lidar)

Bien que ce trait de côte ait servi de référence pour la détermination des zonages d'aléas, le calcul de la vitesse de l'érosion n'a pu être effectué en fonction des trois marqueurs précités. D'une part, car la partie sommitale des falaises n'est pas clairement visible sur les clichés à disposition, la plupart des falaises étant particulièrement végétalisées. Il n'est en effet possible de le déterminer de façon fiable que via les données lidar. D'autre part, et dans de nombreux cas, la limite de végétation n'est pas représentative des dynamiques affectant réellement le milieu. De nombreux filaos et vacoas ont en effet été plantés sur le littoral ces 60 dernières années de manière à se prémunir d'une érosion menaçante ou dans le cadre de projets d'aménagement du littoral. Dans cette configuration, il est impossible de conserver la limite de végétation comme un marqueur de l'érosion, l'analyse étant tronquée et montrant parfois une dynamique inverse vis-à-vis des stocks sédimentaires disponibles. L'évolution de la limite du jet de rive a donc été préférée dans le cadre de cette étude. En effet, le marnage⁷ étant généralement inférieur à 1 m sur les côtes réunionnaises, la différence de position entre les limites de jet de rive de basse mer et de pleine mer est minime (1 à 2 m en planimétrie au maximum), d'autant plus sur les côtes constituées de cordons de galets, sont généralement affectées par de fortes pentes. La marge d'erreur va principalement dépendre de l'état de mer lors de la prise de vue, ce qui nécessite de réaliser une sélection des images afin que celles-ci soient comparables en termes de condition d'agitation.

Afin de limiter au maximum la marge d'erreur liée à la digitalisation, le trait de côte a été numérisé sous ArcGis à une échelle comprise entre le 1:500^e et 1:1000^e en fonction de l'année considérée.

⁷ Différence de hauteur d'eau entre une basse mer et une pleine mer successives

La marge d'erreur totale issue de cette photo-interprétation du trait de côte dépend de la qualité des images aériennes (échelle, grain de la pellicule argentique pour les plus anciennes, résolution, géoréférencement) ainsi que de l'interprétation du trait de côte dans les zones délicates (et donc des conditions de mer). Cette marge d'erreur est estimée entre 5 et 10 m. Les clichés dont l'erreur est supérieure à cette marge n'ont pas été conservés.

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 (cf. Figure 30). La vitesse (Tx) et sa projection à horizon 2100 (100Tx) sont calculés pour chaque transects, selon plusieurs méthodes statistiques possibles.



Figure 30 - Exemple d'implantation des profils à Sainte-Suzanne

Les transects sont implantés tous les 20 m, et le taux d'évolution est calculé à partir d'une régression linéaire pondérée (*Weight Linear Regression - WLR*) adaptée à l'échantillon de traits de côte.

La régression linéaire pondérée est une méthode d'ajustement couramment employée pour le calcul de l'évolution du trait de côte. Elle offre l'avantage d'utiliser toutes les données disponibles et donne plus de poids aux données les plus fiables afin de déterminer la meilleure droite d'ajustement (Figure 31).

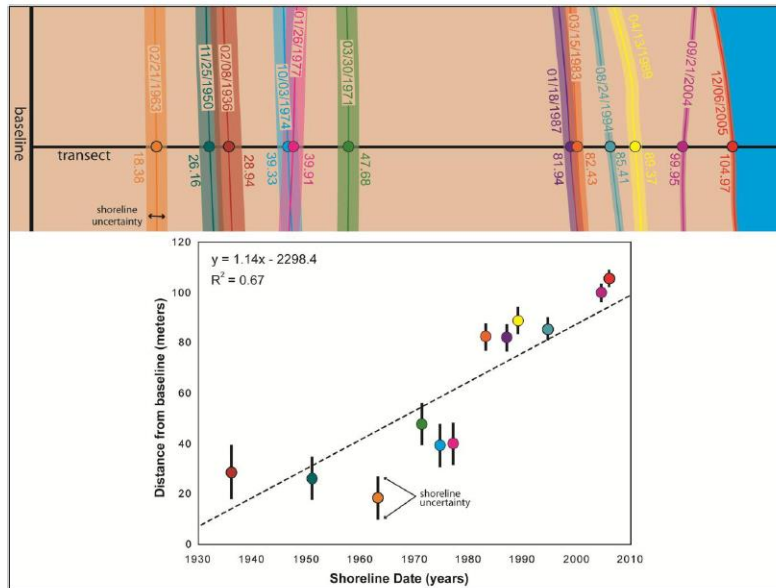


Figure 31 – Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)

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

Afin de s'affranchir des effets locaux de transects (artefacts et fortes disparités d'un profil à l'autre générant un trait de côte en « dents de scie » (cf. Figure 32)), il convient de regrouper et moyenner les valeurs au sein de secteurs au comportement morpho-dynamique homogène.

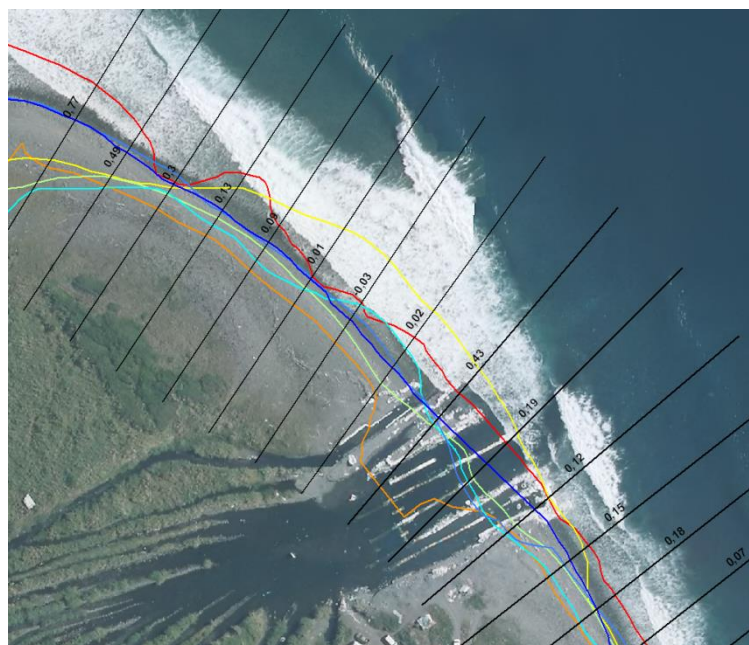


Figure 32 – Exemple d'artefact généré par les profils au sud de la Rivière des Marsouins sur la commune de St-Benoît : de fortes disparités sont observées entre des transects très proches - Orthophoto IGN© 2012

Au sein de grandes cellules hydro-sédimentaires, des secteurs sont ainsi définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral. Les reculs moyens des secteurs en érosion au sein des

cellules (moyenne des Tx obtenus sur chacun des profils) sont enfin classés par catégories de vitesses de recul soit :

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

La commune de Saint-André présente 10 secteurs aux comportements hydro-sédimentaires homogènes présentés en Figure 33.

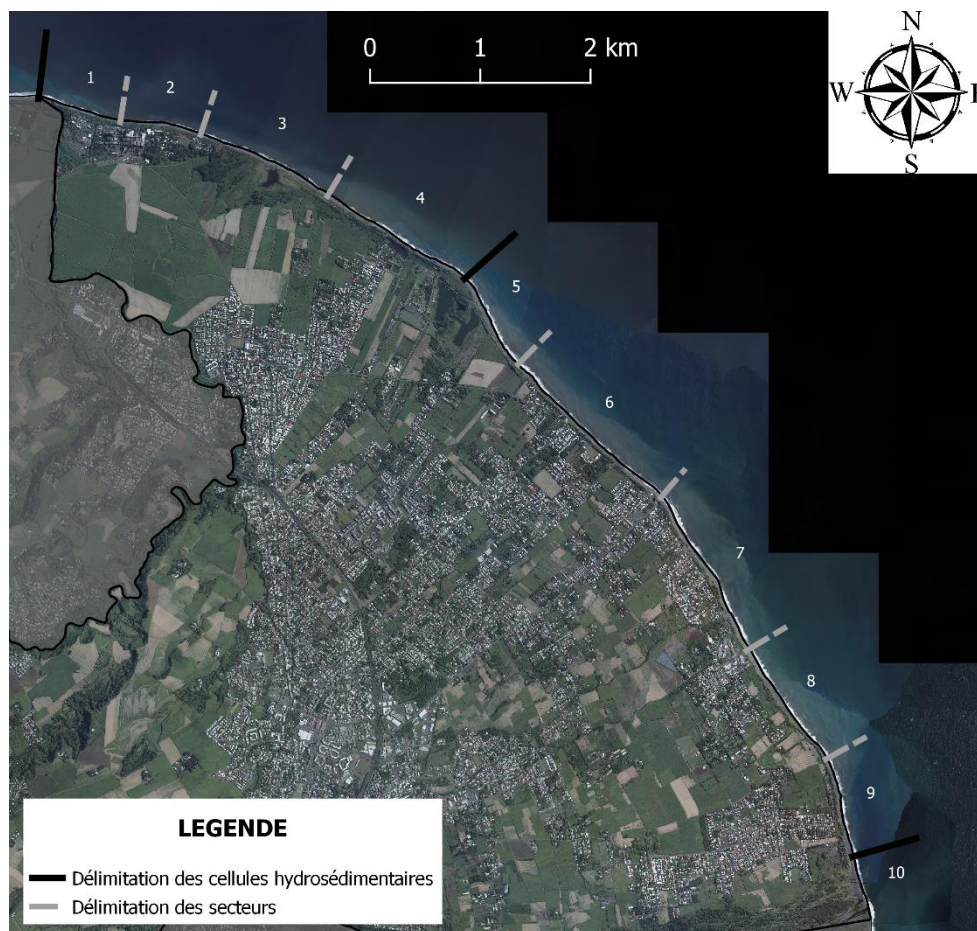


Figure 33 : Délimitation des cellules hydro-sédimentaires et des 10 secteurs homogènes de la commune de Saint-André (BRGM, 2020)

Les résultats pour la commune de Saint-André sont synthétisés dans le Tableau 9 ci-après :

Secteur	Morphotype	Recul Tx moyen des secteurs en érosion (m / an)	Classe	100 TX Moyen
1	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.09	Faible	-9
2	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.16	Modéré	-16
3	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.09	Faible	-9
4	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.05	Faible	-5
5	Cordon de galets	-0.17	Modéré	-17
6	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.29	Fort	-29
7	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.11	Modéré	-11

8	Cordon de galets / Falaise meuble	-0.35	Fort	-35
9	Cordon de galets	-0.16	Modéré	-16
10	Cordon de galets / Embouchure	-0.84	Très fort	-84

Tableau 9 : Calculs de recul du trait de côte (référence 2017 – échéance 2100) par secteurs homogènes sur la commune de Saint-André

Il convient en outre de prendre en compte le recul lié à un événement tempétueux majeur (Lmax). Sur la base des tempêtes et cyclones connus (cyclone Dina de janvier 2002), le Lmax est estimé à -10 m pour les secteurs de cordon sédimentaire exposés au large. Cependant, le secteur de Champ-Borne étant particulièrement sensible aux événements extrêmes dû aux nombreux remblaiements effectués, le Lmax a été estimé à -20 m sur l'intégralité du linéaire de ce secteur (Figure 33, secteur 6).

Concernant les côtes à falaise, la valeur Lmax retenue est égale à 5 m, de manière à se prémunir d'un glissement de terrain ou d'un effondrement majeur.

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

Zonage de référence : du recul à échéance 100 ans

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

La largeur de la zone d'aléa résultante ($L_r = 100Tx + L_{max}$) est affectée en arrière du trait de côte de référence le plus récent (2017) correspondant à la limite de végétation en haut de plage ou à la rupture de pente. Les valeurs de Lr de chacun de ces secteurs sont présentées dans le Tableau 10.

Secteur	Morphotype	100 TX arrondi	Lmax	Lr
1	Cordon de galets / Falaise meuble	10	10	20
2	Cordon de galets / Falaise meuble	15	10	25
3	Cordon de galets / Falaise meuble	10	10	20
4	Cordon de galets / Falaise meuble	5	10	15
5	Cordon de galets	15	10	25
6	Cordon de galets / Falaise meuble	30	10	40
7	Cordon de galets / Falaise meuble	10	10	20
8	Cordon de galets / Falaise meuble	35	10	45
9	Cordon de galets	15	10	25
10	Cordon de galets / Embouchure	85	10	95

Tableau 10 : Valeurs 100Tx ; Lmax et Lr par secteurs homogènes pour la commune de Saint-André

La cartographie SIG de l'aléa « recul du trait de côte » est réalisée à l'aide des valeurs de Lr et de Lmax via l'utilisation de l'outil « buffer », qui revient à créer une zone tampon (selon les valeurs de Lmax et de Lr) sur un secteur défini à partir du trait de côte de référence considéré de 2017 (haut de plage ou bas de plage).

Une première zone tampon des valeurs de Lr a été appliquée au trait de côte de bas de plage le plus récent, à savoir la limite de jet de rive de l'année 2017. Une seconde zone tampon des valeurs

de Lmax a été réalisée selon le trait de côte de haut de plage correspondant à la limite de végétation ou à la rupture de pente des falaises. L'aléa « recul du trait de côte » correspond à la mise en commun des limites les plus reculées des zones tampons des valeurs de Lmax et de Lr.

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 car ils n'ont pas été spécifiquement conçus pour lutter contre l'érosion. Conformément aux recommandations du guide (DGPR, 2014), les ouvrages plus massifs mais de faible étendue ne sont également pas considérés comme étant en mesure de contenir les phénomènes érosifs qui continuent d'affecter les espaces situés de part et d'autre de l'ouvrage, et finissent par le contourner et le rendre inopérant.

Zonage du recul à échéance 100 ans avec prise en compte du changement climatique (+60 cm d'élévation du niveau de la mer)

Faute de consensus scientifique sur la méthode pour déterminer la zone qui pourrait être érodée du fait du changement climatique, qui plus est dans le contexte spécifique de La Réunion, le guide méthodologique : « Plan de prévention des risques littoraux » (DGPR, 2014) propose d'appliquer :

- une « règle de trois » entre les +60 cm d'élévation du niveau de la mer attendus pour 2100 et les +20 cm enregistrés le siècle dernier, ce qui revient à tripler le recul 100Tx entre 2017 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.

Ce principe a donc été appliqué sur la commune de Saint-André (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.

Résultats cartographiques

Concernant l'aléa recul du trait de côte, il n'existe pas de gradation du niveau d'intensité de l'aléa : soit les terrains restent en place à échéance 100 ans, soit ils se trouvent emportés par les phénomènes érosifs. La règle appliquée en accord avec les textes nationaux a donc consisté à ne définir qu'un seul niveau d'intensité érosive forte sur les cartes d'aléas, et pour chacun des deux scénarios court et long terme.

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

- une carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte au 1/10 000 (cf 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 34*) ;

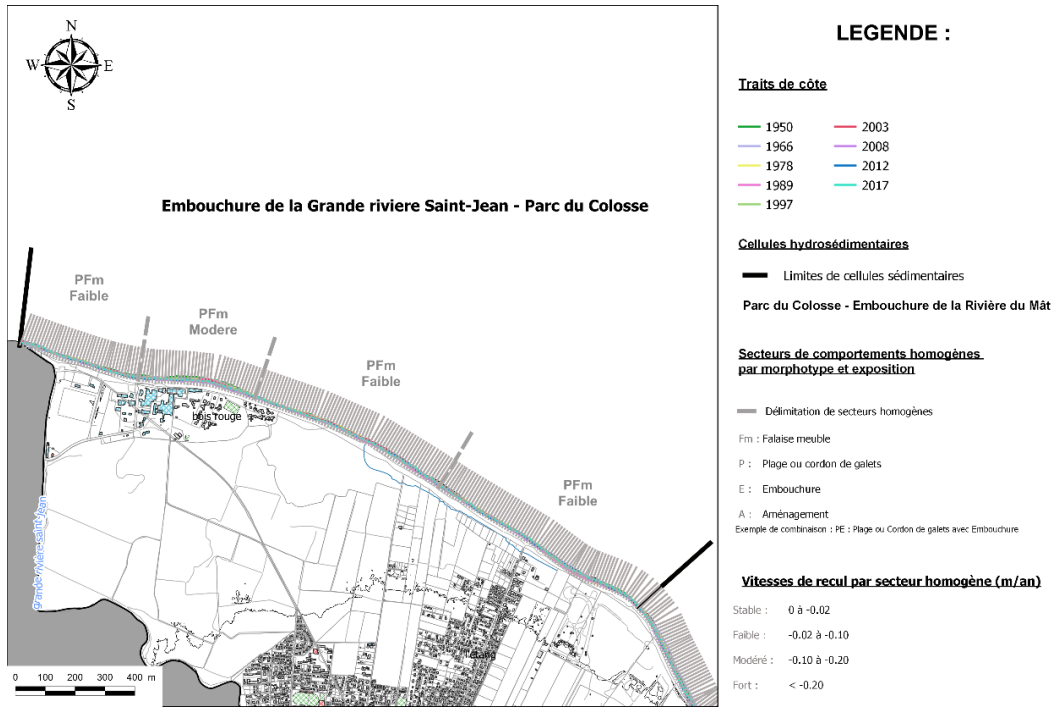


Figure 34 : Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte de Saint-André (cf. Annexe 1)

- une carte de l'aléa recul du trait de côte au 1/5000 (Annexe 2) contenant le trait de côte de référence (2011), le zonage de l'aléa à échéance 100 ans (qualification en aléa fort uniquement), ainsi que la limite de l'aléa avec prise en compte du changement climatique (Figure 35).

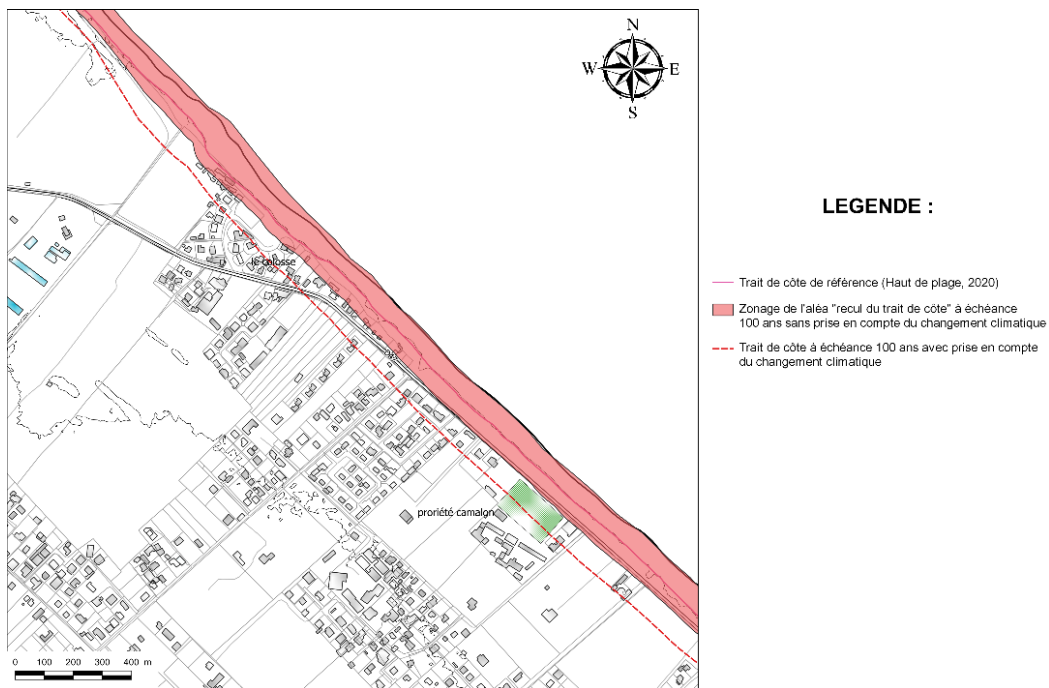


Figure 35 : Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur la commune de Saint-André (cf. Annexe 2)

5.3. ALEA SUBMERSION MARINE

La caractérisation et la cartographie de l'aléa du présent projet sont inspirées des travaux réalisés en 2014 (Chateauminois et al., 2014).

5.3.1. Cadre méthodologique national

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

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

La méthodologie globale et les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le Tableau 11 suivant et décrits à la suite :

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

Tableau 11– Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude)

5.3.2. Méthodologie et scénarios

Les phénomènes de submersion sur la commune

Le préalable étant de déterminer le mode de submersion, il est considéré qu'à La Réunion, le franchissement par les vagues est le phénomène de submersion le plus commun impactant l'ensemble du linéaire côtier de l'île. Seule la zone interne des étangs ou des ports, qui peut subir des débordements liés à la surcote de tempête sans action des vagues, est soumise à l'aléa de submersion par débordement.

Précision de la caractérisation et la cartographie de l'aléa submersion marine par débordement

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

Ce niveau est basé sur l'étude BRGM⁸ et est adapté au guide ministériel d'élaboration du PPRL (DGPR, 2014)⁹. Ce niveau est la conjonction d'un niveau d'eau fréquent et d'une surcote atmosphérique centennale liée au passage d'un cyclone. Il correspond à la somme des paramètres suivants (Figure 36) :

- un niveau de marée de 0,50 m NGR qui intègre 0,25 m NGR correspondant à la moyenne des plus hautes pleines mers journalières (PM sup) (SHOM, 2016)¹⁰ et une marge de sécurité de 0,25 m pour une prise en compte de l'incertitude sur la marée (DGPR, 2014)².
- la surcote atmosphérique centennale liée au passage d'un cyclone (+0,85 m selon Sogreah, 1998¹¹).
- Une surélévation du niveau marin en lien avec le changement climatique (DGPR, 2016) selon deux scénarios :
 - o Un **aléa de référence actuel** : Une surélévation du niveau marin en lien avec le changement climatique à moyen terme de 0,2 m conformément aux recommandations du guide méthodologique ministériel ;
 - o Un **aléa 2100** : Une surélévation du niveau marin en lien avec le changement climatique à échéance 2100 de 0,6 m conformément aux recommandations du guide méthodologique ministériel.

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

⁸ De La Torre Y. et Louzé J., collab Dewez T. (2008) – Méthodologie pour l'évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion. Phase 1 et Phase 2. BRGM/RP-56589-FR et BRGM/RP-56365

⁹ 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.

¹⁰ SHOM (2016), Ouvrage de marée – Références Altimétriques maritimes Ref : X16-HYC

¹¹ SOGREAH (1998), RN1 – Route du littoral – Etude préalable des risques océanographiques Etape 1 : Analyse de l'existant Rapport 11988/ADI/51 4525 R1

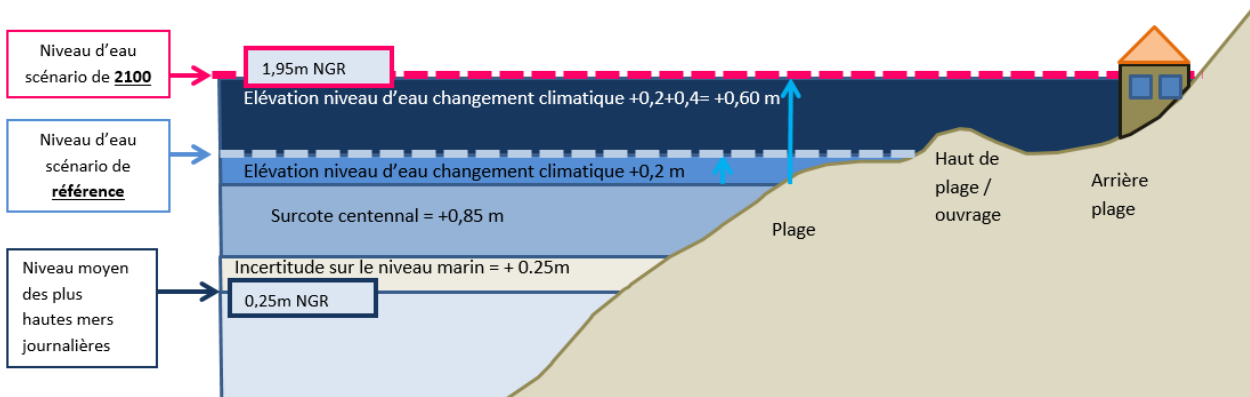


Figure 36 : Présentation schématique des niveaux d'eau de l'évènement submersion marine par débordement selon les 2 scénarios PPRL

Le zonage des degrés d'aléa submersion marine par débordement est lié aux deux scénarios de submersion confrontés à la topographie locale (MNT Litto3D IGN, 2011). Cet évènement est considéré comme sans agitation par simplification. Il n'y a donc pas de croisement entre les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement. Seuls les niveaux d'eau sur la topographie déterminent les degrés d'aléa. Les différents degrés d'aléa sont cartographiés en fonction des hauteurs d'eaux dans le port et selon deux scénarios comme suit (Figure 37) :

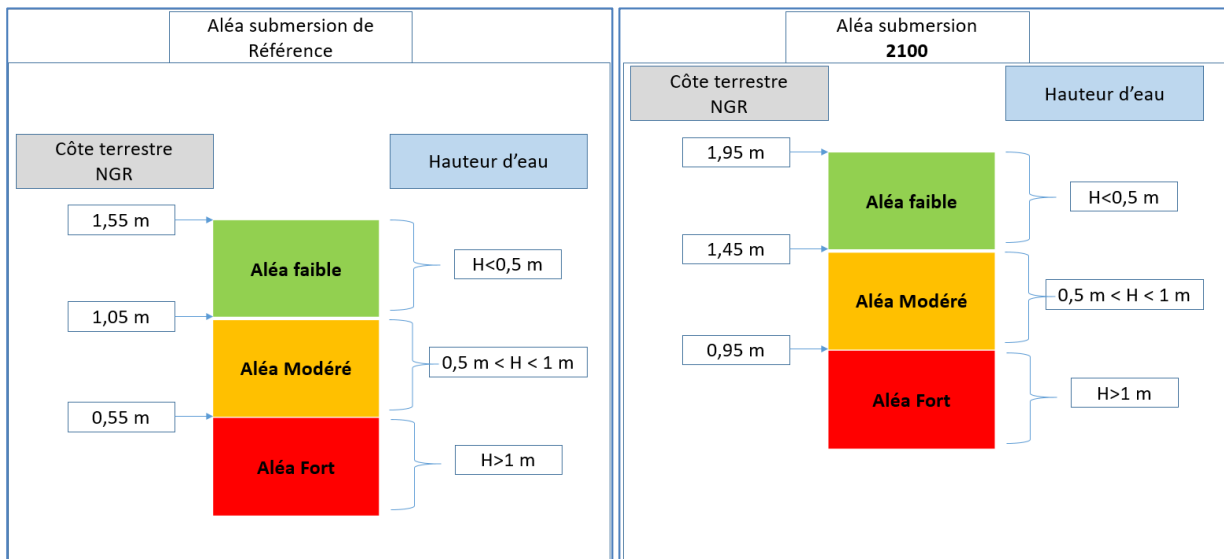


Figure 37 : Schémas de la qualification des degrés d'aléa débordement

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

Précision de la caractérisation et la cartographie de l'aléa submersion marine par franchissement

Pour la submersion par franchissement, plusieurs méthodes d'estimation sont possibles. Les formules empiriques de calcul du run-up¹² telles que Stockdon *et al.* (2006) ont été utilisées à La Réunion (De la Torre et Louzé, 2008). Cependant, elles ne s'appliquent pas dans les environnements récifaux ou lorsque la houle est très fortement diffractée et ne permettent pas de quantifier la hauteur d'eau et les vitesses d'écoulement.

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

Choix de l'évènement naturel de référence

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

Le mode de submersion prépondérant étant le franchissement suite au déferlement des vagues, l'évènement naturel de référence est donc déterminé à partir de l'analyse comparative des régimes de houles extrêmes (Lecacheux *et al.*, 2012). Pour le littoral Nord-Est, **l'évènement climatique de référence est donc le cyclone Dina de janvier 2002** (cf Figure 38). Pour autant, l'étude des évènements historiques de submersion a permis d'intégrer l'ensemble des évènements connus et référencés de mémoire d'homme, allant jusqu'à des témoignages de cyclones remontant au début du XX^{ème} siècle. L'ensemble de ces éléments a été exploité pour la caractérisation du zonage de submersion.

¹² Run-up : altitude maximale atteinte par le jet de rive sous l'action des vagues.

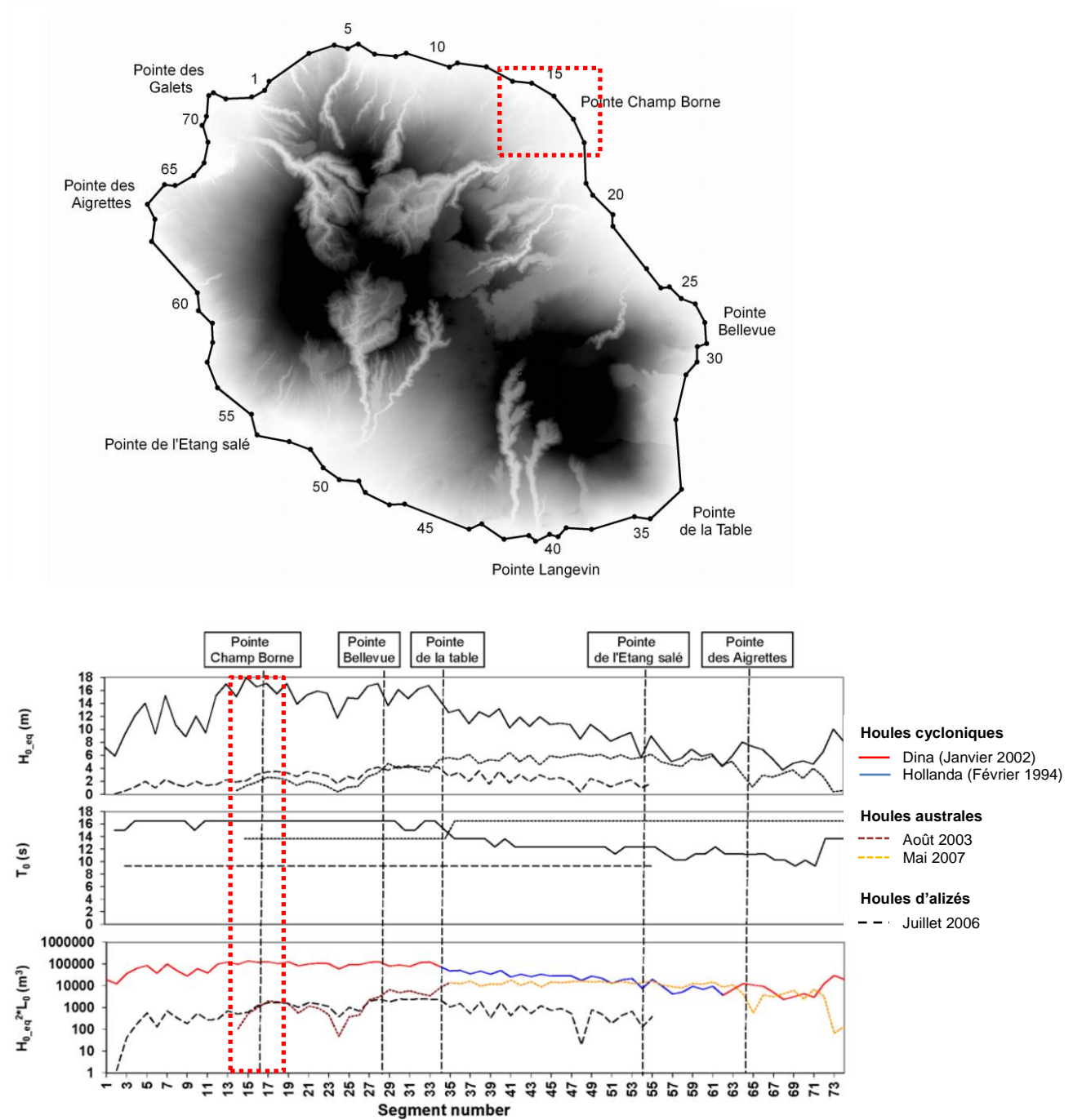


Figure 38 – Comparaison des houles engendrées par différents évènements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – (Lecacheux et al., 2012)

Scénarios de référence et prise en compte du changement climatique

Sur la base de cet évènement naturel de référence, et conformément au *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux* (DGPR, 2014), deux scénarios sont ensuite considérés avec des hypothèses différentes permettant de tenir compte du changement climatique et de son impact sur l’élévation du niveau marin (cf. Figure 39) :

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

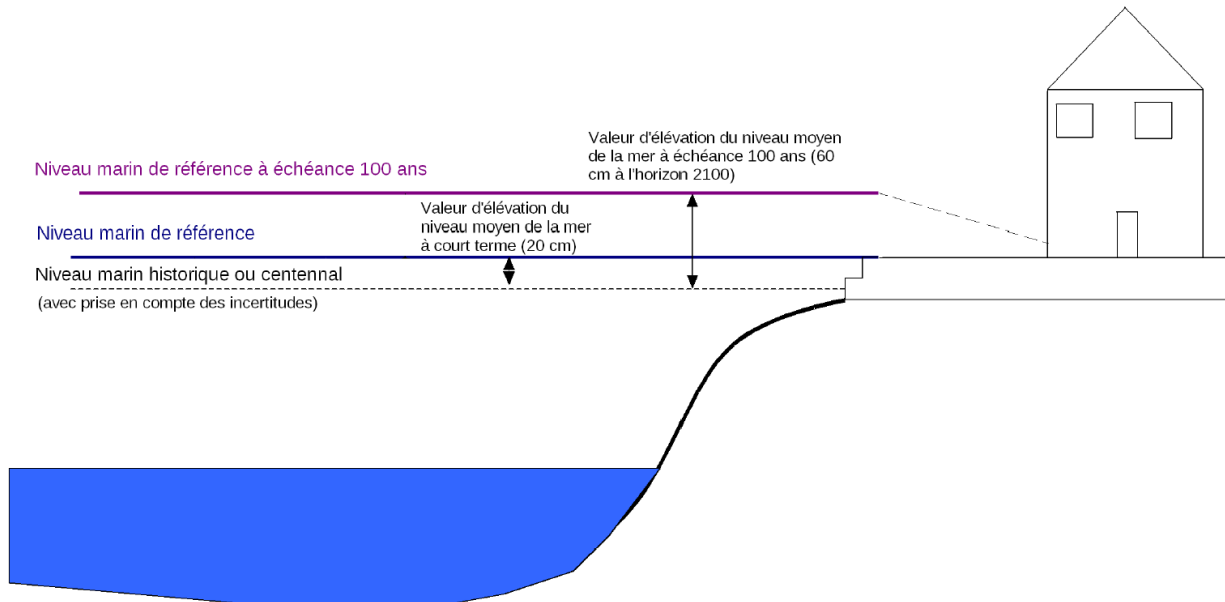


Figure 39 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2014)

5.3.3. Modélisation des submersions marines de référence

Données topo-bathymétriques

Les données bathymétriques utilisées dans le cadre de cette étude sont issues soit de l'étude HOULREU (Pedreros *et al.*, 2009), donc des sondes du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), soit du programme Litto3D dont les données ont été livrées par le SHOM et l'IGN à la DEAL Réunion (2012).

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) et des données Litto3D. Les principales étapes nécessaires à cette construction, développées dans le cadre du projet ALDES (Alerte descendante aux tsunamis en Méditerranée Occidentale : Le Roy *et al.*, 2012), sont schématisées en Figure 40 :

- 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 (données SHOM) permet d'établir un MNE ne prenant en compte comme « sursol » que le bâti.

- Enfin, des corrections manuelles peuvent être nécessaires pour tenir compte des bâtiments et/ou ouvrages qui ne figurent pas dans la BDTopo de 2008.

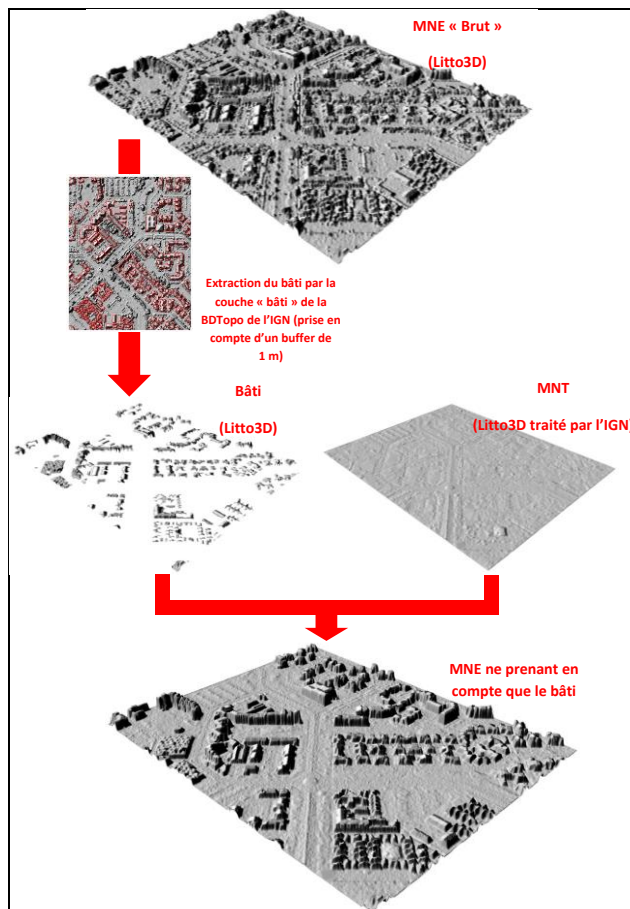


Figure 40 : Principales étapes nécessaires à la construction du MNE (Le Roy et al., 2012) – données Litto3D ©IGN.

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 (Tableau 12). Compte-tenu de la localisation de ces sites, la Pointe des Galets peut être retenue pour l’ordre de grandeur des caractéristiques de marée.

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)
La 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 12 – Références altimétriques maritimes pour la Pointe des Galets, 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)

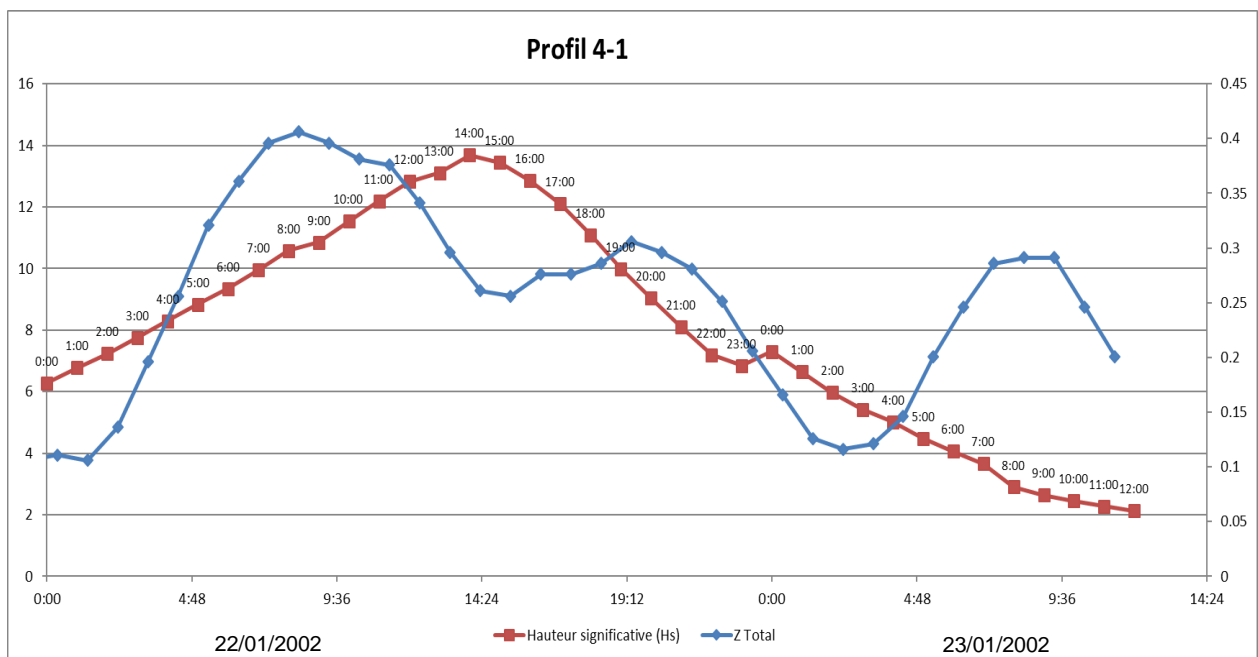
On retiendra que le niveau de plus haute mer astronomique (marée) à la Pointe des Galets se situe +0,456 m IGN89.

Niveaux d'eau considérés

Les niveaux d'eau ont été choisis à partir du cas historique correspondant à l'évènement de référence, le cyclone Dina :

- Sur chaque commune, l'heure du pic de houle a été déterminée à partir des résultats du modèle de houle élaboré dans le cadre du projet HOULREU.
- La série temporelle de niveau de marée prédite est calculée à l'aide du logiciel SHOMAR du SHOM à la Pointe des Galets, 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 Tableau 12.
- Le niveau de marée sur chaque commune, et au moment du pic de houle, a été déterminé en extrapolant géographiquement et temporellement, avec une méthode linéaire, les données de marée prédites par le SHOM à la pointe des Galets, et en introduisant un déphasage temporel.
- La surcote atmosphérique a été estimée à partir des données disponibles pour l'évènement considéré. Les chroniques de mesure de pression sont connues grâce aux données des stations de Météo-France¹³ sur les sites de l'aéroport de Sainte-Marie et de la ville du Port. La surcote atmosphérique (baromètre inverse) est calculée au moment du pic de houle.

Cette méthode permet ensuite de déterminer avec précision le niveau de la mer (intégrant le niveau de marée et la surcote due à la dépression barométrique) au moment du pic de houle, sur chacun des sites d'étude (Figure 41).



¹³ Saison cyclonique – Sud-ouest de l'océan Indien, 2001-2002, Météo-France, 100p.

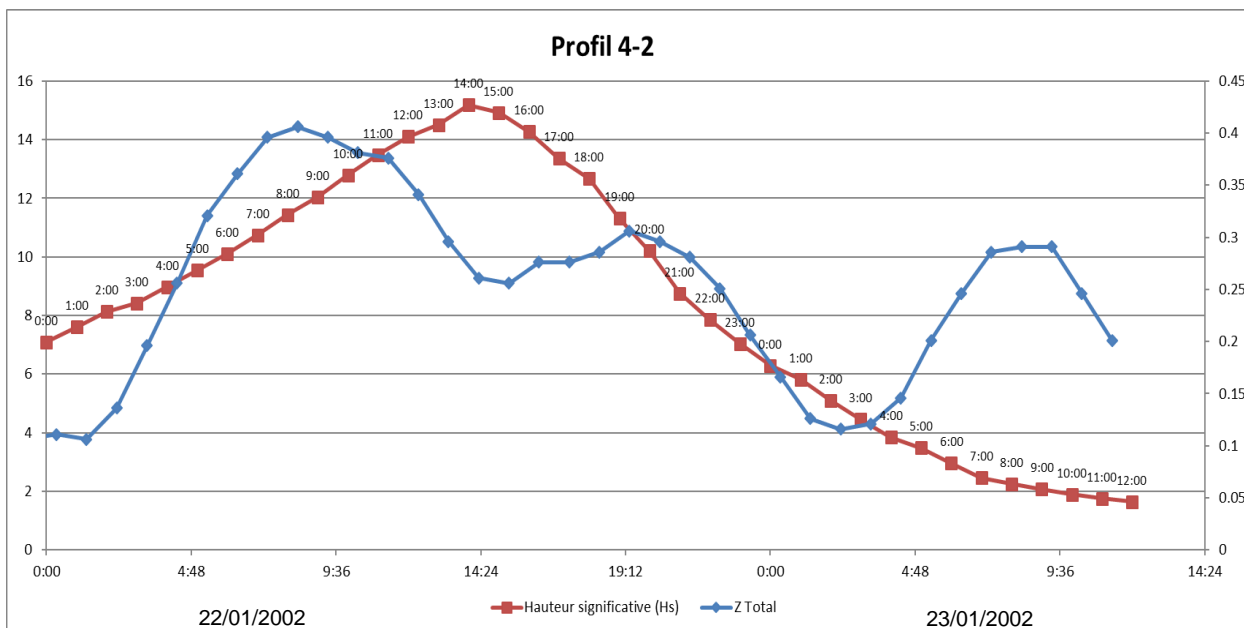


Figure 41 : Hauteur significative des vagues en rouge (en mètres, échelle de gauche) et niveau de la mer en bleu incluant la marée prédite et la surcote atmosphérique estimée (en mètres IGN89, échelle de droite) les 22 et 23 janvier 2002 (cyclone Dina) pour les 2 profils réalisés (4.1 et 4.2) sur la commune de Saint-André

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 2100.

Au final, les niveaux considérés sont donc les suivants (Tableau 13) :

Événement de référence	Marée prédite (SHOMAR, /ZH)	Surcote atmosphérique	Niveau marin du scénario de référence (/0 IGN89)	Niveau marin du scénario à échéance 100 ans (/0 IGN89)
Cyclone Dina	0.53 m (22/01/2002 vers 15h00 TU)	+0,32 m	0.47 m	0.87 m

Tableau 13 - Niveaux marins retenus pour la simulation de submersion

Stratégie de modélisation : Méthode adoptée pour les simulations

Localisation de la simulation

Les modélisations des profils 4.1 et 4.2 ont été réalisées respectivement à la pointe de Champ-Borne et à 300 m au nord de l'intersection entre la route Coloniale et la D47.

Les profils choisis pour la simulation sont précisés dans la Figure 42.

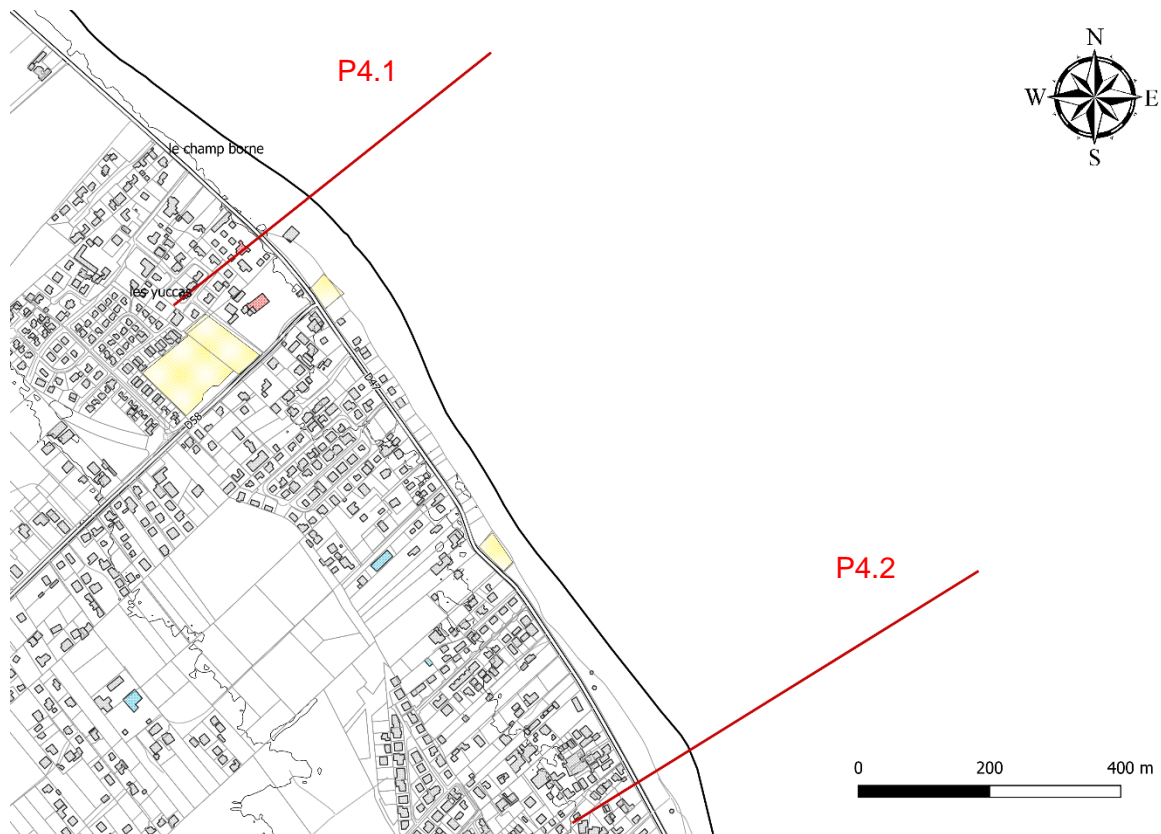


Figure 42 : Localisation des transects de la simulation 1D à Saint-André

Méthode adoptée pour les simulations en 1D

La méthode mise en œuvre s'appuie sur les résultats de l'étude HOULREU du BRGM (grilles R2E et R2N à résolution 90 m, Pedreros *et al.*, 2009). Pour les simulations, compte-tenu des incertitudes et afin de simplifier la démarche, les simulations ont été menées directement à partir des houles de référence publiées par Lecacheux *et al.* (2012) suite à l'étude HOULREU : les caractéristiques des houles au large pour chaque événement avaient été corrigées pour estimer les caractéristiques des vagues équivalentes orthogonales à la côte au large. L'utilisation de ces résultats permet de simuler la propagation des vagues depuis le large jusqu'à la côte directement sous SWAN.

La démarche pour les simulations de la submersion peut finalement être fragmentée en 2 principales étapes, toutes étant menées en régime stationnaire :

- **propagation de spectres à la côte par le code SWAN** en 2D, 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) à partir du calcul des houles équivalentes au large orthogonales à la côte (Lecacheux *et al.*, 2012) ;

- **simulation de la submersion en 1D avec le code SWASH sur une durée de 1h** (en conditions maximisantes), ce qui correspond à une série d'environ 240 vagues afin d'obtenir un nombre de vagues représentatif des phénomènes ;

Simulation SWAN 2D

Les calculs ont été menés dans un premier temps à l'aide du code SWAN en 2D, dans des conditions maximisantes (vagues et niveau d'eau maximaux le 22/01/2002, même si les maximums n'étaient pas simultanés lors de l'événement : à environ 15h00 UTC pour les vagues et à environ 09h00 UTC pour le niveau d'eau).

Les simulations du cyclone Dina menées lors de l'étude HOULREU (Pedreros *et al.* 2009) et modifiées par Lecacheux *et al.* (2012) pour calculer les houles équivalentes au large orthogonales à la côte ont été exploitées. Les caractéristiques des houles de référence calculées par SWAN pour forcer les profils SWASH à 50m de profondeur sont présentées dans le Tableau 14.

Profil	Lieu	Conditions de houles calculées par SWAN2D et corrigée au droit des deux sites à 50m de profondeur	
		Hs (m) orthogonal	Tp
4.1	Saint-André	16.5	17
4.2	Saint-André	17.1	17

Tableau 14 – Événement de référence « cyclone Dina » : résultat du modèle SWAN au droit des deux profils à 50m de profondeur, avec correction d'incidence (Hs équivalent à une houle orthogonales à la côte)

Simulation de la submersion SWASH 1D (en conditions stationnaires sur une durée de 1h)

La propagation des vagues de 50m de fond jusqu'à la côte ainsi que la submersion marine ont été calculées grâce au modèle SWASH (Simulating WAVes till SHore). Il s'agit d'un code vague-à-vague développé par l'Université Technologique de Delft aux Pays-Bas (Zijlema *et al.*, 2011). Il résout les équations de Saint-Venant non linéaires (*nonlinear shallow water*) en incluant les termes non-hydrostatiques de la pression. Ce code permet de simuler la propagation des vagues en domaine côtier ainsi que la submersion marine car il tient compte des phénomènes de : réfraction, diffraction, frottement au fond, gonflement, déferlement, réflexion, interactions (vague-vague, vague-courant), génération des courants induits par les vagues, le traitement de l'interface sèche-mouillée (en zone de swash) et la propagation des écoulements en présence d'ouvrages et du bâti.

Il est à noter que ce code ne contient pas de module morphodynamique si bien qu'il ne peut pas modéliser l'érosion des plages ou des cordons littoraux observés lors des cyclones.

Les caractéristiques déterminées précédemment avec SWAN au droit du profil 3.1 sont utilisées comme conditions aux limites pour SWASH à une profondeur de 50 m. La propagation des vagues de 50m de fond 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 de ce dernier dans les deux scénarios étudiés (scénarios de référence et 2100).

Les calculs sont menés sur des profils topo-bathymétriques issus des données Litto3D¹⁴ ré-échantillonnées pour une résolution de calcul de 1m dans l'axe du profil.

¹⁴ Ces profils n'intègrent pas le bâti.

En une dimension, le code SWASH prend en compte une friction sur le fond par l'intermédiaire d'un coefficient de Manning. Ce coefficient varie en fonction de la nature du fond. Pour cette étude, trois coefficients de Manning différents ont été considérés :

- Une valeur de Manning associée au « fond océanique » pour les profondeurs inférieures à 15-20 m ;
- Une valeur de Manning associée à l'interface terre-mer caractérisant le cordon littoral entre la profondeur de 15-20m (on niveau de la rupture de pente lorsqu'elle est visible) jusqu'au niveau du haut de plage ou de l'arrière-dune lorsqu'elle est présente. La limite peut également correspondre au début de la zone anthropisée (route, bâtiment...). Ce secteur correspond au cordon littoral constitué de galets cyclopéens de grande taille ;
- Une dernière valeur de Manning est associée à la zone située plus en arrière. Elle tient compte, en valeur moyenne de « rugosité », d'obstacles (bâtiments, murets, clôtures...), de rues ou de végétation suivant la configuration du site.

Des essais ont été réalisés pour cerner l'importance des valeurs de Manning à considérer sur les trois zone-types décrites ci-dessus. L'analyse des résultats montre l'importance prépondérante de la valeur du Manning associée au cordon littoral sur lequel le déferlement se produit et sur lequel les premiers franchissements sont calculés. Sur cette zone, la valeur du Manning est comprise entre 0.03 et 0.08 s/m^{1/3} (S.Bunya et al, 2010).

Sur le fond océanique, la valeur choisie n'a que peu d'influence sur la distance de submersion à l'intérieur des terres. La valeur considérée sera de 0.02 s/m^{1/3} (S.Bunya et al, 2010).

Sur la zone arrière littorale, la valeur sera choisie en fonction du niveau d'encombrement, de végétation et d'urbanisation. Celle-ci sera autour de 0.15 s/m^{1/3} (S.Bunya et al, 2010).

Les résultats obtenus par ces simulations permettent de connaître à tout instant la surface libre de l'eau le long des profils 4.1 et 4.2 et d'en tirer des animations retraçant les mécanismes mis en jeu (Figure 43). Les résultats permettent également de connaître sur ce profil pour chaque niveau d'eau, les caractéristiques globales de la simulation (*setup*, cotes maximales et minimales de l'eau le long du profil, courants maximaux en flux et en reflux).

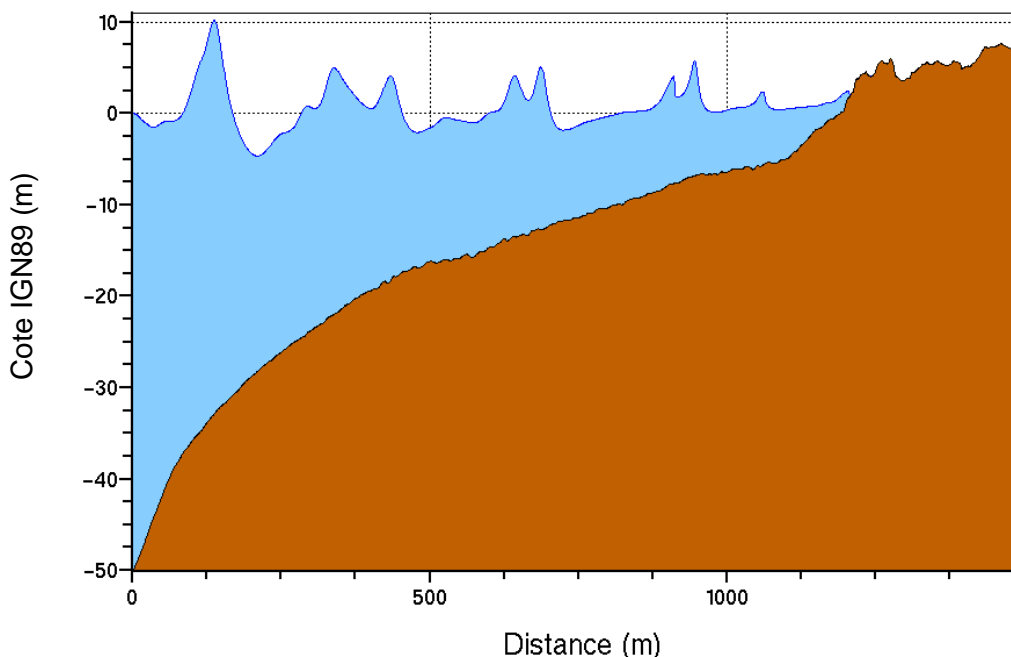


Figure 43 – Aperçu de la propagation des vagues le long d'un profil pendant la simulation

Ces résultats fournissent le run-up maximal atteint par les vagues sur les plages au droit des profils.

5.3.4. Analyse des résultats des simulations SWASH 1D

Les paragraphes suivants présentent les résultats des simulations numériques sur la commune de Saint-André. Les résultats sont donnés en termes de hauteur d'eau et de vitesse maximale atteinte pendant la simulation. Les figures suivantes permettent également de repérer les limites de l'aléa fort telles que définies par le modèle numérique, pour les scénarios de « référence » et « 2100 ».

Les résultats obtenus sur les profils 1D sont représentés en Figure 44 et Figure 45 et en Figure 46 et Figure 47. Ces dernières permettent de visualiser :

- Les hauteurs d'eau maximales à terre pour le scénario de référence et 2100 ;
- Le niveau statique de référence et 2100 ;
- La topographie des profils au niveau des zones de déferlement.

Ces résultats sont illustrés sur des photographies aériennes avec les limites atteintes par les vagues qui ont franchi le cordon littoral pendant l'évènement de référence et l'évènement 2100. Compte tenu des fortes vitesses observées dans la zone de franchissement, cette limite atteinte par les vagues est généralement considérée comme étant la limite de l'aléa fort (Figure 44 & Figure 45 & Figure 46 & Figure 47). Elle peut localement être projetée 30 à 50 mètres dans les terres dans le cas où il existe un historique concernant des projections de matériaux.

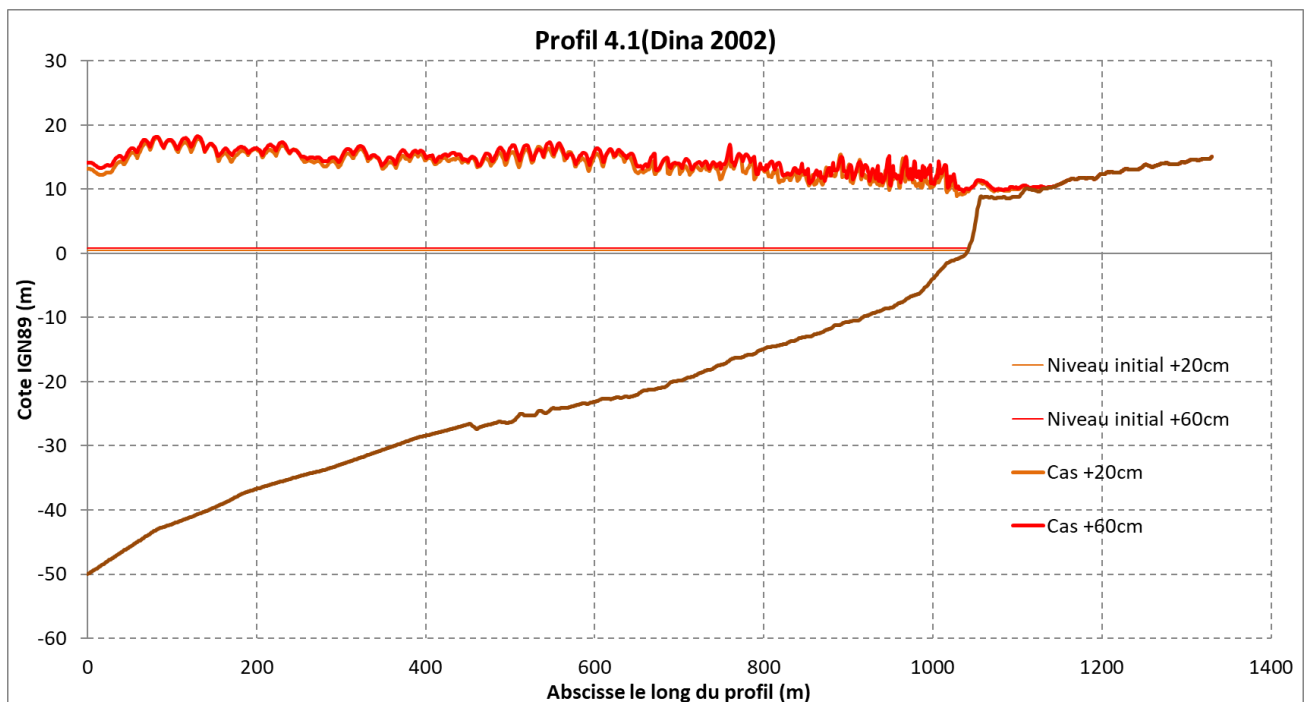


Figure 44 : Evènement de référence « cyclone Dina » : niveau d'eau maximal obtenu le long du profil 4.1 à Saint-André pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Profils en travers

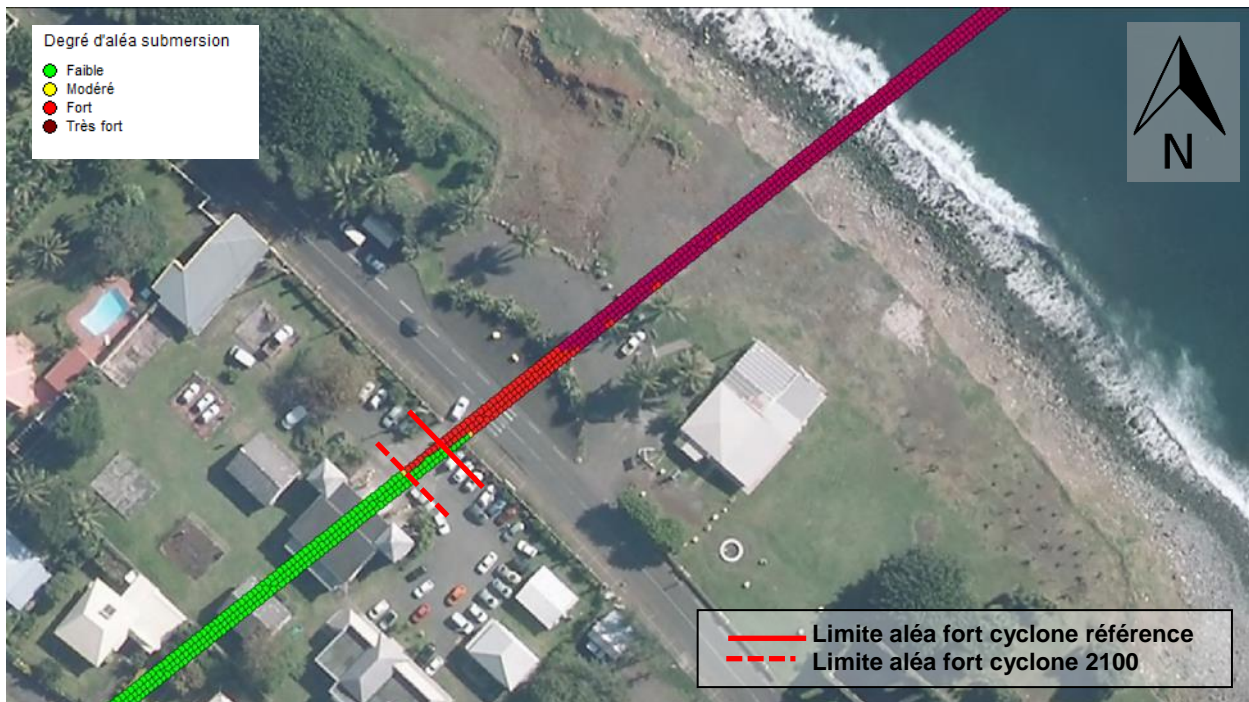


Figure 45 : Evènement de référence « cyclone Dina » : Limites de l'aléa fort le long du profil 4.1 pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Vue en plan (Fond orthophotographie 2011, IGN©)

Le profil 4.1 (Figure 44) présente la particularité d'être relativement plat, notamment du fait de l'existence de travaux de terrassement et de remblais qui sont régulièrement réalisés au niveau du front de mer. La topographie ne contrôle donc pas la submersion comme c'est parfois le cas lorsqu'un obstacle topographique élevé limite le franchissement. Dans cette zone c'est plutôt la distance de parcours qui permet la dissipation de l'énergie des vagues franchissantes. Celles-ci atteignent la route pour l'aléa de référence.

On rappelle que le scénario de référence correspond au cyclone DINA (2002) avec une première prise en compte du changement climatique à moyen terme (+20 cm) et que le scénario de 2100 correspond au même cyclone avec une prise en compte du changement climatique à long terme de +60 cm.

Le second profil (Figure 46) comporte sensiblement les mêmes caractéristiques que le profil précédent. La distance de dissipation de la houle sur ce secteur est de l'ordre de 100 m en arrière du talus littoral.

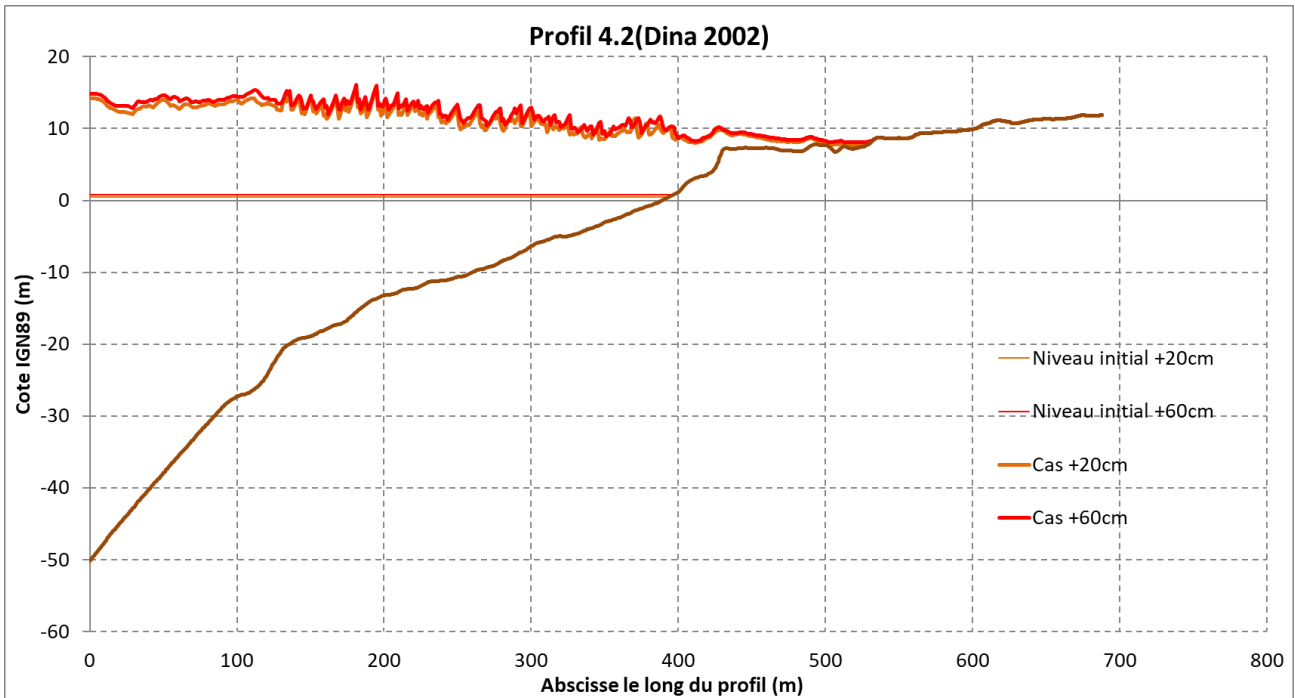


Figure 46 : Evènement de référence « cyclone Dina » : niveau d'eau maximal obtenu le long du profil 4.2 à Saint-André pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Profils en travers



Figure 47 : Evènement de référence « cyclone Dina » : Limites de l'aléa fort le long du profil 4.2 pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Vue en plan (Fond orthophotographie 2011, IGN©)

5.3.5. Zonage cartographique de l'aléa submersion marine

Qualification de l'aléa

La qualification de l'aléa repose sur la prise en compte de la dynamique de submersion de la manière suivante (Tableau 15) :

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

Tableau 15 – Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (Guide PPRL, MEDDTL, 2012 et DGPR, 2013)

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

Traitements et zonages cartographiques pour le scénario de référence

Le zonage est cartographié sous SIG à partir :

- Des données historiques recueillies
- 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 dans le Tableau 15.

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 différentes approches en fonction des configurations. 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 de la connaissance du terrain.

Par ailleurs, reprenant certains éléments méthodologiques du guide national, les principes cartographiques suivants ont été retenus pour la cartographie de l'aléa de référence :

- *La limite des aléas est définie par les résultats du modèle le plus représentatif du secteur ;*
- *Un bandeau forfaitaire (30 à 50 m) d'aléa fort est considéré pour les secteurs pouvant être concernés par des projections de matériaux sédimentaires (galets, fragments de coraux) et de débris ;*
- *A minima, le bandeau d'aléa modéré fait 20 m ou 10 m de large suivant que le profil du terrain naturel soit plat/descendant ou ascendant ;*
- *A minima, le bandeau d'aléa faible fait 15 m de largeur ;*

- Derrière un ouvrage littoral de protection contre la submersion (type levée ou digue), un bandeau de 50 m d'aléa fort est considéré ;
- De la même manière, derrière un massif de type cordon dunaire ou cordon littoral, une zone de 50 m d'aléa fort est également considérée ;
- En zone de déferlement cyclonique, un bandeau de 50 m d'aléa fort est considéré en arrière du trait de côte ;
- Dans les zones d'estuaire, et lorsque la dynamique des vagues n'est plus à considérer (car positionnée très en amont), le niveau statique calculé en front de mer (niveau de la mer + marée + setup + surcote atmosphérique) est utilisé pour cartographier la zone submergée par une méthode MNT simplifiée.

Traitements et zonages cartographiques pour le scénario 2100

Concernant la prise en compte du changement climatique, une analyse d'ensemble des résultats des simulations numériques a été réalisée.

Chaque profil ayant été modélisé selon les scénarios de « référence » et de changement climatique (scénario « 2100 »), il a été possible de mesurer sur chacun de ces profils la distance de recul de l'aléa que pouvait entraîner l'élévation du niveau marin à échéance 2100. Ces résultats sont synthétisés dans le graphique suivant (Figure 48).

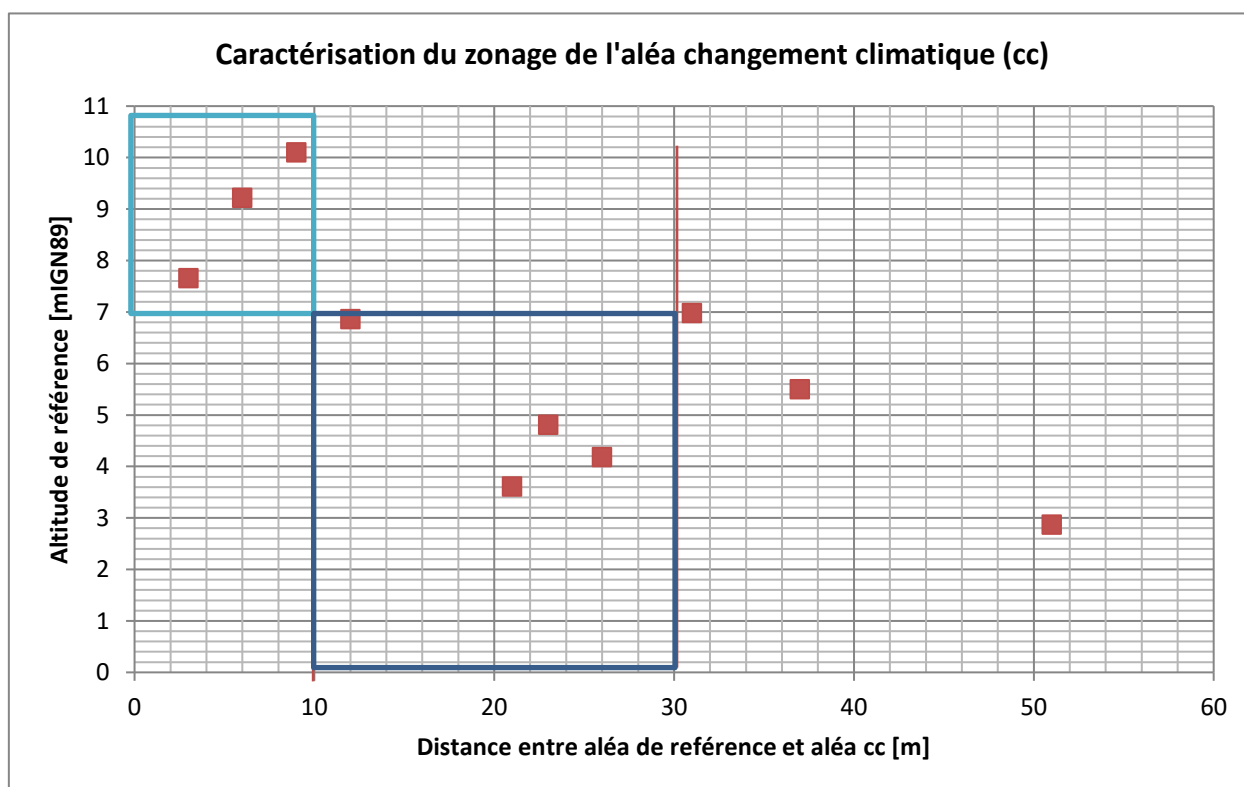


Figure 48 - Caractéristiques du zonage changement climatique (écart inférieur à 10 m pour les profils dont l'aléa fort se situe au-dessus de 7m d'altitude, en bleu clair et écart compris entre 10 et 30 m si l'aléa fort se situe à une altitude plus basse, en bleu foncé).

Sur les 10 modèles réalisés sur l'ensemble du littoral Nord Est de la Réunion (Chateauminois & al 2014), on peut constater une forte disparité de l'impact du changement climatique sur le recul que celui-ci peut entraîner en termes de zonage cartographique. Ce recul planimétrique varie entre 3 m et peut monter jusqu'à 51 m suivant le profil.

Pour cartographier le zonage de submersion « 2100 », s'agissant d'une approche à long terme, il a semblé pertinent de chercher à moyenniser ces résultats de modélisation plutôt que de chercher à faire parler les modèles de façon isolée. L'autre objectif est d'aboutir à des règles simples mais qui restent pertinentes vis-à-vis des phénomènes étudiés.

Pour ces raisons, et sur la base de l'analyse de la figure précédente, les choix méthodologiques suivants ont été réalisés pour cartographier le zonage submersion « 2100 » :

« Le zonage de référence subit un recul de 10 à 30 m suivant que l'altitude atteinte par la limite de l'aléa fort de référence se trouve au-dessus ou au-dessous de la cote 7m IGN89 ».

Ce résultat est obtenu en faisant les regroupements indiqués par les encadrés bleu-ciel et bleu-marine sur la figure ci-dessus :

- Les 3 profils les moins impactés par le changement climatique (recul inférieur à 10m) présentent une limite d'aléa fort située au-dessus de 7m IGN89.
- Les 5 profils suivants, et dont la limite d'aléa fort se situe au-dessous de 7m, présentent un recul inférieur ou égal à 30m.
- Les deux autres profils qui affichent un recul supérieur à 30m sont considérés comme des cas particuliers qui peuvent sortir de l'approche moyennée.

Cette méthode permet d'aboutir à une règle simple et intelligible puisqu'elle permet de prendre en compte implicitement l'inclinaison du terrain (pente littorale) sur le secteur cartographié.

Limitation de l'extension de la submersion marine par l'altitude

L'utilisation de tampons planimétriques pour la cartographie des aléas peut engendrer des incohérences notamment sur les secteurs à falaise ou plus généralement sur les secteurs présentant une forte altitude à des distances relativement proches du trait de côte.

Il a donc été introduit une règle méthodologique permettant de contraindre l'utilisation de ces tampons planimétriques. Une analyse de l'ensemble des modélisations numériques réalisées sur le secteur Nord-Est de la Réunion a permis de définir la cote maximale atteinte par les vagues à la cote. Cette cote de l'ordre de 11 m NGR a été considérée comme étant une des limites possibles de la submersion marine.

Le zonage de la submersion marine sur la commune de Saint André a donc été reconsidéré en prenant en compte cette cote altimétrique afin de contraindre l'extension de la submersion marine notamment lorsque les terrains se situent éloignés du littoral ou à une altitude nettement supérieure à cette cote altimétrique.

Une analyse de la configuration d'un secteur peut imposer d'étendre les zones d'aléas au-dessus de cette cote altimétrique en fonction de caractéristiques morphologiques locales particulières (proximité du rivage, cap rocheux en front de mer qui favorise l'apparition de vagues d'intensité plus importantes, topo-bathymétrie au droit du secteur favorable à des submersions plus intenses que les profils de simulation du nord-est).

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 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 submersion 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 2100.

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

- Une carte de synthèse au 1/10 000^{ème} présentant les modes de submersions (extrait en Figure 49, Annexe 3), 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 ,
- Une carte de zonage au 1/5000^{ème} de l'aléa de référence et de l'aléa à échéance 2100 (extrait en Figure 50, Annexe 4).

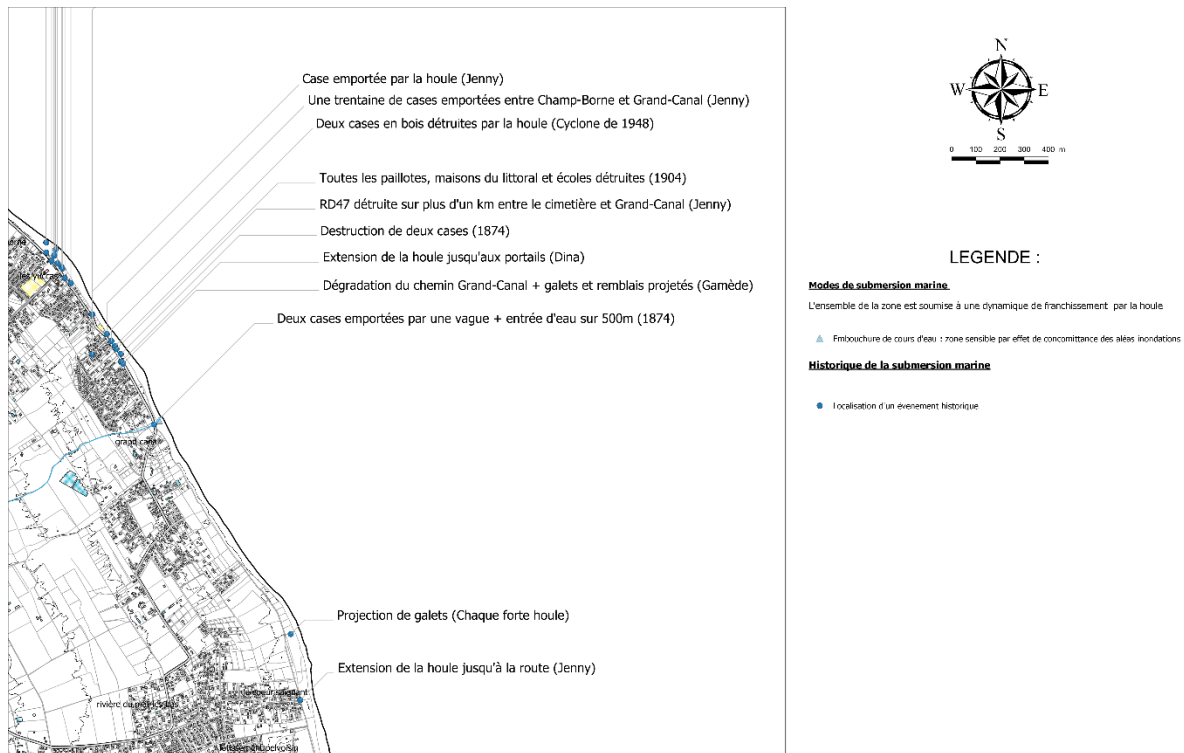


Figure 49 : Extrait de la carte de synthèse de l'histoire de la submersion marine de la commune de Saint-André (cf. Annexe 3)

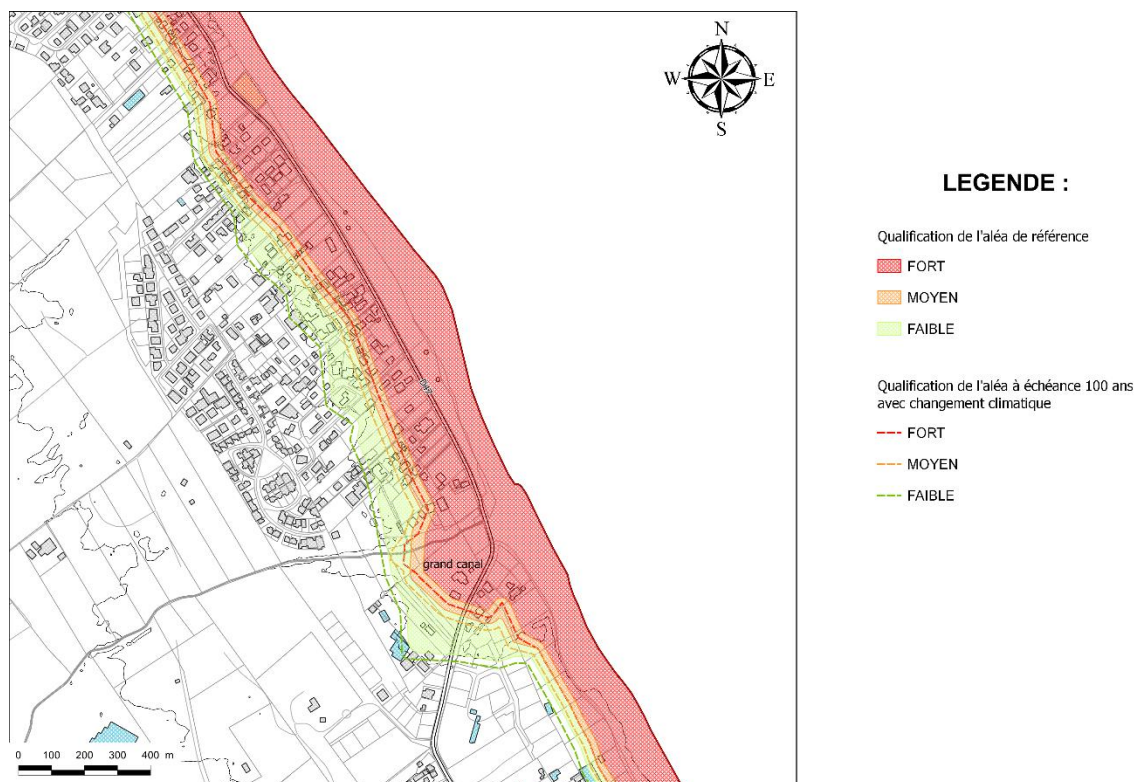


Figure 50 : Extrait de la carte d'aléa submersion marine de la commune de Saint-André (cf. Annexe 4)

5.3.6. Cas particulier : Secteur de Bois Rouge

Le secteur de Bois Rouge, situé à l'extrême ouest de la commune de Saint-André, est un site comportant de forts enjeux industriels particulièrement exposés aux aléas côtiers en raison de sa localisation en bordure littorale.

Contexte

Le site industriel de Bois Rouge est composé de la centrale thermique de Bois Rouge (ALBIOMA), de la sucrerie (TERREOS), de la distillerie SAVANNA, du centre de traitement de déchets industriels spéciaux et de terrains en friche (STAR-DIS / SUEZ).

Face au fort impact de l'aléa submersion marine sur leurs activités, les sociétés ALBIOMA, TERREOS et SAB-SUEZ ont sollicité une nouvelle modélisation de l'aléa submersion marine qui se veut plus précise sur le secteur de Bois Rouge. Cette modélisation, réalisée par ARTELIA, a été réalisée par un couplage des modèles TOMAWAC et TELEMAR-2D pour caractériser d'une part la propagation des vagues du large vers la côte, estimer les volumes franchissants et ensuite reproduire l'écoulement des masses d'eau à terre.

Méthodologie

La définition des aléas submersion marine par ARTELIA¹⁵ repose sur plusieurs étapes précisées dans le schéma ci-dessous (Figure 51) :

¹⁵ Rapport de mission : Détermination des aléas submersion marine sur le site de Bois Rouge : Définition de solutions de protection ; ARTELIA, septembre 2021, 470 2632

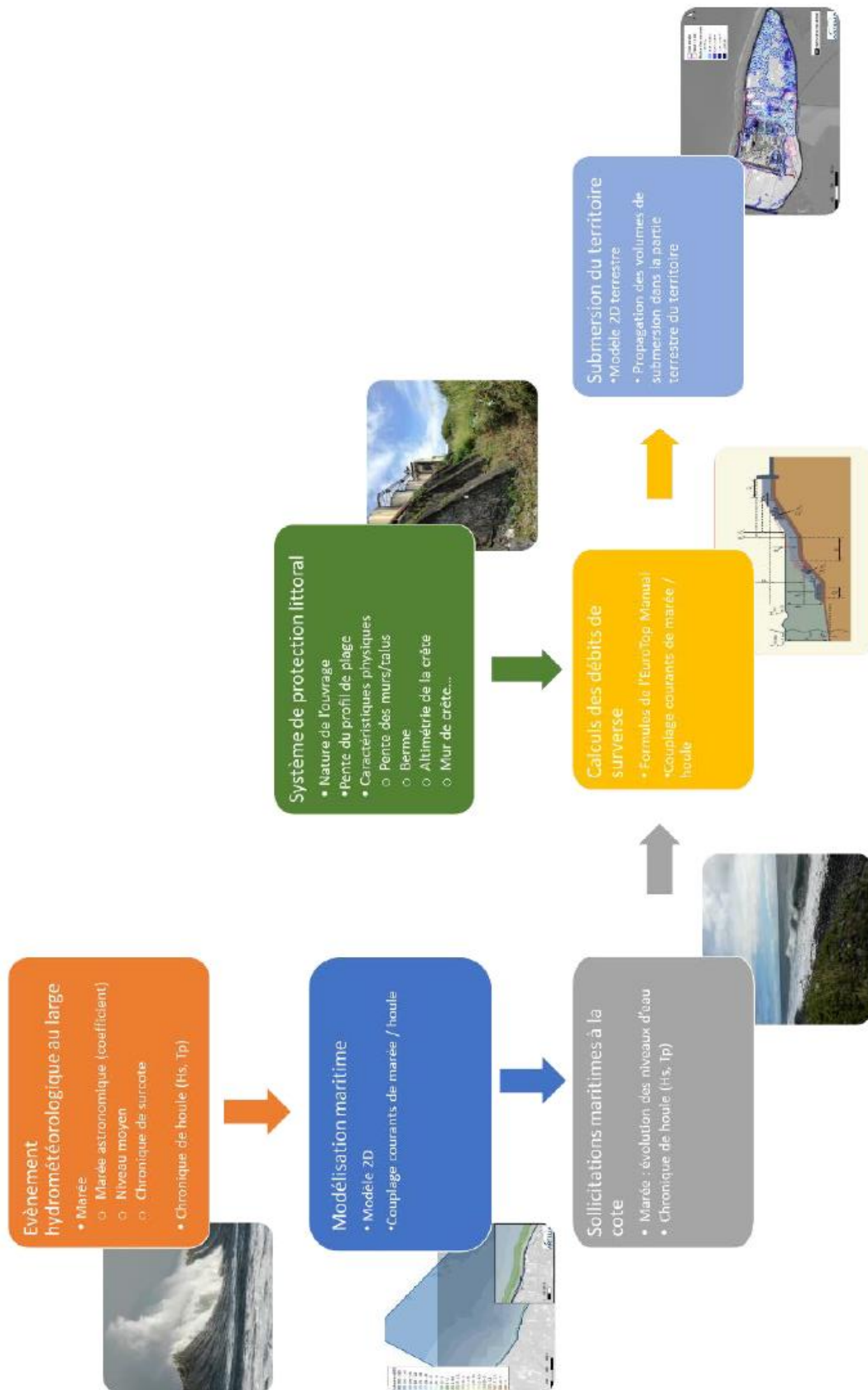


Figure 51 – Synthèse de la méthodologie utilisée par ARTELIA pour estimer l'aléa submersion marine

Évènement hydrométéorologique de référence : ARTELIA

Afin de définir les aléas submersion marine, il convient de définir les évènements de référence réglementaire court et long-terme, respectivement à +20 et +60 cm du niveau marin mesuré aujourd'hui, selon différents paramètres.

L'évènement est défini par les caractéristiques des phénomènes suivants qui constitueront les caractéristiques de référence pour les modélisations de submersion marine :

- Houle au large : la chronique de houle (Hs max = 14m / Tp constant = 16.5s) associée au cyclone Dina utilisée pour la réalisation du PAC de 2014 a été conservée pour cette étude complémentaire sur le secteur de Bois Rouge. Elle définit la chronique de houle de référence pour les évènements court et long-terme.
- Marée théorique: l'hypothèse d'un niveau d'eau constant et égal au niveau d'eau observé lors du pic de houle tout au long de la modélisation utilisée lors de la réalisation du PAC 2014 n'a pas été retenue. Un cycle de marée générant des niveaux de pleine-mer importants et concomitant avec le pic de houle est retenu : à savoir les marées du 26/02/2002 au 01/03/2002 pour lesquels les niveaux de pleine-mer sont compris entre **0.30 et 0.40m NGR**.
- Chronique de surcote atmosphérique : des études antérieures (ARTELIA 2012 –Protection aéroport / BRGM : Méthodologie pour l'évaluation et la cartographie des aléas côtiers à La Réunion) indiquent les analyses statistiques suivantes :
 - **Surcote annuelle : 0.30 m**
 - **Surcote décennale : 0.50 m**
 - **Surcote trentennale : 0.70 m**
 - **Surcote centennale : 0.85 m**

La surcote trentennale (0.70m) est considérée constante dans le temps et est ajoutée à la valeur maximale de la marée théorique pour obtenir le niveau d'eau utilisé pour les modélisations. Ce choix est extrêmement sécuritaire mais permet de s'affranchir des questions liées à la prise en compte d'une surcote variable dans le temps et est seulement appliquée au large. Les effets de set up générés lors du déferlement des vagues sont appliqués lors de la modélisation. La surcote calculée à la côte est donc supérieure à cette rehausse du niveau moyen considérée au large et présente donc une occurrence centennale ou supérieure.

Cette démarche a permis de définir deux évènements hydrométéorologiques de référence selon deux échelles de temps : court et long-terme, présentant une occurrence supérieure à 100 ans.

Ainsi les cycles d'évolution du niveau d'eau au large se caractérisent par les niveaux de pleine mer suivants :

- Pleine-mer Evènement naturel (marée + surcote trentennale) = **1.10 m NGR**
- Pleine-mer Evènement court terme (marée + surcote trentennale + estimation de la hausse du niveau marin à court-terme) = **1.30 m NGR**
- Pleine-mer Evènement court terme (marée + surcote trentennale + estimation de la hausse du niveau marin à long-terme) = **1.70 m NGR**

La modélisation de la propagation des houles depuis le large jusqu'à l'interface terre-mer représenté par les systèmes de protection présents sur le site, a été réalisé selon ces paramètres de houle, de marée théorique et de surcote événementielle pour les évènements de référence et à l'horizon 2100.

Système de protection et débits franchissant

Plusieurs systèmes de protection sont présents sur le site de Bois-Rouge, qu'ils soient anthropiques (murs anti-houle, muret, bâtiment) ou naturels (cordons sédimentaires, terrain en friche). Ces systèmes définissent, en plus des caractéristiques au large, la capacité de submersion de la houle incidente selon leur morphologie.

Un diagnostic visuel ainsi que 16 levés topographiques des systèmes de protection présents sur le site de Bois-Rouge ont été effectués afin de mieux caractériser la sollicitation hydraulique associée aux événements hydrométéorologiques de référence sur ces ouvrages.

La modélisation des débits franchissant a ensuite été calculée pour ces 16 profils caractéristiques des protections existantes. Cette modélisation consiste à estimer un volume d'eau capable de franchir le système de protection, de répartir ce volume de l'autre côté de l'ouvrage et de matérialiser son écoulement selon la topographie du site sous l'influence des pentes et des obstacles aux écoulements rencontrés.

Ainsi, un modèle bidimensionnel d'écoulement d'eau a dû être appliqué au vu du contexte topographique du site, marqué par la présence d'une zone basse (< 4.0 m NGR) en arrière de la protection littorale (Figure 52).

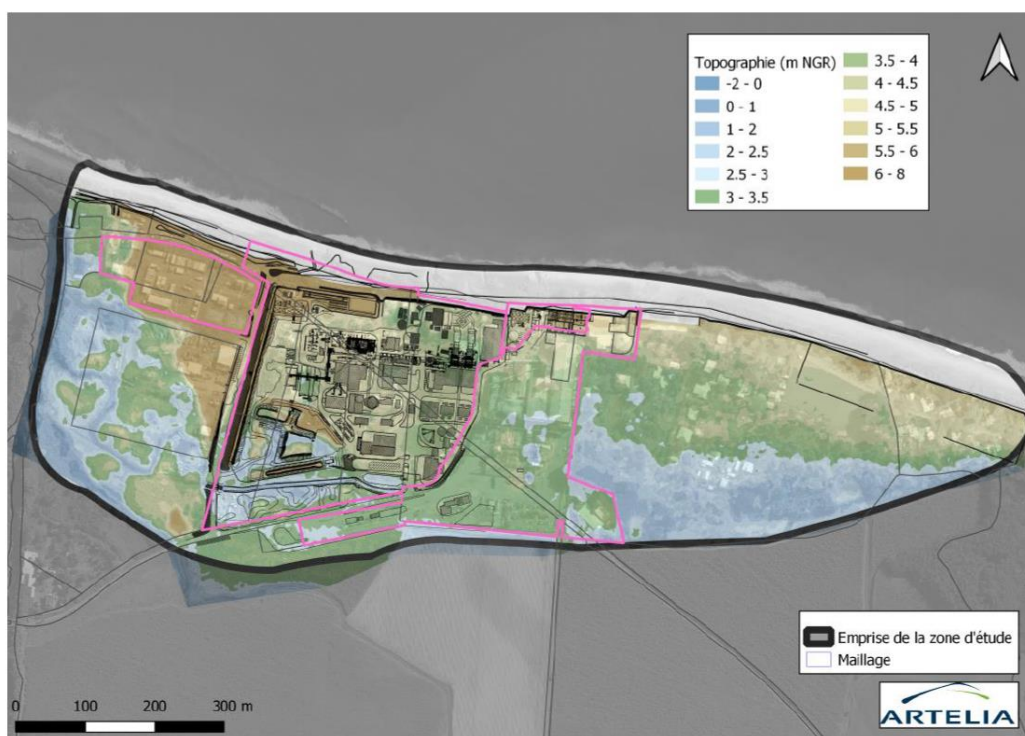


Figure 52 – Extrait des données topographiques utilisées pour l'étude ARTELIA

Cette configuration particulière du site de Bois-Rouge peut se traduire par un phénomène de transfert de volumes de submersion au niveau des zones dépressionnaires, soit par un phénomène de stockage des volumes de submersion au niveau des zones « plates ». Deux paramètres sont pris en compte pour modéliser la submersion marine : les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement maximales.

Deux configurations de submersion concernant les ouvrages de protection ont été retenues et étudiées :

- Configuration avec prise en compte des protections actuelles sans défaillance contre la submersion ;
- Configuration sans prise en compte des protections actuelles contre la submersion afin de simuler une rupture de l'ouvrage ou du cordon sédimentaire.

La configuration sans prise en compte des protections actuelles a été retenue pour la cartographie des aléas afin de considérer le risque maximal potentiel appliqué au site d'étude et correspondre au Guide d'élaboration des PPRL de 2014 : scénario en l'absence d'ouvrage.

Hypothèses mises en œuvre dans la modélisation

Les outils utilisés pour cette modélisation prennent en compte plusieurs hypothèses listées ci-après pouvant sous évaluer les phénomènes naturels ayant lieu sur le site :

- Les bâtiments ne sont pas représentés : le rôle de blocage des débordements et de canalisation des écoulements dans les rues ne sont pas représentés par cet outil.
- Les murets présents sur le secteur d'étude ne sont pas représentés. Ceux-ci ne créent pas de zones fermées et leur influence se limite donc à retarder la progression des écoulements et à les centraliser au niveau de leurs ouvertures.
- L'influence de l'évolution des fonds sur les caractéristiques de houles en pied d'ouvrage n'est pas intégrée dans cette modélisation.
- Les volumes d'eau définis selon les conditions hydrométéorologiques de l'évènement de référence sont injectés dans le modèle à vitesse nulle à la base de l'ouvrage côté « terre ». Cette hypothèse sous-estime grandement l'impact mécanique de la houle sur l'ouvrage et le phénomène de franchissement des ouvrages par la mer lors d'évènements extrêmes.

Zonage cartographique de l'aléa submersion marine sur le secteur de Bois Rouge

Les aléas de référence et à l'horizon 2100 représentés sur le secteur de Bois-Rouge sont issus du croisement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulements maximales modélisées selon le tableau 20.

Cartographie des aléas submersion marine de référence et à l'horizon 2100 du secteur Bois-Rouge

Le zonage cartographique sur le secteur de Bois-Rouge est quant à lui, issu du croisement entre la modélisation bidimensionnelle du secteur, réalisée par Artelia, et d'un bandeau forfaitaire de 50 m appliqué à partir des systèmes de protection. Ce bandeau sécuritaire permet de prendre en compte le risque de franchissement des ouvrages par la houle.

Ce croisement est intégré au reste de la modélisation 1D réalisée sur le reste de la commune pour une meilleure caractérisation de l'aléa submersion marine du secteur de Bois-Rouge.

On obtient une cartographie pour l'aléa submersion marine de référence (évènement de référence actuel, Figure 53) et (échéance 2100, Figure 54) pour le secteur de Bois-Rouge.

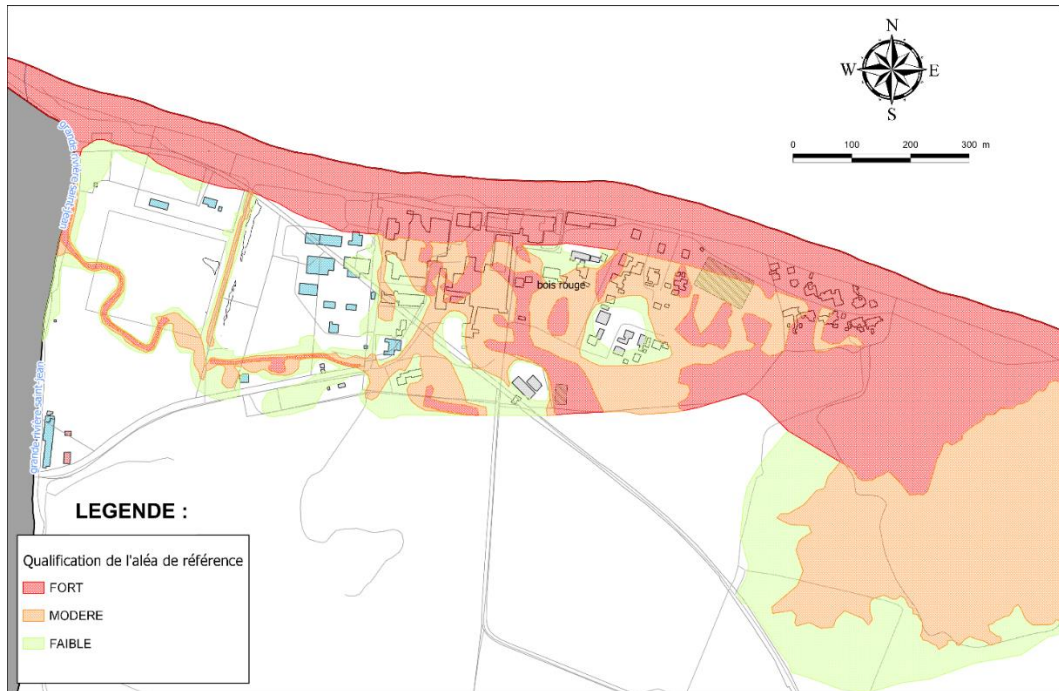


Figure 53 – Extrait cartographique de l'aléa submersion marine de référence actuel sur le secteur de Bois-Rouge (Annexe 3)

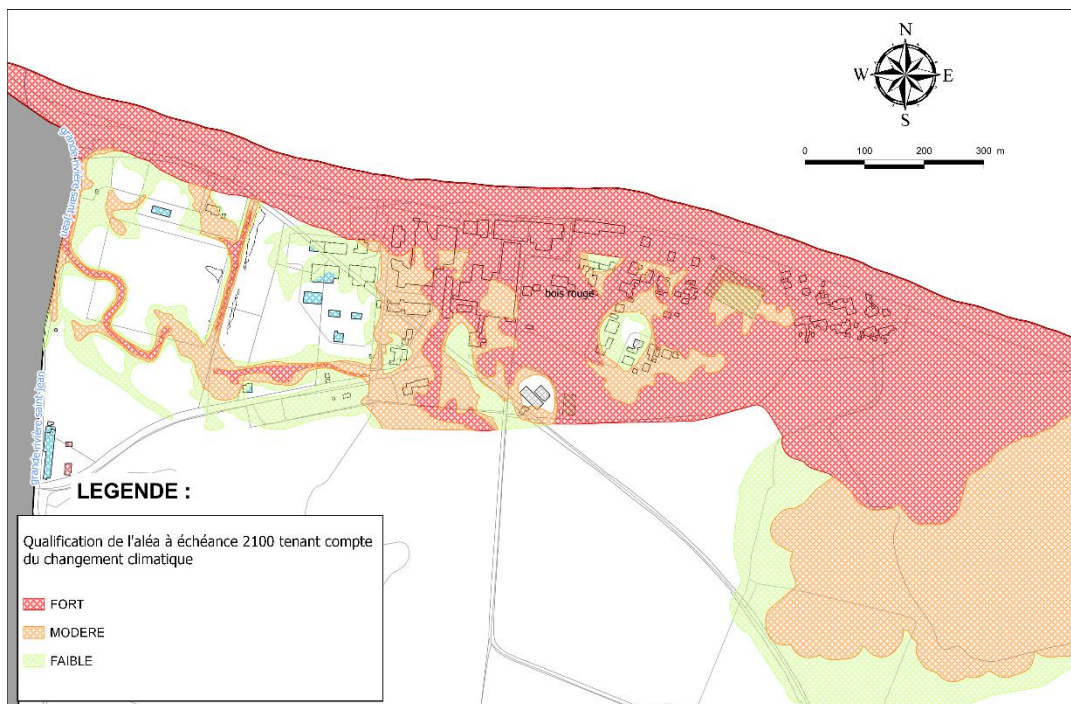


Figure 54 – Extrait cartographique de l'aléa submersion marine à échéance 2100 sur le secteur de Bois-Rouge (Annexe 3)

6. Lexique des sigles et termes techniques

Sigles

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

Organismes / Administrations

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

Termes techniques

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

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

Aléa de référence : Au sens du guide national de mai 2014, 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 de mai 2014, l'aléa de 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.

7. Principaux textes officiels

7.1. 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 ;

7.2. 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.

7.3. 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

8. Bibliographie

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

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

Blanguy A., De La Torre Y. et Vaslet E., avec la collaboration de Mallet C. et Dewez T. (2009) – Morphodynamique des littoraux de La Réunion. Phase 3 « Morpholit3 » : Suivi et gestion de l'érosion côtière sur 12 sites identifiés comme sensibles. BRGM/RP-57431-FR, 105 p., 67 ill.

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. ;

Bunya, J. C. Dietrich, J. J. Westerink, B. A. Ebersole, J. M. Smith, J. H. Atkinson, R. Jensen, D. T. Resio, R. A. Luettich, C. Dawson, & V. J. Cardone, A. T. Cox, M. D. Powell, H. J. Westerink, And H. J. Roberts, (2010), A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model Development and Validation

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

Chateauminois E., Thirard G., Pedreros R. et Longueville F. (2014) – Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Littoraux des communes du Nord-Est de la Réunion. Rapport final. BRGM/RP-64088-FR, 69 p et 4 annexes hors-texte.

DAF, D.D.E, Météo-France, BCEOM, SOGREAH (1992). Guide d'Estimation des Débits de Crues de la Réunion de 1992.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mireille Mayoka, Météo-France, Direction interrégionale de La Réunion, (1998). Les cyclones à la Réunion, 50 p.

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

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

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

Soler O., Météo-France, (1997). Atlas climatique de La Réunion,

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.

Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Engng.*, 58: 992-10



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM Réunion

5 Rue Sainte Anne
97400 SAINT DENIS

Tél. : 02 62 21 22 14