

DEPARTEMENT DE LA REUNION

Commune de Bras-Panon



PLAN DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX

« Submersion marine et recul du trait de côte »

NOTE DE PRESENTATION

***Consultation des personnes
publiques associées***

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** (PPRL) prend en compte le risque « recul du trait de côte » et le risque « submersion marine » 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 appliquant le principe de précaution et en s'appuyant sur les connaissances disponibles. Ainsi, le PPRL a été dressé au regard des risques recensés dans les études antérieures à son établissement. Le classement réglementaire rouge/bleu ne tient pas compte dans sa cartographie des travaux de protection à venir.

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

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

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	12
1.1. Organisation de la gestion des risques.....	12
1.2. Prévention des risques naturels	13
1.3. Plan de Prévention des Risques (P.P.R.) naturels.....	14
1.4. Catastrophes naturelles majeures à La Réunion	14
2. PRESENTATION DU PPR.....	16
2.1. Contexte réglementaire du PPR	16
2.2. Procédure réglementaire	17
2.2.1. Secteurs géographiques concernés	17
2.2.2. Etat des réflexions menées	17
2.2.3. Démarches à mener	18
2.3. Assurances et infractions au PPR	19
2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur	19
2.3.2. Infractions au PPR et sanctions.....	21
2.4. Expropriation et Mesure de sauvegarde	22
2.5. Responsabilités	22
2.5.1. Etablissement du PPR.....	22
2.5.2. Autorisation d'occuper le sol.....	23
3. PRESENTATION DE LA COMMUNE.....	24
3.1. Contexte de la zone d'étude	24
3.1.1. Situation géographique.....	24
3.1.2. Contexte géomorphologique.....	25
3.1.3. Contexte géologique.....	25
3.1.4. Réseau hydrographique	27
3.1.5. Contexte pédologique.....	29
3.1.6. Contexte géomorphologique littoral.....	32
3.1.7. Contexte climatique	34
3.2. Enjeux et vulnérabilité	40
4. HISTORICITE ET CARACTERISATION DES PHENOMENES NATURELS	43
4.1. Phénomènes historiques	43
4.2. Arretes de catastrophes naturelles	44
4.3. Caractérisation des aléas littoraux.....	45
4.3.1. Aléa recul du trait de côte (RTC)	45
4.3.2. Aléa submersion marine	50

5. CARACTERISATION ET CARTOGRAPHIE DES ALEAS.....	55
5.1. Définitions et notions générales.....	55
5.2. Alea recul du trait de côte.....	55
5.2.1. Cadre méthodologique national.....	55
5.2.2. Estimation de l'aléa recul du trait de côte.....	56
Zonage de l'aléa recul du trait de côte.....	61
5.3. Aléa submersion marine.....	64
5.3.1. Cadre méthodologique national.....	64
5.3.2. Méthodologie et scénarios.....	66
5.3.3. Modélisation des submersions marines de référence.....	68
5.3.4. Analyse des résultats des simulations SWASH 1D.....	73
5.3.5. Zonage cartographique de l'aléa submersion marine.....	75
6. ÉLABORATION DU ZONAGE REGLEMENTAIRE.....	81
6.1. Méthodologie.....	81
6.1.1. Les espaces urbanisés et non-urbanisés.....	81
6.1.2. La submersion marine.....	82
6.1.3. Le recul du trait de côte.....	84
6.2. Traduction réglementaire des deux aleas.....	84
7. LEXIQUE DES SIGLES ET TERMES TECHNIQUES.....	87
7.1. Sigles.....	87
7.2. Termes techniques.....	89
8. PRINCIPAUX TEXTES OFFICIELS.....	91
8.1. Législation - Réglementation.....	91
8.2. Principales circulaires.....	91
8.3. Publication de guides.....	92
9. BIBLIOGRAPHIE.....	93

Liste des figures

Figure 1 – Délimitation du territoire communal de Bras-Panon (Fond ©IGN scan100® -2010)	24
Figure 2 - Carte géologique de la commune de Bras-Panon (BGRM/LGSR, 2006).....	26
Figure 3 - Réseau hydrographique de Bras-Panon (source : BDtopo2016®, MNT IGN 2012)	29
Figure 4 - Carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000	31
Figure 5 - Littoral de Bras-Panon – cône alluvial (Fond Ortho 2017 IGN).....	32
Figure 6 - Littoral de Bras-Panon – Cordon de galets (Fond Ortho 2017 – IGN)	33
Figure 7 - Littoral de Bras-Panon – Cordon de galets et embouchure de rivière	34
Figure 8 - Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)	35
Figure 9 - Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)	36
Figure 10 - Localisation des stations météo à proximité de Bras-Panon (©IGN Scan100® - 2010)	37
Figure 11 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France) L'œil passe à peine à 30 km des côtes, le scénario est donc majorant puisque la côte Nord de l'île passe dans le rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) excèdera largement les 200 km/h et les vagues dépasseront les 15 m par endroit.....	38
Figure 12 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)	39
Figure 13 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009)	40
Figure 14 - Graphique d'évolution de la population de la commune de Bras-Panon.....	41
Figure 15 - Extrait de la cartographie des enjeux du littoral de la commune de Bras-Panon (cf. Annexe 5)	42
Figure 16 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)	46
Figure 17 - Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012)	47
Figure 18 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)	47
Figure 19 - Les manifestations du recul des côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)	48
Figure 20 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)	49
Figure 21 - Berge de la rivière des Roches (Google Earth®, posté en octobre 2022)	50
Figure 22 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).....	51

Figure 23 - Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)	52
Figure 24 - Sites sensibles à l'action des houles (Chateauminois, 2015)	53
Figure 25 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007).....	53
Figure 26 – Isobathes 0, 10 et 20m de Bras Panon	54
<i>Figure 27 – Exemple de définition de 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)</i>	<i>58</i>
Figure 28 - Implantation des transects à Bras-Panon (Fond orthophotographique ©IGN, 2017) ...	59
Figure 29 - Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009).....	60
Figure 30 - Exemple d'artefact en couleurs les différents traits de côte historiques (Haut de plage) - Fond orthophotographique ©IGN, 2017	60
Figure 31 – Extrait de la synthèse de l'évolution historique du trait de côte de Bras-Panon (cf Annexe 1)	63
Figure 32 – Extrait de la cartographie de l'aléa recul du trait de côte de Bras-Panon (Annexe 2)..	64
Figure 33 – 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).....	67
Figure 34 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2014)	68
Figure 35 - Principales étapes nécessaires à la construction du MNE (Le Roy et al., 2012) – données Litto3D ©IGN.	69
Figure 36 - Localisation des transects de la simulation 1D à Bras-Panon	71
Figure 37 - Evènement de référence « cyclone Dina » : niveau d'eau maximal obtenu le long du profil 5.1 à Bras-Panon pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Profils en travers.....	74
Figure 38 - Evènement de référence « cyclone Dina » : Limites de l'aléa fort le long du profil 5.1 pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée –Vue en plan (Fond orthophotographie 2011, IGN©)	75
Figure 39 - Caractéristiques du zonage changement climatique	77
Figure 40 - Extrait de la carte de synthèse de l'historique de la submersion marine de la commune de Bras-Panon (cf. Annexe 3).....	78
Figure 41 - Extrait de la carte d'aléa submersion marine de la commune de Bras-Panon (cf. Annexe 4)	79
Figure 42 – Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Bras-Panon....	82

Figure 43 - Extrait de la traduction réglementaire du PPR de Bras-Panon	86
---	----

Liste des tableaux

Tableau 1 - Evénements historiques majeurs survenus à la Réunion	15
Tableau 2 - Précipitations journalières décennales et centennales (en mm)	37
Tableau 3 - Evolution de la population de Bras-Panon (source : @I.N.S.E.E).....	41
Tableau 4 - Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Bras-Panon (source : www.géorisques.gouv.fr).....	44
Tableau 5 - Liste des cyclones notables recensés par Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998)	45
Tableau 6 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)	49
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).....	56
Tableau 8 - Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées	57
Tableau 9 - Calculs de recul du trait de côte par secteurs homogènes sur la commune de Bras- Panon	61
<i>Tableau 10 - Valeurs 100Tx arrondi et plafonné ; Lmax ; Lr et Lr CC par secteurs homogènes pour la commune de Bras-Panon.....</i>	<i>62</i>
Tableau 11 – Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude).....	65
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)	69
Tableau 13 - Niveaux marins retenus pour la simulation de submersion.....	70
Tableau 14 – Evénement de référence « cyclone Dina » : résultat du modèle SWAN au profil à 50m de profondeur, avec correction d'incidence (Hs équivalent à une houle orthogonales à la côte) ...	73
Tableau 15 – Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion (Guide PPR, MEDDTL, 2012 et DGPR, 2013)	75
<i>Tableau 16 – Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés</i>	<i>83</i>
Tableau 17 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés	83

Tableau 18 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces non-urbanisés 85

Tableau 19 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés 85

Préambule

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

Ce dossier comporte plusieurs documents informatifs et réglementaires :

✓ Les documents informatifs :

- des cartes de localisation des phénomènes naturels historiques (submersion marine et recul du trait de côte) à l'échelle 1/10 000ème (annexes 1 et 3) ;
- une cartographie des aléas naturels (submersion marine et recul du trait de côte) à l'échelle du 1/5 000ème sur l'ensemble du linéaire côtier (annexes 2 et 4) ;
- une cartographie des équipements sensibles (enjeux) de la commune à l'échelle 1/10 000ème (annexe 5) ;
- Une cartographie réglementaire par prescription à l'échelle du 1/5 000ème sur l'ensemble du linéaire côtier (annexe 6)

✓ Les documents réglementaires :

- la note de présentation, décrivant le territoire de Bras-Panon et les phénomènes naturels qui la concernent, ainsi que les règles méthodologiques adoptées ;

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

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

Art 1^{er} – 1-3^e alinéa

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

1. Introduction

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

Bras-Panon, commune peuplée de 13 559 habitants (population totale recensée par l'INSEE en 2021), est affectée par des phénomènes d'érosion côtière (recul du trait de côte) et de submersion marine, comme en témoignent les cartes de phénomènes historiques (annexes 1 et 3 du dossier PPRL), impactant plus ou moins durement les hommes et les activités.

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

1.1. ORGANISATION DE LA GESTION DES RISQUES

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

- **L'information sur les risques** est un droit pour les populations menacées. Cette information est organisée par le préfet et les maires dans les conditions fixées initialement par le décret du 11 octobre 1990 modifié et par la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 et désormais codifiées aux articles L. 125-2, L. 125-5 et R. 125-23 et suivants du code de l'Environnement. Ces dispositions prévoient notamment que dans les communes où un plan de prévention des risques naturels a été approuvé, le maire informe la population au moins une fois tous les deux ans par des réunions publiques communales ou tout autre moyen approprié. Cette information est délivrée avec l'assistance des services de l'Etat compétents ;
- **La gestion prévisionnelle des crises** s'appuie sur des systèmes d'alerte et s'organise dans les plans de secours spécialisés mis en œuvre par l'Etat et les collectivités ;
- **Les travaux de protection**, à l'initiative des communes ou d'associations, bénéficient de subventions dans le cadre de programmations pluriannuelles (Programme Pluriannuel d'Endiguement des Ravines, Plan de Gestion du Risque d'Inondation par exemple) ;
- **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 Tableau 1). Les inondations consécutives à la tempête Xynthia de février 2010 en métropole l'ont également mis en exergue.

La commune de Bras-Panon est concernée par cette politique de prévention, il y a donc nécessité pour la sécurité de la population de mettre en place des mesures de prévention efficaces.

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

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

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

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

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

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

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

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

La mise en place, l'évaluation régulière et les éventuelles révisions du plan communal de sauvegarde peuvent être assurées par un adjoint au maire ou un conseiller municipal chargé

des questions de sécurité civile désigné par le maire ou, à défaut, par le correspondant incendie et secours.

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

1.3. PLAN DE PREVENTION DES RISQUES (P.P.R.) NATURELS

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

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

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

1.4. CATASTROPHES NATURELLES MAJEURES A LA REUNION

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

Tempête Clotilda : 9 morts ; dégâts très importants (109 millions de francs sur St Denis)	
Janvier 1989 Cyclone Firinga : 4 morts ; dégâts très importants	Avril 2018 Tempête Fakir : 2 morts, dégâts importants dans l'Est
Janvier 1993 Cyclone Colina : 2 morts ; dégâts importants	Février 2022 Cyclone Batsirai : dégâts importants notamment concernant les cultures agricoles

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 :

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

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

III. - La réalisation des mesures prévues aux 3° et 4° du II 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° du II, 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° du II 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 P.P.R. :

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

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

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

Le PPR 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).

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° 2016-02287 SG/DRCTCV en date du 18 novembre 2016, prorogé par arrêté préfectoral n°3445 /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 Bras-Panon, et que les risques relatifs aux phénomènes de recul du trait de côte et de submersion marine sont pris en compte.

2.2.2. Etat des réflexions menées

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

- 11 décembre 2014 : réunion en mairie de Bras-Panon de présentation et de transmission des projets de cartes d'aléas érosion du trait de côte et submersion marine pour observation ;
- 8 juin 2015 : Porter à Connaissance des cartographies des aléas « érosion du trait de côte et submersion marine » par Monsieur le préfet à M. le maire de Bras-Panon ;
- 18 novembre 2016 : prescription de l'élaboration d'un PPR « recul du trait de côte » et submersion marine » (arrêté n° 2016 – 02287 SG/DRCTCV) ;

- 4 novembre 2019 : prorogation du délai d'approbation d'un PPR « recul du trait de côte » et submersion marine » (arrêté n° 3445 SG/DCL/BU) ;
- 22 juin 2023 : réunion en mairie de Bras-Panon de présentation de la phase technique du zonage des aléas et du zonage réglementaire ;
- du 19 juillet 2023 au 21 août 2023 : organisation d'une phase de concertation avec le public sur le projet de cartographie des aléas littoraux, du zonage réglementaire et du règlement associé.

2.2.3. Démarches à mener

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3. ASSURANCES ET INFRACTIONS AU PPR

2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur

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

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

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

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

Champ d'application de la garantie

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

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

Risques couverts

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

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

- 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 nouvelles pour l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles

Par arrêtés du 05 septembre 2000 du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (publiés au journal officiel du 05 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 nouvelles dispositions adoptées ont pour objet d'une part l'augmentation des franchises, et d'autre part leur modulation en fonction de la répétitivité des risques naturels survenus et des mesures de prévention prises tendant à les réduire.

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

- **Premier et second arrêtés** : application de la franchise
- **Troisième arrêté** : doublement de la franchise applicable
- **Quatrième arrêté** : triplement de la franchise applicable
- **Cinquième arrêté et arrêtés suivants** : quadruplement de la franchise applicable

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

2.3.2. Infractions au PPR et sanctions

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

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

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

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

- 1°) *Les infractions sont constatées, en outre, par les fonctionnaires et agents commissionnés à cet effet par l'autorité administrative compétente et assermentés ;*
- 2°) *Pour l'application de l'article L.480.5 du code de l'urbanisme, le tribunal statue au vu des observations écrites ou après audition du maire ou du fonctionnaire compétent, même en*

l'absence d'avis de ces derniers, soit sur la mise en conformité des lieux ou des ouvrages avec les dispositions du plan, soit sur leur rétablissement dans l'état antérieur ;

3°) *Le droit de visite prévu à l'article L.461.1 du code de l'urbanisme est ouvert aux représentants de l'autorité administrative compétente. »*

2.4. EXPROPRIATION ET MESURE DE SAUVEGARDE

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

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

2.5. RESPONSABILITES

2.5.1. Etablissement du PPR

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

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

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

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

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

II. — Le plan de prévention des risques naturels prévisibles peut également être modifié. La procédure de modification est utilisée à condition que la modification envisagée ne porte pas atteinte à l'économie générale du plan ou à condition que la modification envisagée consiste à abroger les dispositions relatives au recul du trait de côte de ce plan dans une ou plusieurs communes à la suite de l'entrée en vigueur d'un document d'urbanisme intégrant les dispositions relatives au recul du trait de côte en application du paragraphe 3 de la sous-section 3 de la section 1 du chapitre 1er du titre II du livre 1er du code de l'urbanisme. Le dernier alinéa de l'article L. 562-3 n'est pas applicable à la modification. Au lieu et place de l'enquête publique, le projet de modification et l'exposé de ses motifs sont portés à la connaissance du public en vue de permettre à ce dernier de formuler des observations pendant le délai d'un mois précédant l'approbation par le préfet de la modification. »

2.5.2. Autorisation d'occuper le sol

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

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

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

3. Présentation de la commune

3.1. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1. Situation géographique

Le territoire de la commune de Bras-Panon, d'une superficie de 88,6 km², est situé au Nord-Est de La Réunion (Figure 1). Son territoire est relativement restreint et représente moins de 2,3% de la surface de l'île. Il s'étale entre le littoral et les contreforts du plateau de Bélouve et est délimité par la Rivière du Mât au Nord et à l'Ouest, et la Rivière des Roches au Sud. Son point culminant se situe au niveau du Mazerin (2092 m).

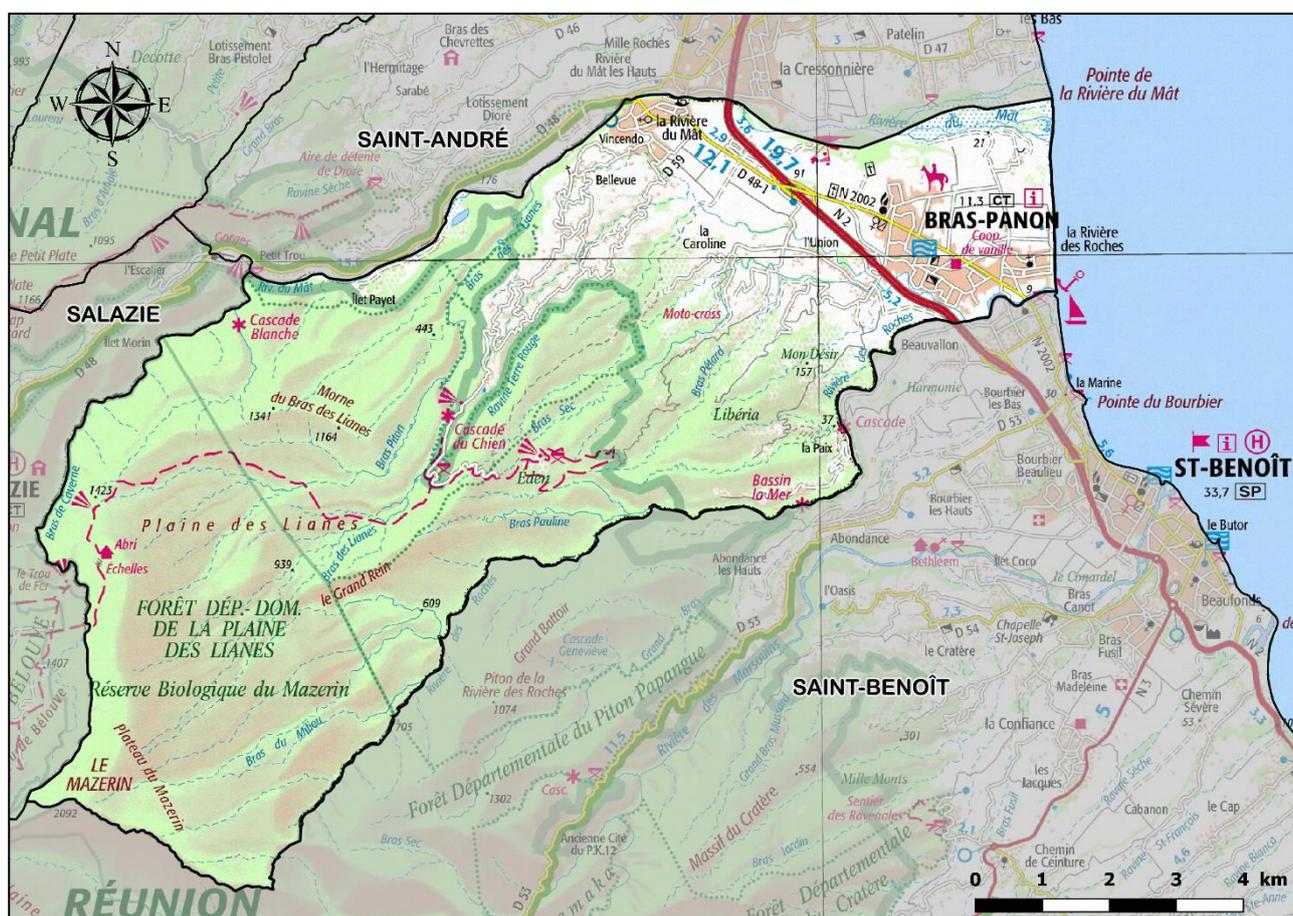


Figure 1 – Délimitation du territoire communal de Bras-Panon (Fond ©IGN scan100® -2010)

Bras-Panon compte 13416 habitants en 2020 avec une densité de 151,5 habitants par km² (INSEE, RP2020). Une augmentation moyenne de sa population d'environ 0,7 % par an entre 2014 et 2020 est observée.

Le territoire communal est caractérisé par une urbanisation relativement faible. En effet, environ 60% de la surface est couverte de forêt et est incluse dans le cœur du Parc National de La Réunion.

Les communes limitrophes sont la commune de Salazie à l'Ouest, la commune de Saint-André au Nord et la commune de Saint-Benoit au Sud.

Bras-Panon fait partie de la Communauté Intercommunale Réunion Est (CIREST).

3.1.2. Contexte géomorphologique

La commune de Bras-Panon est située sur les flancs du volcan du Piton des Neiges. Le territoire communal s'organise en plusieurs entités géomorphologiques :

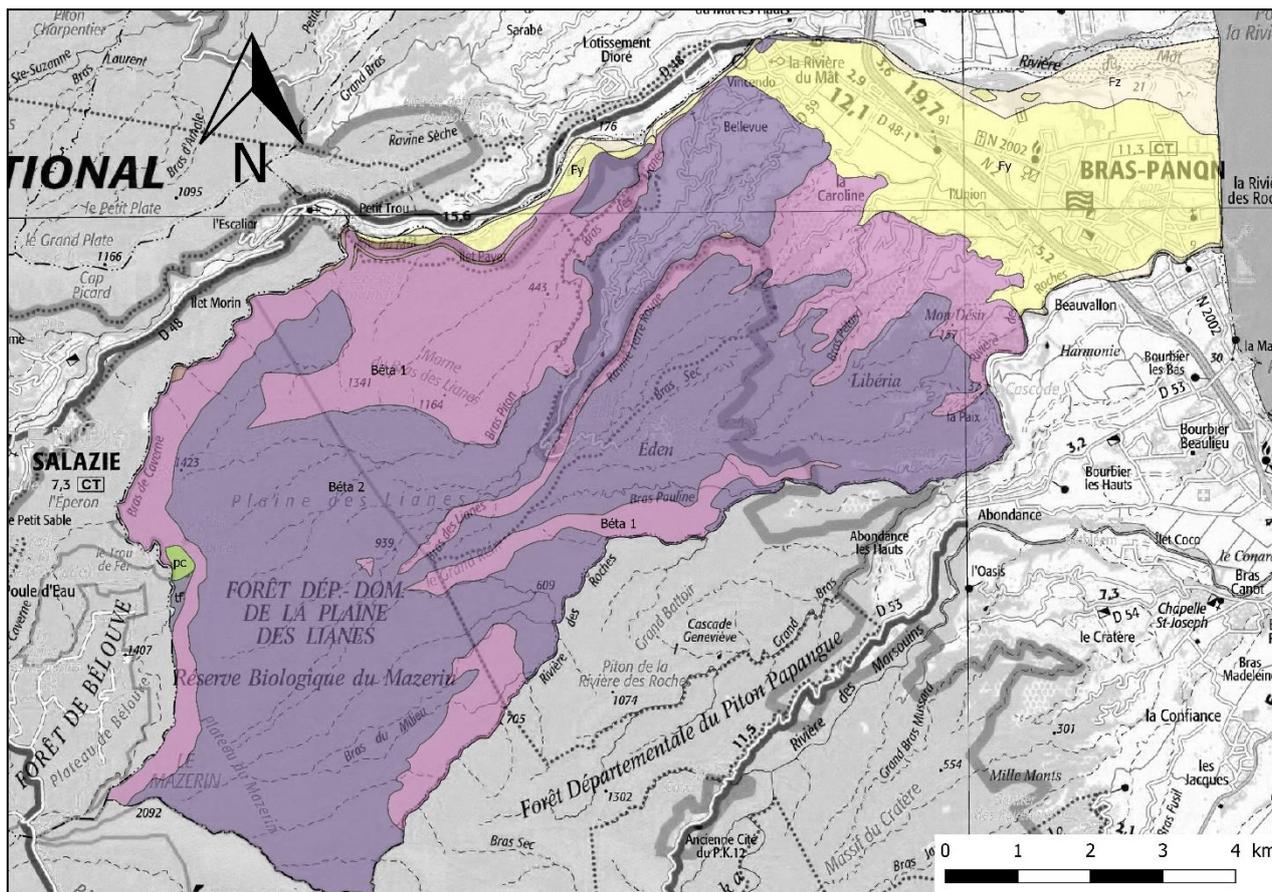
- La **planèze** résulte des différentes phases d'épanchement volcanique du Piton des Neiges. Elle est limitée au sud par la Rivière des Roches et au nord par la Rivière du Mât, et incisée de façon régulière par plusieurs ravines. Le Bras des Lianes est la plus remarquable avec un encaissement dépassant les 250 m. Les pentes sont relativement importantes dans les Hauts (20 à 60°) et souvent recouvertes de forêts. 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 des deux rivières citées précédemment. 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'une vallée encaissée en sortie du cirque de Salazie (pentes fortes, en moyenne, 50 à 75°), puis sous la forme d'un cône alluvial constitué d'alluvions récentes fréquemment remaniées lors des phénomènes de crues. Cette rivière constitue le seul exutoire pour tout le cirque de Salazie. Elle se caractérise donc par des débits importants et un transport solide majeur.

Ces terrains sont incisés par des ravines délimitant des plateaux plus ou moins vastes. Les principales ravines présentes dans le territoire communal sont, du nord au sud :

- La Rivière du Mât ;
- La Ravine Blanche ;
- Le Bras des Lianes ;
- Le Bras Piton ;
- La Rivière Bras-Panon ;
- Le Bras Sec ;
- Le Bras Pétard ;
- Le Bras Pauline ;
- La Rivière des Roches.

3.1.3. Contexte géologique

La commune de Bras-Panon s'inscrit dans le contexte géologique du massif du Piton des Neiges (Figure 2). 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), séparées 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 des phases de reprise de l'activité volcanique, des coulées de lave se sont épanchées sur les flancs du massif volcanique en empruntant d'abord les vallées.



Légende :

Massif du Piton des Neiges
Série différenciée (<340 000 ans)

- Couléés basaltiques à olivine (Béta1)
- Couléés (basalte, hawaïtes, mugéarites)(Béta2)
- Couléés trachytique du plateau de Bélouve (Tau)
- Couléés ignimbrtiques (pc)
- Tufs en épandages (tf)

Formations Superficielles
Dépôts alluviaux

- Dépôts de glissements en masse, de coulées de débris, éboulis (E)
- Alluvions anciennes (Fy)
- Alluvions récentes (Fz)

Figure 2 - Carte géologique de la commune de Bras-Panon (BGRM/LGSR, 2006)

Les formations volcaniques

Les séries basaltiques: Coulées de basalte à olivine (phase II) et coulées de basalte différencié (phase III)

Les roches prédominantes au niveau de la commune sont les coulées basaltiques à olivine (« Béta 1 » sur la Figure 2). Elles constituent la série des océanites du Piton des Neiges (Phase II, 950-450 ka). Ce faciès est formé par un empilement de bancs d'épaisseur décimétrique à métrique de laves massives et de scories. La base de cette formation est zéolitisée. Du point de vue pétrographique, les laves sont riches en cristaux d'olivines et peuvent contenir de fines baguettes de feldspaths. En surface, les coulées (en particulier les passées scoriacés) peuvent présenter des faciès altérés, argileux sur plusieurs décimètres à plusieurs mètres d'épaisseur. Les formations sous-jacentes sont plus ou moins altérées et rubéfiées sur des épaisseurs pouvant atteindre potentiellement plusieurs décamètres. Les coulées à olivine sont présentes notamment au niveau d'Ilet Payet et dans le secteur du Morne de la Plaine des Lianes. Elles sont recoupées par un très grand nombre de dykes et de sills, de puissances décamétriques, résultant de phases éruptives ultérieures.

Les coulées de lave de Phase III (350-180 ka) recouvrent les coulées de basalte à olivine et nappent généralement les planèzes du massif du Piton des Neiges (« *Béta 2* » sur la Figure 2). Il s'agit de leuco-basaltes et des andésites alcalines (hawaïtes, mugéarites) aphyriques ou à phénocristaux de feldspaths. Ce faciès est également connu à La Réunion sous le nom de « *roche pintade* ». Elles se présentent généralement sous forme d'empilement de bancs compacts de laves d'épaisseur métrique à décamétrique et de bancs de scories d'épaisseur métrique.

Les formations tardives : Tufs en épandage

A la frontière avec le plateau de Bélouve affleurent des coulées pyroclastiques altérées d'une épaisseur pouvant atteindre quelques mètres à décamètres. Ces tufs pyroclastiques sont issus d'éruptions explosives de la phase IV du Piton des Neiges (entre 180 et 70 ka). Ces formations sont constituées d'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, rarement décimétrique, et cimentés par des produits cendreaux.

Les formations superficielles

Dépôts de glissement en masse, de coulées de débris, des éboulis

On rencontre ces formations (anciennes ou récentes) essentiellement en bordure de la Rivière du Mât, sur les versants encaissés du lit. Elles sont généralement constituées 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° puis progressivement de pente plus faible en s'écartant du pied de rempart. 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.

Formations alluvionnaires

Les formations alluvionnaires présentent une grande variabilité de faciès. En effet, la proximité des matériaux source, l'abondance et l'intensité de pluies et la présence de dénivelés plus ou moins importants est à l'origine de la formation de complexes alluvionnaires diversifiés allant du conglomérat jusqu'à une argile fine de décantation. La nature, la taille et la géométrie des éléments qui constituent les alluvions sont très variées.

Les alluvions récentes nappent le fond des vallées et sont souvent incisées par le cours d'eau. Les alluvions anciennes regroupent l'ensemble des formations alluviales qui ne sont plus connectées au réseau hydrographique actuel. Elles sont constituées de conglomérats, de sables grossiers, de sables, de limons et d'argiles.

3.1.4. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique sur la Commune de Bras-Panon est très développé et ce, particulièrement dans les hauts de la commune au niveau de la Plaine des Lianes (Figure 3).

Le territoire communal présente également la particularité d'être encadré au nord par la Rivière du Mât et au sud par la Rivière des Roches qui constituent deux des plus importantes rivières pérennes de La Réunion (en superficie de bassin versant et en débit de crue).

A ces cours d'eau viennent s'ajouter le Bras des Lianes, affluent de la Rivière du Mât, le Bras Pétard et la Rivière Bras-Panon, affluents de la Rivière des Roches.

Les autres ravines du territoire sont des ravines temporaires qui n'entrent en fonctionnement qu'en cas de fortes pluies. Elles prennent leur source pour la plupart dans les hauts, et s'écoulent ensuite en direction de la mer en traversant le territoire communal, avec des pentes du profil en long

comprises entre 10 et 20% en moyenne, avec une partie amont plus abrupte qu'à l'aval où les profils en long sont moins marqués.

D'une manière générale, les bassins versants sont de forme très allongée sur toute la zone d'étude. Ceci génère des ruissellements pouvant être rapides et parfois conséquents en cas de fortes pluies.

Sur la commune, les rivières et ravines suivantes se distinguent particulièrement, par leur profil, leur longueur importante, la superficie de leur bassin versant ainsi que leur débit de crue à l'exutoire (données PPRi 2004 et rapport BRGM RP-56364-FR de 2008¹):

- **La Rivière du Mât** est l'exutoire principal du cirque de Salazie. Son **bassin versant a une superficie de 153 km²** à la limite du cirque. Sur le territoire communal de Bras-Panon, il s'étend sur environ **10 km²**. En sortant de Salazie la rivière suit ensuite un cours encaissé, à ce stade elle reçoit l'apport du Bras des Lianes, jusqu'à déboucher sur la plaine alluviale. En rive droite, côté Bras-Panon, aucun ouvrage ne contraint le flux hydraulique générant ainsi un large cône alluvial en bordure du littoral. Les valeurs de **crues décennales sont de 1200 m³/s et atteignent 3400 m³/s pour les crues centennales**. Ces valeurs de débits extrêmement élevées induisent des risques d'érosions de berges très importants sur la bordure nord du territoire communal. Les estimations de transport solide donnent également des valeurs très élevées, même pour La Réunion, avec des volumes transportés supérieur au m³.
- **La Rivière des Roches** matérialise la limite communale avec Saint-Benoit, elle prend sa source dans les hauteurs du secteur de Takamaka et présente un bassin versant d'une superficie de 61,7 km². Les débits de crue caractéristiques de cette ravine sont évalués à **930 m³/s pour la crue décennale et environ 2000 m³/s pour la crue centennale**. La rivière Bras-Panon est un affluent de ce cours d'eau. Sur territoire communal, plusieurs ouvrages de protection des berges ont été mis en place dans la partie proche de l'embouchure afin de contraindre le flux hydraulique.
- **La Rivière Bras-Panon** est l'unique cours d'eau pérenne traversant la commune du Nord au Sud. Elle s'écoule dans la plaine alluviale depuis la quartier Vincenzo jusqu'à la Rivière des Roches dans laquelle elle se jette. Les débits de crue sont estimés à **330 m³/s en décennal et 680 m³/s en centennal**.
- **Le Bras Pétard** est un affluent de la Rivière Bras-Panon. Il est historiquement connu pour avoir causé des inondations dans le quartier Libéria. Des ouvrages d'endiguement ont donc été réalisés dans le lit de la ravine au droit du quartier. **Son débit décennal est estimé à 185 m³/s, le centennal atteint 360 m³/s**.

¹ Etude hydrogéomorphologique de la Rivière du Mât et propositions de solutions de gestion, Volumes 1 à 5, rapport BRGM/RP-56364-FR, 2008.

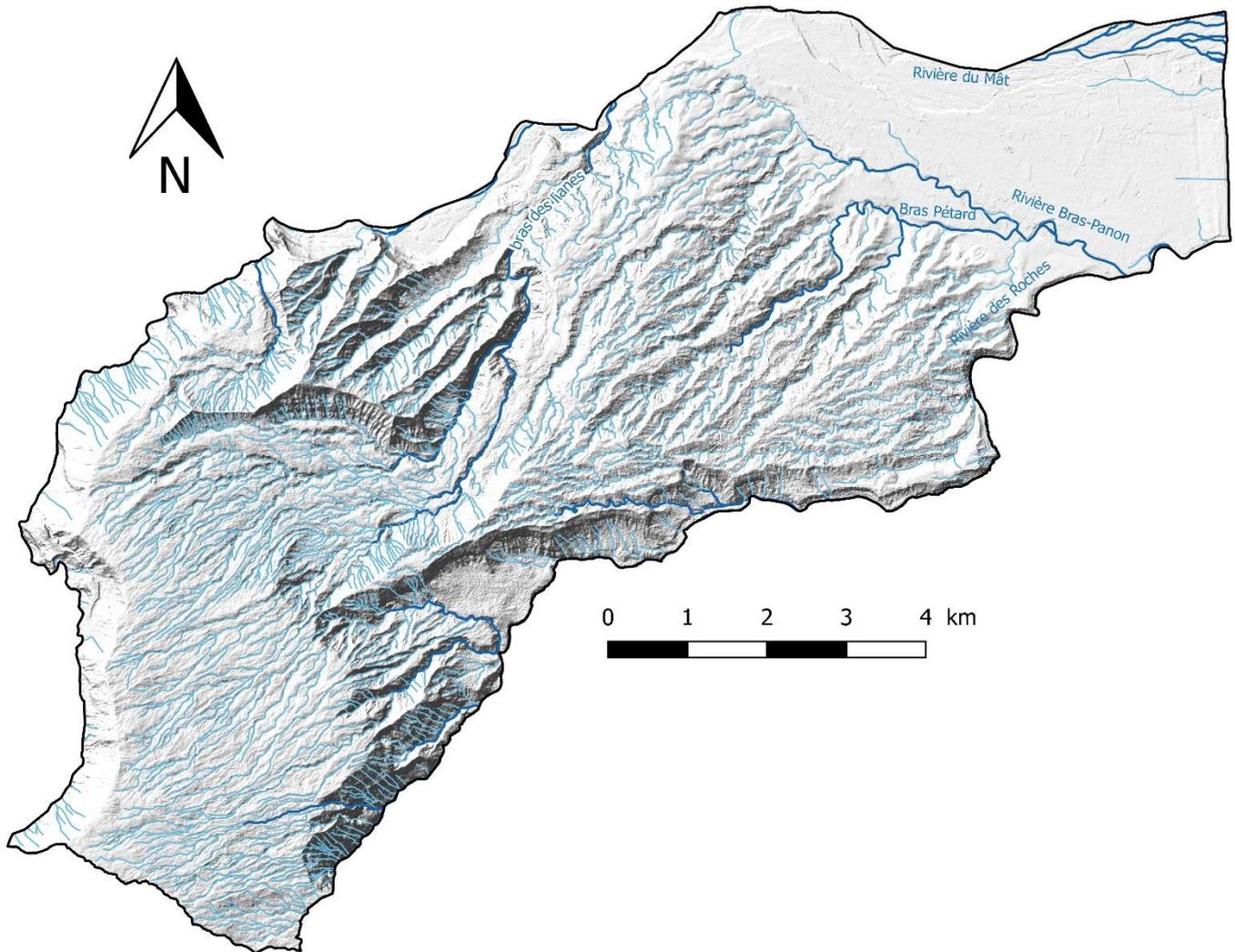


Figure 3 - Réseau hydrographique de Bras-Panon (source : BDtopo2016®, MNT IGN 2012)

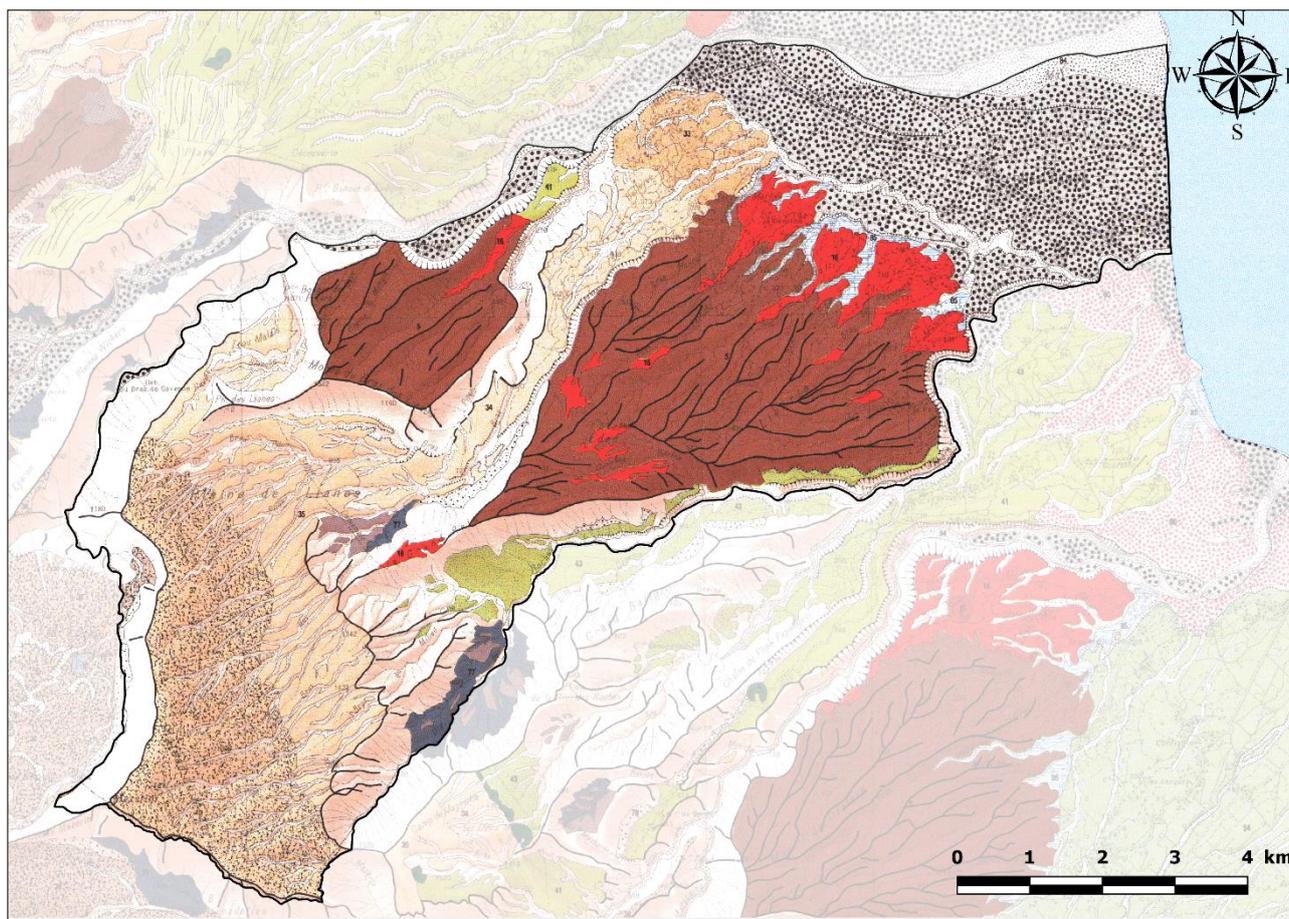
3.1.5. Contexte pédologique

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

D'après la Figure 4, cinq grands ensembles se distinguent sur le territoire communal de Bras-Panon :

- ✓ **Les sols hétérogènes (5)** marqués par un relief très accidentés recouverts par la forêt et qui représentent la majeure partie du secteur central de la commune. À leurs extrémités basses se trouvent **les sols ferrallitiques (16)** rouges montrant différents degrés de saturation. Ils correspondent à des zones agricoles dédiées à la culture de la canne, incisées par des thalwegs de faible ampleur ;
- ✓ **Les andosols** désaturés se développent sur des cendres et sont recouverts par la forêt en altitude (35 et 37) ou en majorités par des terrains agricoles en moyenne (33) ou haute altitude (34). Ces derniers sont entourés par les sols hétérogènes précédents. Ces andosols constituent l'essentiel de la partie haute de la commune. On trouve également des andosols sur des pentes relativement faibles recouvertes de forêt (43) ;

- ✓ **Les sols peu épais ou peu évolués** sont des sols récents peu altérés. Ils constituent l'essentiel de la partie basse de la commune, à savoir le cône alluvial ancien de la Rivière du Mât. On les retrouve aussi dans le lit de la Rivière du Mât. Il s'agit de sols vitriques sur sables basaltiques (82) ou de sols souvent hydromorphes (85). En base de rempart, on retrouve des sols peu épais reposant sur des colluvions (77) ou des andosols (75 et 79) ;
- ✓ **Les sables et les galets (84)** sont charriés par la Rivière du Mât ou sont d'origine marine ;
- ✓ **Les sols bruns andiques (41)** recouverts par la forêt que l'on retrouve en petite superficie dans la partie nord de la commune, en continu des sols ferrallitiques.



Matériaux volcaniques non effondrés du Piton des Neiges (hors zones de très hautes altitudes)

Nature et âge des émissions	Zone climatique	Modelé général	Sols	
Coulées phase II	Toutes expositions Moyenne et haute altitude	Reliefs très disséqués et accidentés. Pentcs très fortes.	Sols hétérogènes sur colluvions de pente déjà altérées à caractères ferrallitiques ou andiques	5
Coulées phase III	Au vent Basse altitude	Extrémités de planèzes à pentcs générales faibles	Sols ferrallitiques rouges fortement à moyennement désaturés	16
Tufs et cendres phase VI sur coulées phase III et IV et coulées anciennes de la Fournaise	Toutes expositions Moyenne altitude	Planèzes très bosselées et pentcs générales fortes	Andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres épaisses	33
	Toutes expositions Haute altitude	Planèzes bosselées et pentcs générales faibles	Andosols désaturés perhydratés chromiques sur cendres assez épaisses, associés à des affleurements de « gratons » (sommets de bosses)	34
		Planèzes très bosselées et pentcs générales fortes		35
	Au vent Haute altitude	Planèzes bosselées et pentcs générales fortes	Andosols désaturés perhydratés à « avoune » sur cendres	37
Coulées fin phase VI (post-cendrées)	Au vent Moyenne altitude	Pentcs modérées à très nombreuses bosses rocheuses	Sols bruns andiques caillouteux sur "gratons" ; rares poches de cendres à andosols	41
Coulées ignimbritiques Phase VI	Au vent Basse altitude et moyenne altitude	Pentcs faibles sans chichots rocheux	Andosols non perhydratés chromiques sur tuf ignimbritique	43
Matériaux détritiques des blocs effondrés et éboulis (essentiellement zone des "cirques")				
Situations morpho-climatiques				
Surfaces gauchies des blocs effondrés (« îlets »)	Saison sèche peu marquée	Haute altitude Pentcs fortes	Andosols désaturés perhydratés chromiques très caillouteux sur brèches détritiques	75
Blocs effondrés escarpés sans replats			Sols peu épais blocailleux sur colluvions de transit	77
Talus d'éboulis			Andosols perhydratés chromiques sur matériau argilo-blocailleux	79
Formations superficielles mises en place par les eaux				
Matériaux et situations morpho-climatiques				
Alluvions "à galets"	Cônes de déjection et terrasses récents	Au vent	Sols peu différenciés vitriques sur sables basaltiques et gros galets non altérés	82
	Epanchages actuels		Sables et galets submersibles	84
Alluvions fines	Plaines d'ennoyage entre cônes de déjection et bourrelets littoraux	Au vent	Sols peu évolués andiques souvent hydromorphes (nappe proche) limoneux	85

Figure 4 - Carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000 (source : ©CIRAD (Raunet, 1991), fond ©IGN scan100® - 2010)

3.1.6. Contexte géomorphologique littoral

Faciès littoraux et dynamique de Bras-Panon

Le secteur littoral de Bras-Panon s'étend sur plus de 3km entre deux embouchures. Il est constitué de formations alluvionnaires fluviomarines. Dans le cadre de cette étude, ce front littoral est découpé du nord au sud en trois secteurs présentés ci-après.

- **Cône alluvial : pointe de la rivière du Mât**

Le premier secteur se situe au nord au niveau de l'embouchure de la rivière du Mât (Figure 5). Il est constitué d'un cordon de galets de cône delta de 600 m de long, composés d'alluvions fluviatiles récents. La dynamique morphologique de ce secteur dépend des apports sédimentaires fluviatiles et des périodes cycloniques auxquels il est soumis.



Figure 5 - Littoral de Bras-Panon – cône alluvial (Fond Ortho 2017 IGN)

- **Cordon de galets**

Le second secteur constitue la partie centrale du linéaire de galets de Bras-Panon (Figure 6). Il s'étend sur plus d'un kilomètre.



Figure 6 - Littoral de Bras-Panon – Cordon de galets (Fond Ortho 2017 – IGN)

- **Cordon de galets - embouchure de la Rivière des Roches**

Le troisième et dernier secteur se situe au sud de Bras Panon, au niveau de l'embouchure de la Rivière des Roches. C'est le plus long secteur (1240m). Les premières habitations se situent à plus de 100m du linéaire côtier. Il bénéficie de l'apport sédimentaire de la rivière. (Figure 7).



Figure 7 - Littoral de Bras-Panon – Cordon de galets et embouchure de rivière

3.1.7. 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. Situé à l'Est de l'île, Bras-Panon est soumis à l'alizée et se retrouve « au vent ». Ce territoire est donc directement exposé au flux d'Est qui affecte l'île mais également aux brises diurnes (vent soufflant de la mer vers la terre) de secteur Est. Ces vents sont liés au rééquilibrage des contrastes thermiques existants entre terre et mer.

Pluviométrie

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

Une des conséquences de cette situation est une pluviométrie exceptionnellement intense à La Réunion : l'île détient les records mondiaux de pluviométrie cumulée pour des durées allant de 12 h (1 144 mm) à 15 jours (6 000 mm).

La commune de Bras-Panon est située dans la moitié Est de l'île qui est la plus arrosée du département. Le territoire d'étude présente ainsi un niveau de précipitations annuelles important en comparaison du reste de l'île (cumuls moyens annuels supérieurs à 5000 mm). On observe une

augmentation des précipitations en fonction de l'altitude. Le centre-ville présente un cumul moyen annuel plus faible (< 3500 mm) que le secteur de la Plaine des Lianes (>5000 mm) situé dans les hauteurs du territoire (Atlas climatique de la Réunion, Météo France, cf. Figure 8).

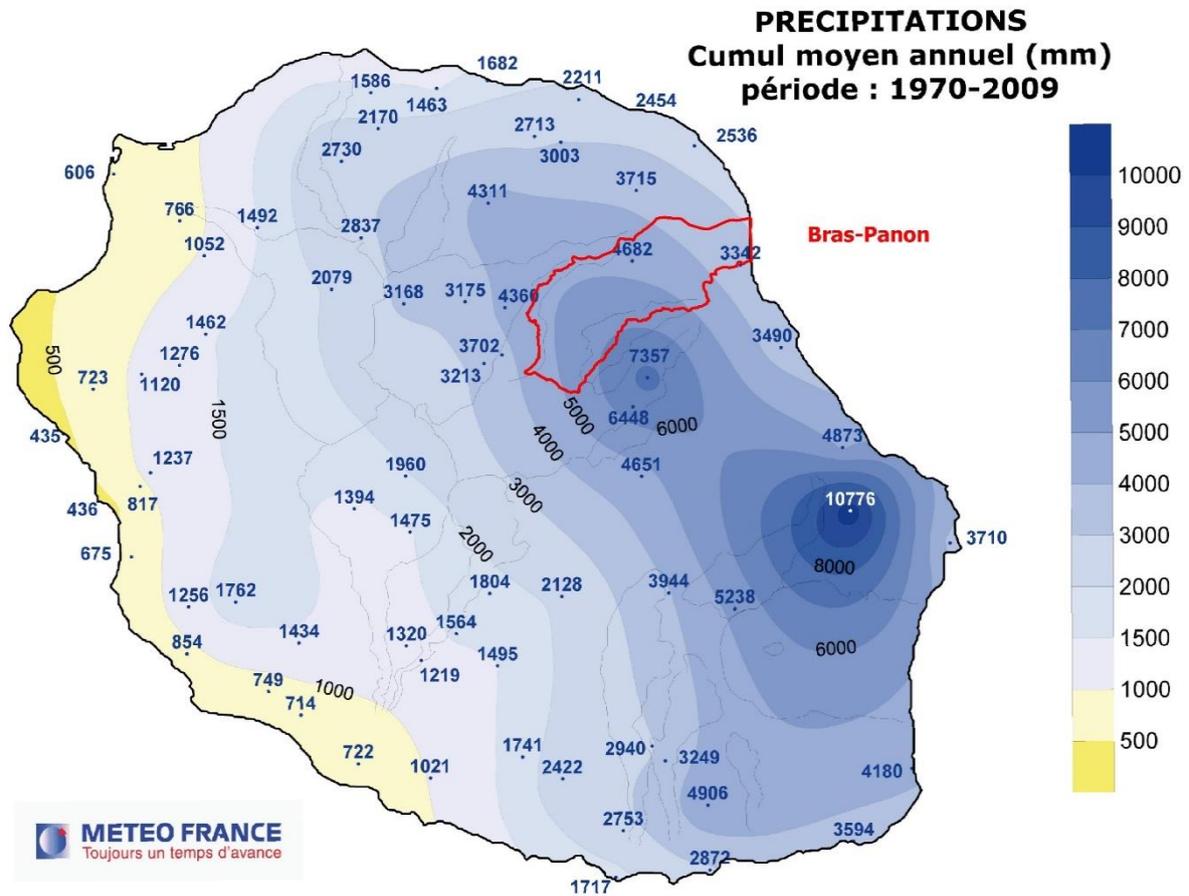


Figure 8 - Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)

La carte des zonages pluviométriques a été réalisée selon le coefficient de Montana défini par MétéoFrance. L'île de La Réunion est ainsi découpée selon des zones de régimes pluviométriques similaires et en tenant compte du relief de l'île. Les zones définies reflètent l'intensité maximum de la pluie à une fréquence horaire, ici pour une période décennale. La zone 1 est la zone présentant l'intensité pluviométrique la moins élevée et la zone 5 correspond à la zone d'intensité pluviométrique la plus élevée. La commune de Bras-Panon est découpée en 4 zones pluviométriques, allant de la zone 2 en bordure littorale jusqu'à la zone 5 dans les hauts de la commune (Figure 9).

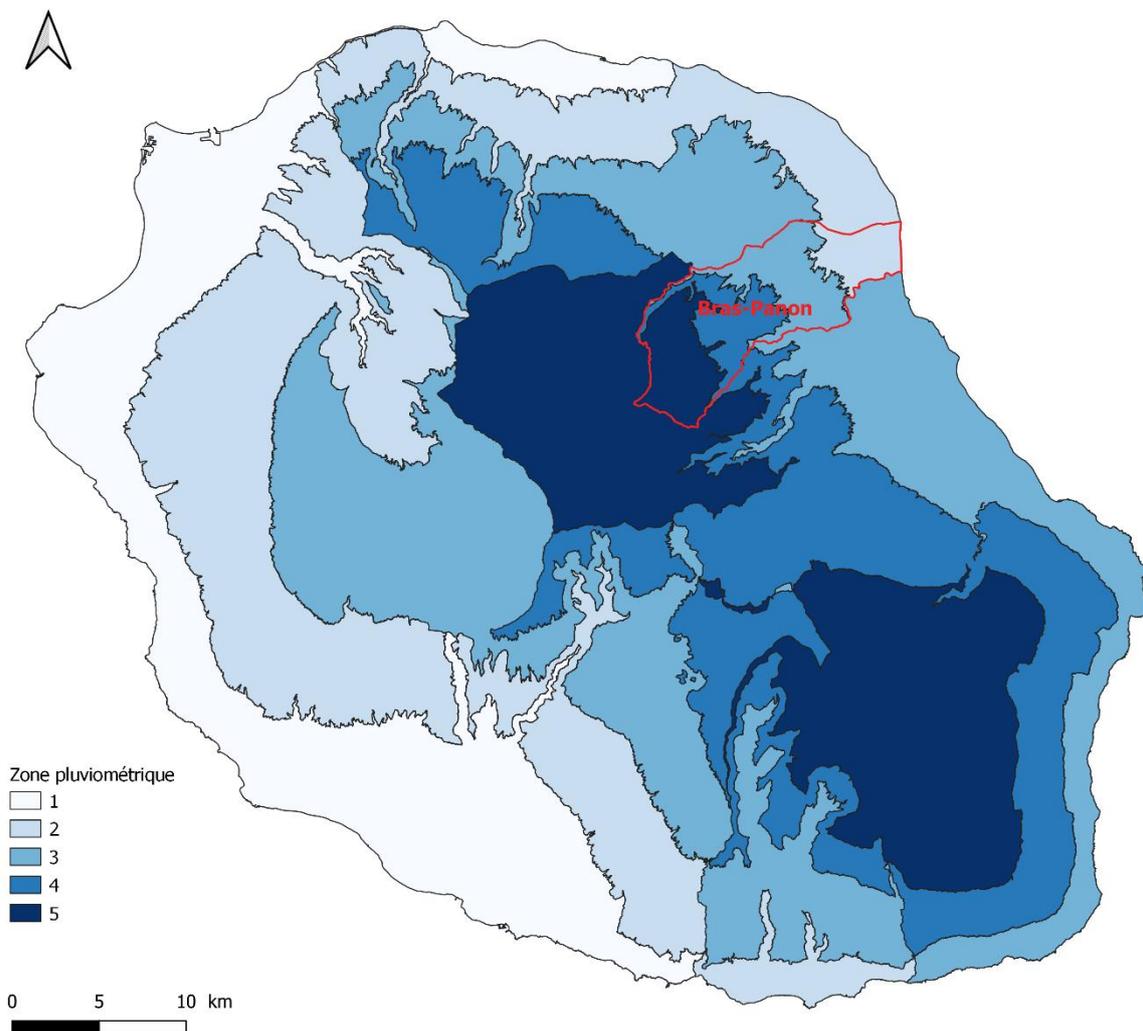


Figure 9 - Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)

Une seule station météorologique est aujourd'hui installée sur le territoire communal. Il s'agit de la station Bellevue Bras-Panon (secteur de Bellevue, altitude : 480 m, installée en 1990)

Toutefois, pour élargir le champ d'informations, et vu le zonage pluviométrique au droit de la commune de Bras-Panon, les données pluviométriques des stations situées à proximité immédiate de la limite communale sont également considérées (Figure 10). On peut ainsi citer les stations météorologiques suivantes :

- Beauvallon (commune de Saint-Benoît, secteur de Beauvallon, altitude : 16 m, installée en 1952) ;
- Takamaka-12 (commune de Saint-Benoît, altitude : 660 m, installée en 1971)

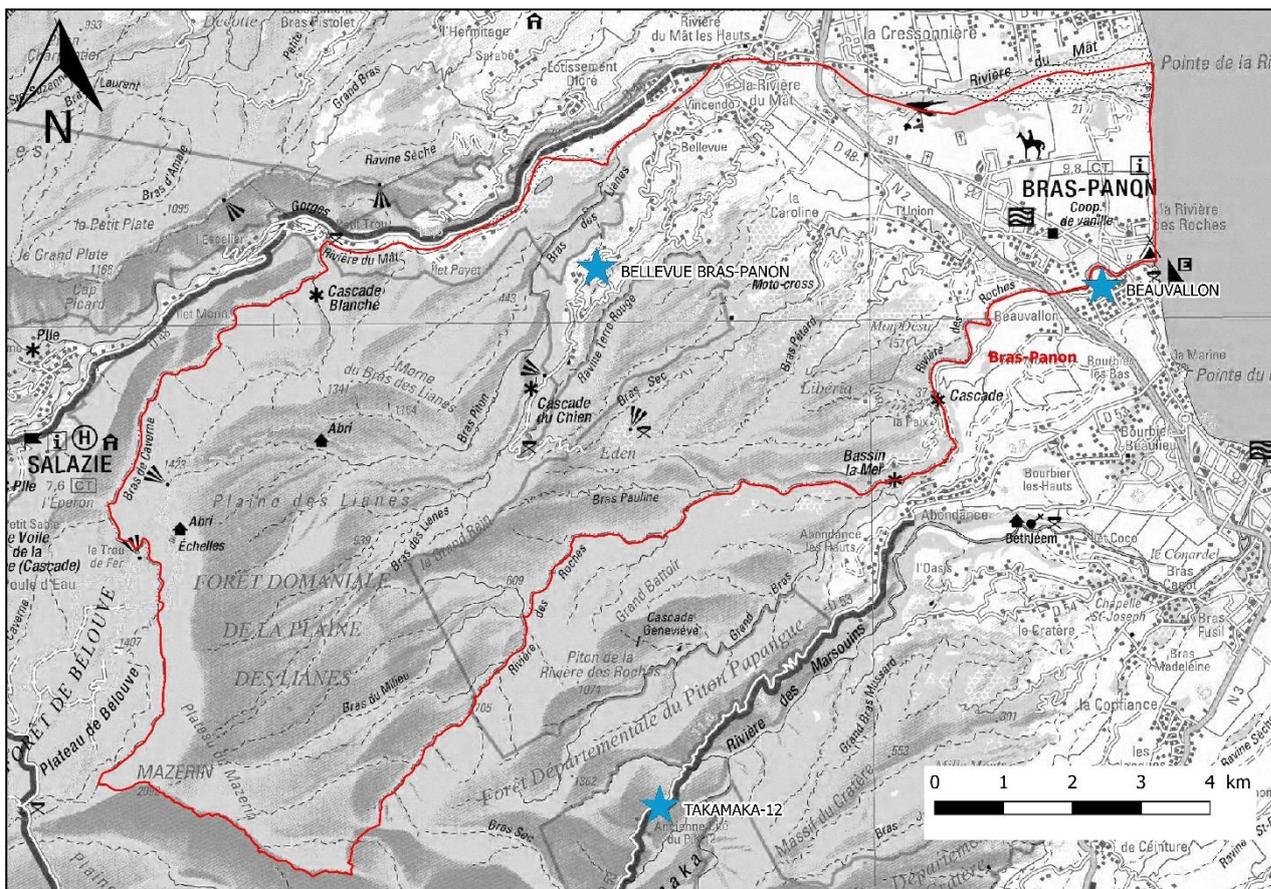


Figure 10 - Localisation des stations météo à proximité de Bras-Panon (©IGN Scan100® - 2010)

Le modèle de pluie régionalisé SHYREG (IRSTEA, 2012), propose, à partir d’une analyse statistique, des valeurs de pluies journalières décennales et centennales pour les trois stations citées précédemment. Les valeurs caractéristiques pour les stations représentatives de Bras-Panon sont les suivantes (Tableau 2) :

Nom station	Altitude	Pluie Journalière Décennale (en mm)	Pluie Journalière Centennale (en mm)
Bellevue Bras-Panon	480 m	653	1096
Beauvallon	16 m	470	799
Takamaka-12	660 m	908	1449

Tableau 2 - Précipitations journalières décennales et centennales (en mm)

Les cyclones tropicaux

Situé au nord-est de l’île, le littoral de Bras-Panon est influencé par les houles cycloniques. En effet, 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 11 et Figure 12) soit par l’Est de La Réunion.

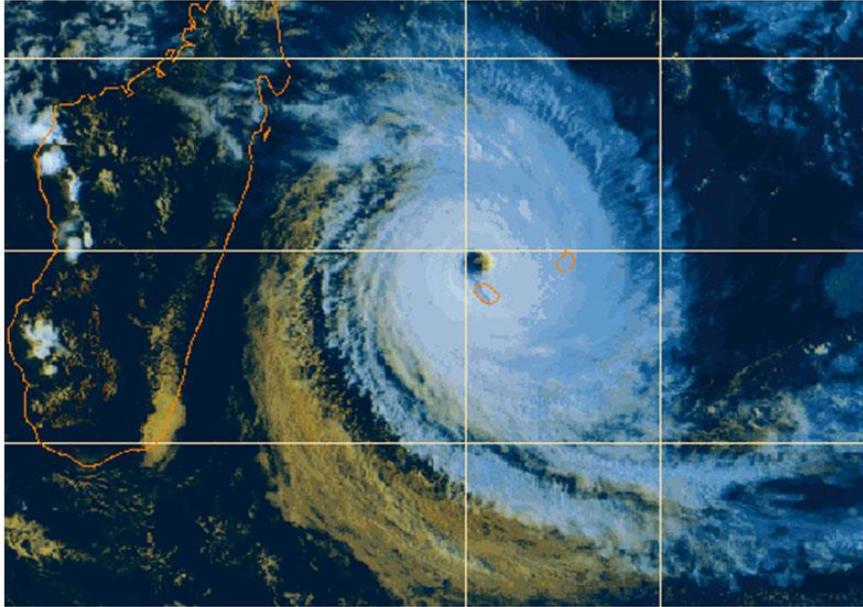


Figure 11 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France) L'œil passe à peine à 30 km des côtes, le scénario est donc majorant puisque la côte Nord de l'île passe dans le rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) excèdera largement les 200 km/h et les vagues dépasseront les 15 m par endroit.

Lors de la saison cyclonique, l'île vit au rythme des cyclones et des alertes qui lui sont associées. Bien qu'une solide politique de prévention soit en place sur l'île, le caractère imprévisible de la trajectoire des cyclones peut rendre difficile la gestion des risques. 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 d'ouest et une houle destructrice en continu sur les façades Nord et Ouest.

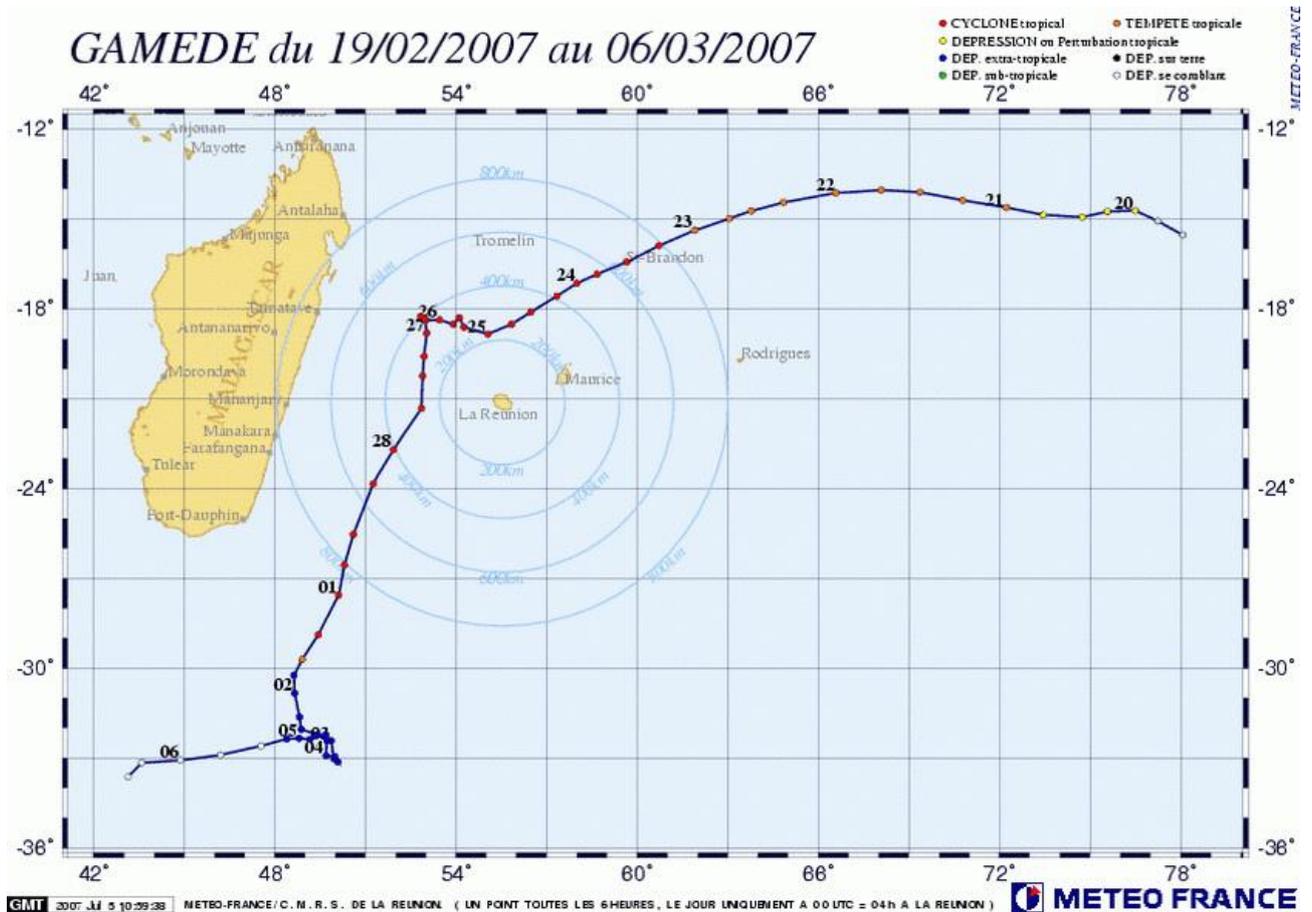


Figure 12 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)

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

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

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

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

Les houles

La commune de Bras-Panon n'est soumise qu'à l'influence cyclonique estivale ainsi qu'aux houles d'Alizés et n'est en revanche pas concernée par les risques hivernaux et la survenue des grandes houles australes de Sud-Ouest (cf. Figure 13).

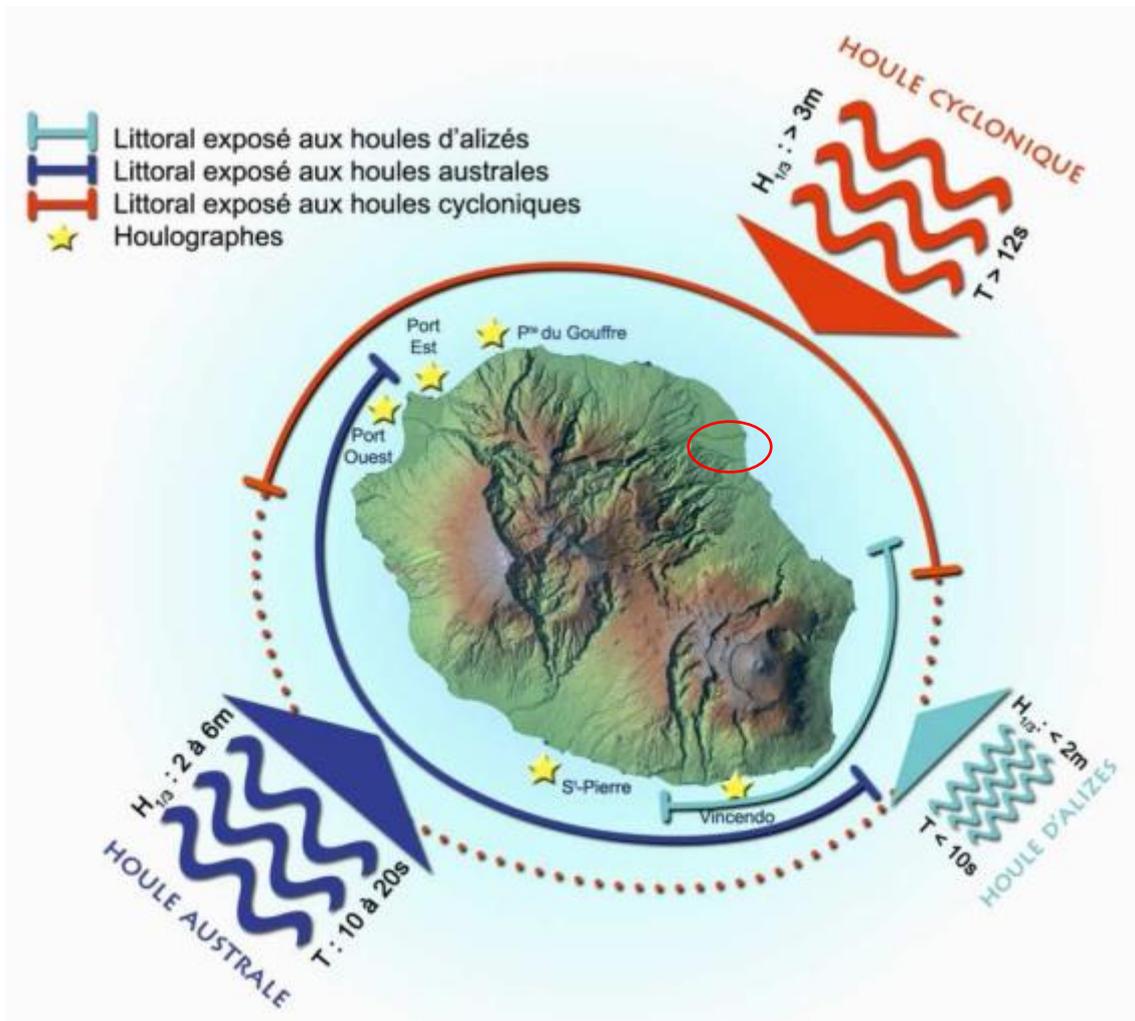


Figure 13 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009)

3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE

La population de Bras-Panon était de 4 824 habitants en 1961. La population est passée à 13 416 habitants en 2020 (Figure 14), ce qui représente une augmentation de plus du double sa population en l'espace de 56 ans soit une progression de l'ordre de 3 % par an. Cette croissance a ralenti ces dernières années avec une augmentation de 0,7% par an sur la période 2014-2020 (Insee, 2020).

À l'échelle de La Réunion, Bras-Panon est une commune faiblement peuplée. En effet, sa population ne compte que pour 1,5% de la population totale de l'île et sa densité de 151,5 hab/km² (Tableau 3) est moitié moins élevée que la moyenne régionale (340 hab/km²).

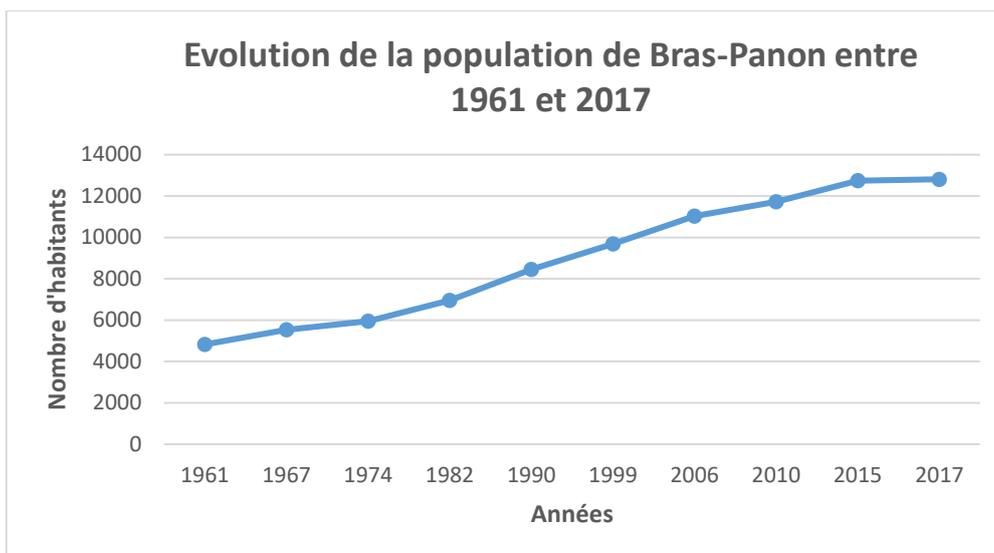


Figure 14 - Graphique d'évolution de la population de la commune de Bras-Panon

	1961	1967	1974	1982	1990	1999	2006	2010	2015	2017
Population	4 824	5 533	5 941	6 945	8 455	9 683	11 028	11 725	12 735	12 811
Densité moyenne (hab/km ²)	54,4	62,4	67,1	78,4	95,4	109,3	124,5	132,3	143,8	144,6

Tableau 3 - Evolution de la population de Bras-Panon (source : @I.N.S.E.E)

Cette démographie se traduit par une urbanisation peu développée. En effet, environ 60% de la surface du territoire communal est incluse dans le cœur du Parc National de La Réunion.

La commune regroupe les espaces agglomérés de Bengalis, de Bellevue, de Vincendo, de la Caroline, de Libéria et du centre-ville. Quelques écarts habités sont également présents sur le territoire tels que l'Îlet Payet ou La Paix.

Outre le bâti, les principaux enjeux qui ont été répertoriés et cartographiés au regard des aléas submersion marine et érosion du trait de côte sont les suivants :

- Les services de sécurité et de secours (gendarmerie, caserne de pompiers, hôpitaux et centres de soins, etc.) ;
- Les voies de circulation : le réseau routier principal correspond à la Route Nationale 2, l'ancienne RN2 (RN2002) qui traverse le centre-ville et le relie au quartier de Beauvallon à Saint-Benoit, et la Route Départementale 48-1 qui relie les quartiers de Paniandy et Rivière du Mât.
- Le réseau d'Adduction d'Eau Potable (sources, captages, stations de pompage, réservoirs, stations de traitement, usine d'embouteillage) ;
- Les établissements d'enseignement (écoles, collèges, centres de formation) ;
- Les bâtiments administratifs (mairies principales et annexes) ;
- Les zones agricoles (secteur de Bellevue principalement) et naturelles (Plaine des Lianes).

Un extrait de la cartographie de ces enjeux est présenté ci-dessous.

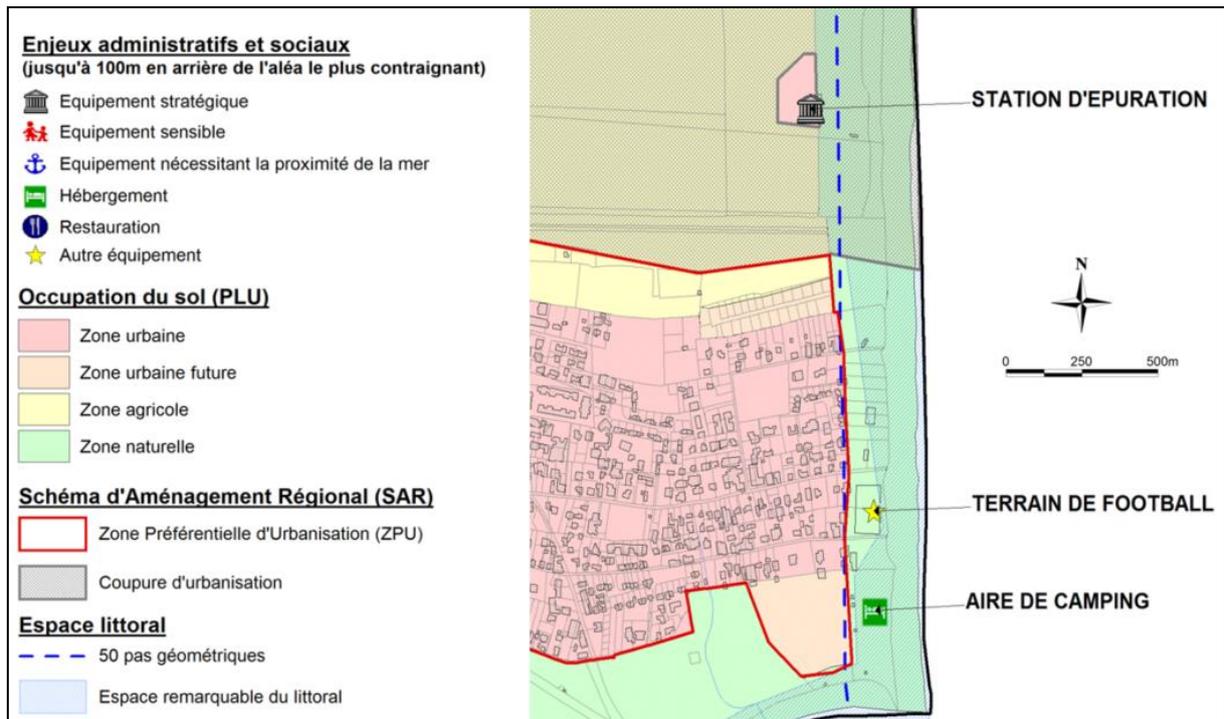


Figure 15 - Extrait de la cartographie des enjeux du littoral de la commune de Bras-Panon (cf. Annexe 5)

4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels

4.1. PHENOMENES HISTORIQUES

L'ensemble des évènements recensés ayant affecté par le passé le territoire communal de Bras-Panon 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 « Bras-Panon dans la tourmente », d'articles de journaux et d'enquêtes de terrain. Quelques éléments sur les événements les plus marquants sont donnés ci-après :

1987

« Près de 10 km de routes emportées, des circuits électriques dégradés, l'accotement du pont de la Rivière des Roches arraché et la population privée d'eau ».

Témoignages, 16 février 1987

« Il faut des déchaînements du style de Clotilda pour vérifier douloureusement que Bras-Panon est une commune en pente. Non seulement, bien sûr, de la montagne à l'océan, mais surtout, plus traîtreusement, de la Rivière-du-Mât à la Rivière-des-Roches »

20 mars 2018 – à propos du cyclone Jenny 1962

« En raison de sa trajectoire, le Nord-Est de l'Île est le plus touché avec à Bras-Panon 92% des maisons touchées et 56% de la population sinistrée. »

CCR.fr (20 mars 2018)

2018

Fakir fait souffler le vent à Bras-Panon.

Clicanoo.re (24 avril 2018)

4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES

Depuis 1993, 12 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur la commune de Bras-Panon. Le tableau ci-dessous présente la liste des arrêtés de catastrophe naturelle :

Type de catastrophe	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	18/01/1993	20/01/1993	18/05/1993	12/06/1993
Inondations et coulées de boue	12/02/1993	14/02/1993	14/06/1993	27/06/1993
Inondations et coulées de boue	15/02/1993	17/02/1993	14/06/1993	27/06/1993
Inondations et coulées de boue	27/02/1993	03/03/1993	07/10/1993	24/10/1993
Inondations et coulées de boue	10/02/1994	12/02/1994	12/04/1994	23/04/1994
Inondations et coulées de boue	08/12/1995	09/12/1995	20/02/1996	23/03/1996
Inondations et coulées de boue	24/02/1998	25/02/1998	26/05/1998	11/06/1998
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	22/01/2002	23/01/2002	08/04/2002	18/04/2002
Inondations et coulées de boue	16/02/2005	18/02/2005	02/08/2005	10/08/2005
Inondations et coulées de boue	17/02/2006	19/02/2006	10/11/2006	23/11/2006
Inondations et coulées de boue	04/03/2006	06/03/2006	10/11/2006	23/11/2006
Inondations et coulées de boue	24/04/2018	24/04/2018	23/05/2018	22/06/2018

Tableau 4 - Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de Bras-Panon (source : www.géorisques.gouv.fr)

Les ouvrages généraux de Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998), indiquent les cyclones majeurs ayant concernés La Réunion, et plus ou moins directement Bras-Panon, depuis 1980 (cf. Tableau 5).

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

Tableau 5 - Liste des cyclones notables recensés par Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998)

4.3. CARACTERISATION DES ALEAS LITTORAUX

4.3.1. Aléa recul du trait de côte (RTC)

Considérations générales sur l'aléa RTC

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

L'érosion est une perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement du niveau de l'estran ou de la plage. Les côtes basses meubles ainsi que les côtes à falaises peuvent

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

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 lithologie et de la fracturation en haut de falaise et des actions directes de la mer. L'évolution du trait de côte dépend de plusieurs paramètres (Figure 16) :

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

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

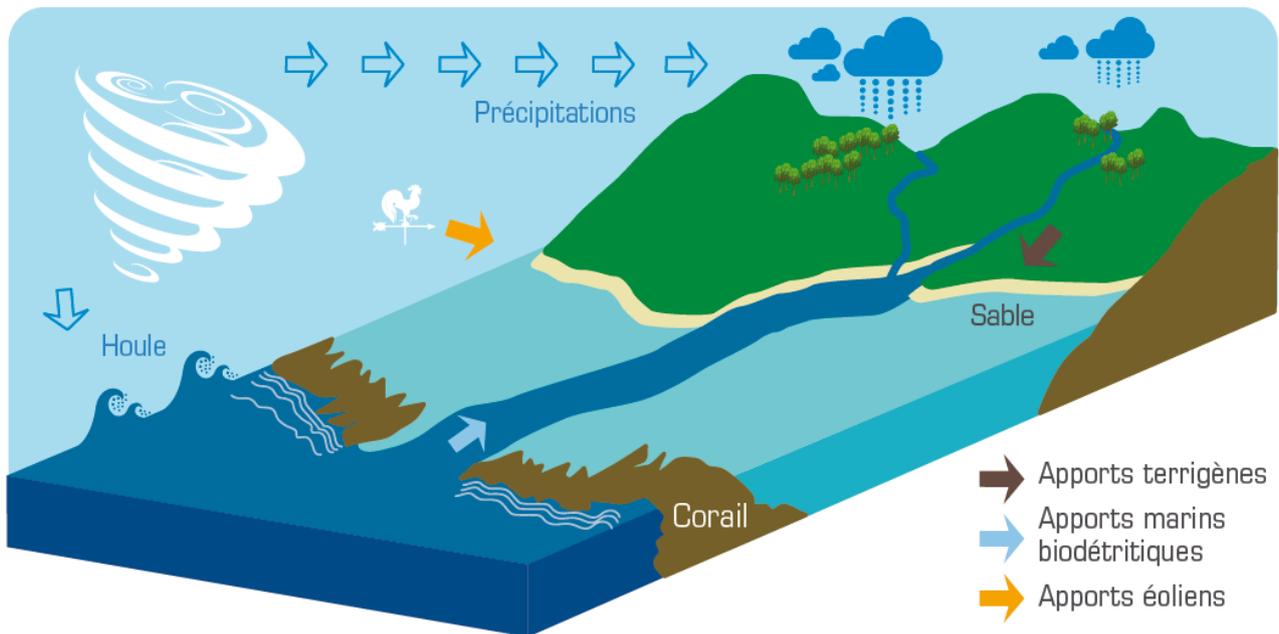


Figure 16 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

Le recul du trait de côte s'appréhende à l'échelle de la cellule hydro-sédimentaire. Les flux sédimentaires littoraux et les obstacles naturels ou anthropiques (Figure 17) qui peuvent entraver ces processus sont à la base des phénomènes qui définissent la distribution des matériaux sur la côte et donc la position du trait de côte. Ces processus dépendent notamment :

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



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

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

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

La longueur d'onde définit en effet la puissance du courant de retrait des vagues (ou backwash) duquel va découler un arrachement des sédiments. Par opposition, les vagues dites « constructrices » ont une période courte et permettent une reconstitution des cordons sédimentaires avec un swash (vague montante) plus important que le backwash (vague descendante) (Figure 18).

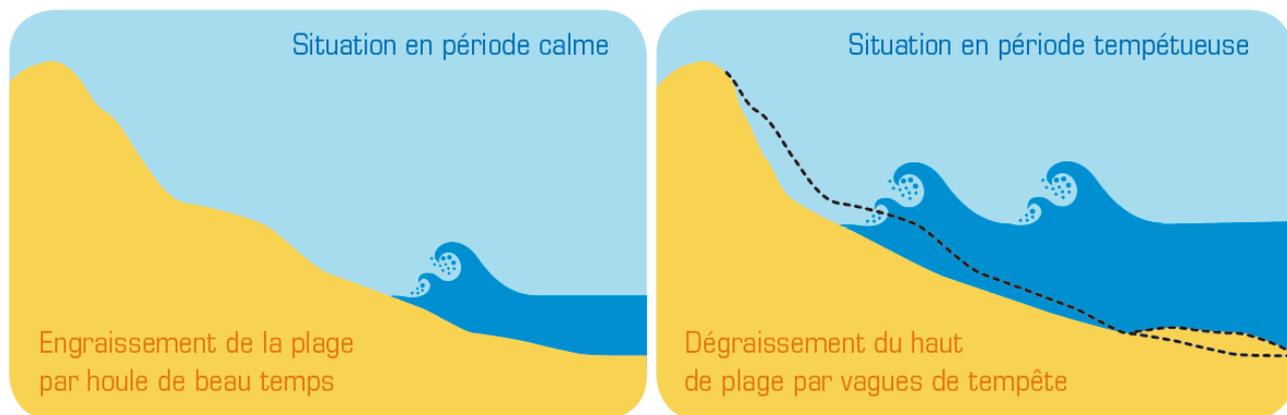


Figure 18 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)

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.

³ Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs

Sur les côtes sédimentaires, on peut constater (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 du recul des côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)

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

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

Sur les côtes à falaises, les phénomènes rencontrés sont les suivants (Figure 20) :

- sous-cavage ;

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

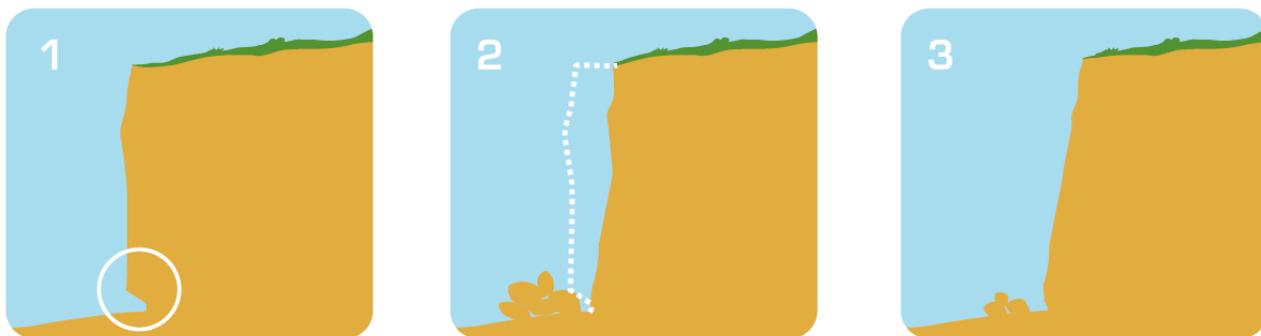


Figure 20 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)

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 250km de côtes (cf. Tableau 6 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)).

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 Bras-Panon

Situé entre deux exutoires de rivières, la commune de Bras-Panon est confrontée à la problématique du recul du trait de côte rythmée par les apports sédimentaires en provenance des rivières au niveau des embouchures et par la redistribution des sédiments en fonction des impacts des houles d'Alizés et cycloniques. Des fronts d'érosion sont observables au niveau des berges de la Rivière des Roches (Figure 21). C'est en revanche au niveau du secteur nord (cône alluvial) et central (cordon de galets) que sont observés les reculs les plus importants depuis 1950. L'embouchure de la Rivière du Mât est soumise à des processus relativement rapides et peut connaître des phases successives d'érosion et d'accrétion intenses en lien avec les dynamiques maritimes et fluviales.



Figure 21 - Berge de la rivière des Roches (Google Earth®, posté en octobre 2022)

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 22) en générant :

- Une **surcote atmosphérique** : il s'agit d'une surélévation du niveau moyen de l'eau qui résulte de l'effet combiné de la dépression, qui crée un effet de baromètre inverse (on considère que la surcote augmente de 1 cm par hectopascal de dépression par rapport à la pression atmosphérique moyenne), et du vent, qui pousse les masses d'eau vers la côte en particulier dans les baies et les zones de haut fond.
- Des **vagues** qui contribuent de deux manières à la submersion :
 - Lors du déferlement, l'apport de masses d'eau au niveau de la côte engendre également une surcote très locale qui contribue à l'élévation du niveau moyen (cette surcote est communément appelée le **wave-setup**) ;
 - Sous l'impulsion des vagues, une nappe d'eau (appelée **jet-de-rive**) est projetée sur le rivage et peut atteindre des zones plus élevées que le niveau moyen. De plus, si les vagues déferlent au niveau de la côte et des aménagements côtiers (protections ou habitations), la libération de leur énergie peut engendrer des dégâts importants.

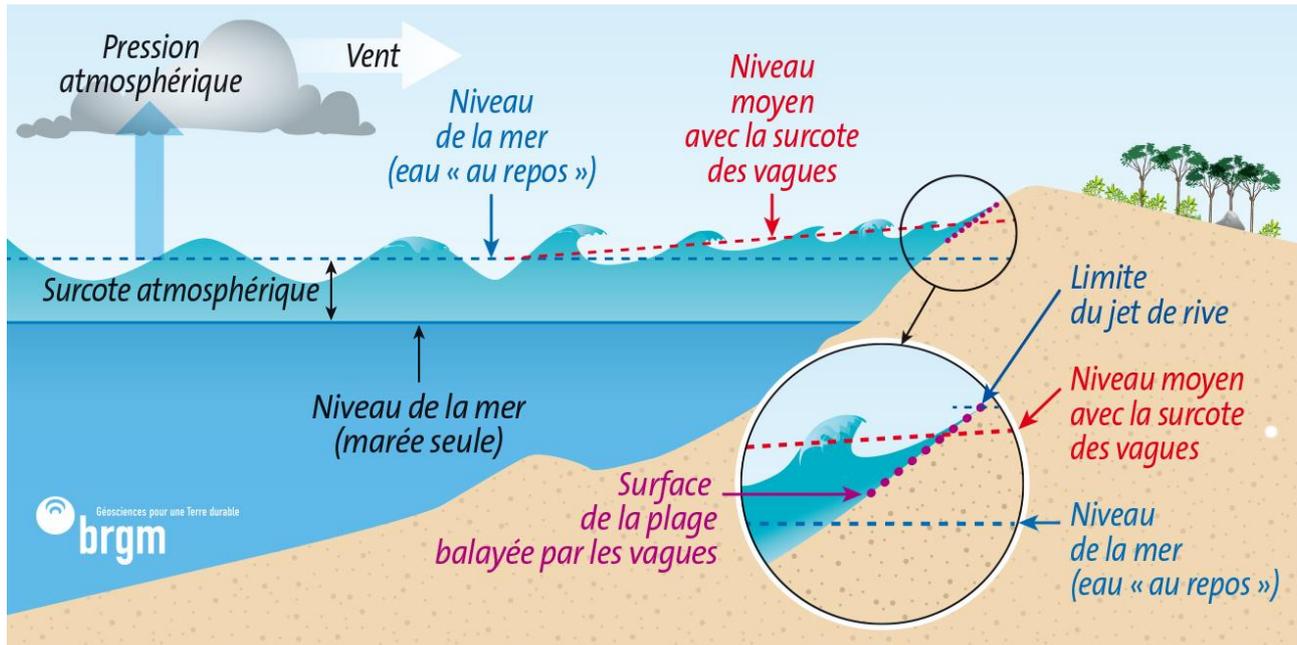


Figure 22 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (De La Torre et al, 2012).

On distingue traditionnellement plusieurs types de submersions marines (cf. Figure 23) :

- 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).

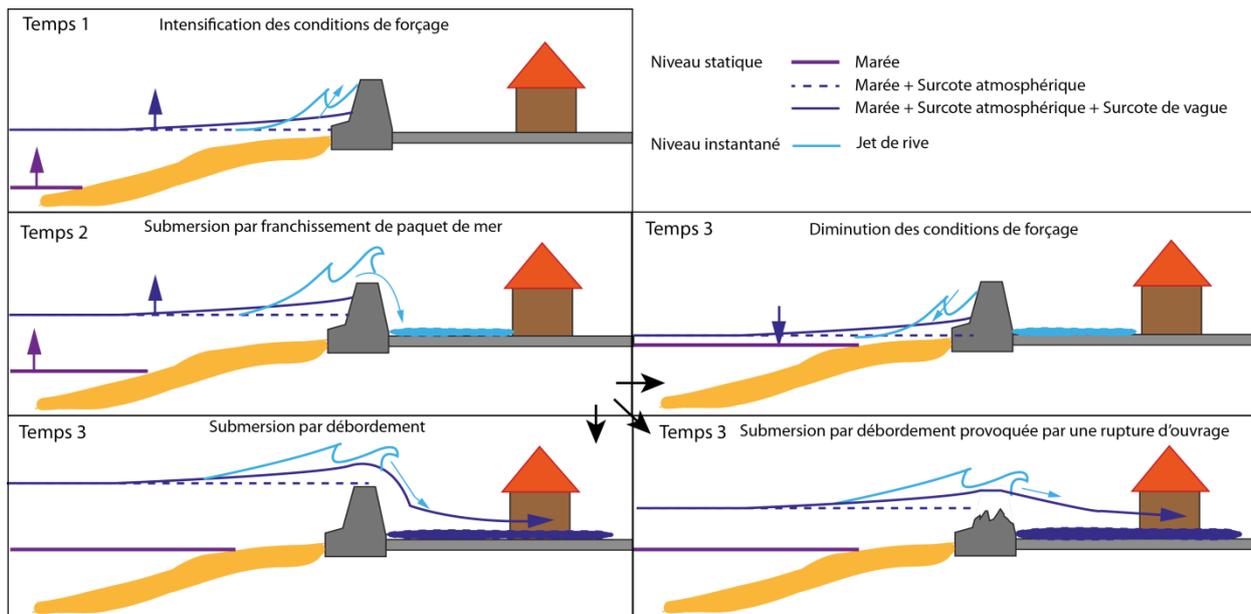


Figure 23 - Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)

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

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

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

Historiquement, l'île de La Réunion a été soumise uniquement aux problématiques de submersion par franchissement de paquets de mer ou de rupture de cordon naturel. Une soixantaine de sites est connue pour être sensible au franchissement par paquets de mer et/ou à l'érosion sur tout le pourtour de l'île (cf. Figure 24 et Figure 25).

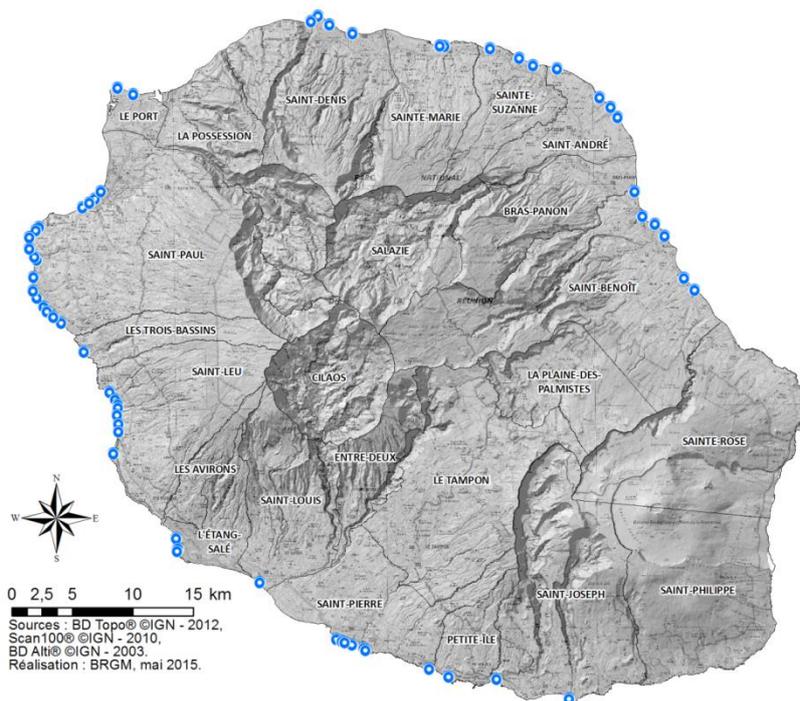


Figure 24 - Sites sensibles à l'action des houles (Chateaufort, 2015)



Figure 25 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (Photographie Pierre Agon, 24/02/2007)

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

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

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

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

L'aléa submersion marine à Bras-Panon

« Le littoral de Bras-Panon présente des pentes bathymétriques moins fortes que sur d'autres secteurs, ce qui permet un déferlement plus éloigné du rivage et donc une meilleure dissipation de l'énergie des houles à l'approche de la côte. La pénétration des houles par franchissement à l'intérieur des terres est de l'ordre de 80m en arrière du cordon littoral » (Chateauminois et al., 2014). Dans la Figure 26 sont présentées les isobathes 0, 10 et 20 mètres au large de la commune. La distance entre l'isobathe 20 mètres et le trait de côte de Bras-Panon témoigne d'une pente bathymétrique relativement faible, avec une valeur d'environ 3.5% au niveau du centre-ville.



Figure 26 – Isobathes 0, 10 et 20m de Bras Panon

5. Caractérisation et cartographie des aléas

5.1. DEFINITIONS ET NOTIONS GENERALES

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

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

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

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

5.2. ALEA REcul DU TRAIT DE COTE

5.2.1. Cadre méthodologique national

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

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

La méthodologie globale ainsi que les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le tableau 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 événement majeur (Lmax)	Données historiques sur un événement majeur	Modèle numérique (modélisation morphodynamique liée à une tempête spécifique)	Analyse géomorphologique à dire d'expert
Zone soumise à l'aléa	Lr = 100 Tx + Lmax		
Etape 2	Prise en compte des ouvrages de protection (vocation à fixer le trait de côte)		
Estimation du rôle à long terme	Capacité à retenir le recul et à résister aux événements majeurs (analyse historique et dire d'expert)		
Adaptation de la zone soumise à l'aléa	Pas d'adaptation si la plage existe encore à échéance 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 événement tempétueux passé		
Côtes non soumises à l'érosion	Sur la base altimétrique d'une augmentation d'un niveau d'eau de 60 cm (étangs, lagunes, fonds de baie)		
Etape 4	Qualification de l'aléa		
Qualification unique	Fort		
Etape 5	Résultats cartographiques		
Carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte	Positions du trait de côte, délimitation des cellules hydrosédimentaires, ouvrages de protection, secteurs de comportements homogènes, vitesses d'évolution du trait de côte (Tx et Lmax)		
Cartes du zonage de l'aléa recul du trait de côte	Zonage de l'aléa de référence (sans changement climatique) à échéance 2100	Position du trait de côte à échéance 2100 avec prise en compte du changement climatique	

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

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

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

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

⁴ Vitesse d'évolution annuelle

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

Préparation des photographies aériennes anciennes

Les photographies utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes couvrant l'ensemble du linéaire côtier de la commune de Bras-Panon 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 = 0.4 m
1978	Couleur et Noir&Blanc	1 : 20 000	1 pixel = 0.5 m
1989	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
1997	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 1 m
2003	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2008	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2011	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.2 m
2017	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.2 m

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

Elles ont été numérisées (scan photogrammétrique pour les prises de vues argentiques), orthorectifiées (correction des déformations dues à l'optique et au relief) et géo référencées par l'IGN. Les photographies aériennes de 1950, 1978 et 1989 ont été numérisées à 1200dpi puis géoréférencées par la méthode d'ajustement dite « spline » grâce au logiciel ArcGis 10.0. Les images de 1997, 2003, 2008, 2011 et 2017 sont issues du produit « BD Ortho ».

Définition et numérisation des traits de côte

Le trait de côte de référence a été matérialisé en fonction de la limite haute du littoral, telle que défini dans le guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL, à savoir (Figure 27) :

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

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



Figure 27 – Exemple de définition de 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 précisés. 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 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 marnage⁶ étant généralement inférieur à 50 cm sur les côtes réunionnaises, la différence de position entre les limites de jet de rive de basse mer et de pleine mer est minimale (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, les traits de côte ont été numérisés sous ArcGis à une échelle comprise entre le 1:500^e et 1:1000^e en fonction de l'année considérée.

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.

⁶ Différence de hauteur d'eau entre une basse mer et une pleine mer successives

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



Figure 28 - Implantation des transects à Bras-Panon (Fond orthophotographique ©IGN, 2017)

Les transects sont implantés tous les 20 m (cf. Figure 28), et le taux d'évolution est calculé à partir d'une régression linéaire pondérée (*Weight Linear Regression - WLR*) adaptée à l'échantillon de traits de côte.

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

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 $90 (+/- 2 \text{ ou } 3) \times T_x$. Il a été décidé de simplifier et de considérer une formule unique $100.T_x$ pour le recul du trait de côte à échéance 2100.

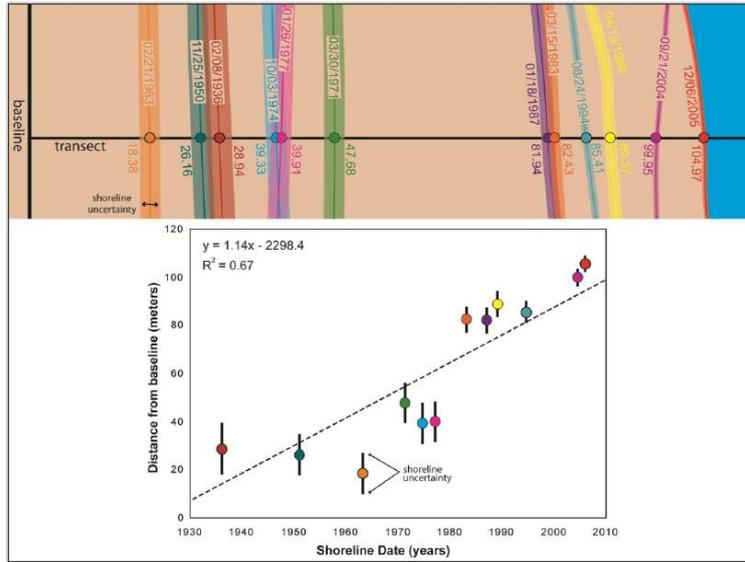


Figure 29 - Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)

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 30), il convient de regrouper et « moyenner » les valeurs au sein de secteurs au comportement morpho-dynamique homogène. De plus, la dynamique des exutoires étant fortement variable au cours du temps, le recul du trait de côte ne pourra y être calculé.

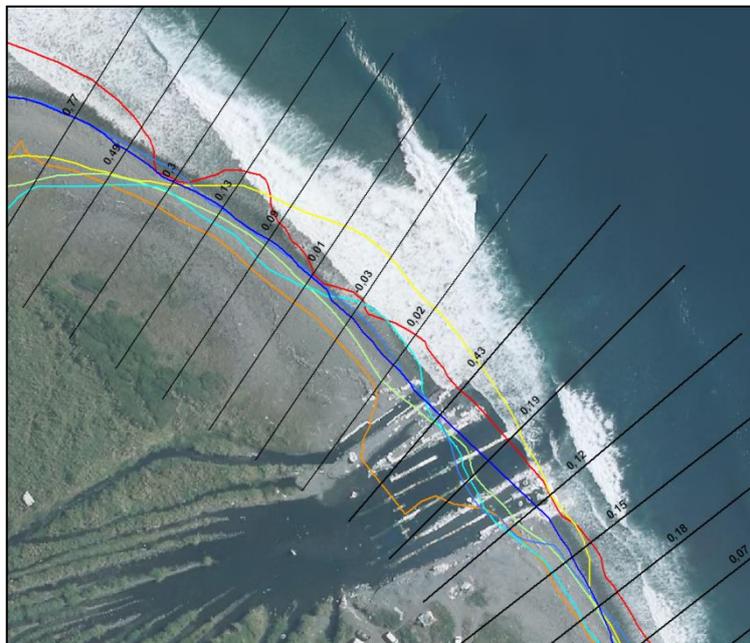


Figure 30 - Exemple d'artefact en couleurs les différents traits de côte historiques (Haut de plage) - Fond orthophotographique ©IGN, 2017

Au sein de grandes cellules hydro-sédimentaires, des secteurs sont ainsi définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral. Trois secteurs sont définis à Bras-Panon (cf. 3.1.6.Faciès

littoraux et dynamique littorale). Les reculs moyens par secteur (moyenne des Tx obtenus sur chacun des profils) sont enfin classés par catégories de vitesses de recul soit :

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

Les résultats sont présentés par secteur homogènes (cf. 3.1.6) ci-dessous, l'embouchure de la rivière du Mât présente le plus fort taux de recul de la commune, avec un taux d'érosion de 0.34m/an depuis 1950. Le second secteur, constitué d'un cordon de galets présente un taux d'érosion de 0.27m/an. Le dernier secteur, au sud de la commune, présente le plus faible taux d'érosion avec une érosion moyenne de 0.07m/an (Tableau 9).

Secteur	Morphotype	Recul Tx (m/an)	Classe	100Tx
1	Cône alluvial	-0.34	Fort	-34
2	Cordon de galets	-0.27	Fort	-27
3	Cordon de galets / Embouchure	-0.07	Faible	-7

Tableau 9 - Calculs de recul du trait de côte par secteurs homogènes sur la commune de Bras-Panon

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

Zonage de l'aléa recul du trait de côte

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

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

La largeur de la zone d'aléa résultante ($L_r = 100Tx + L_{max}$) est affectée en arrière du trait de côte de référence, ici la limite du haut de plage.

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

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

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

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

Faute de consensus scientifique sur la méthode pour déterminer la zone qui pourrait être érodée du fait du changement climatique, qui plus est dans le contexte spécifique de La Réunion, le guide méthodologique : « Plan de prévention des risques littoraux » (DGPR, 2013) propose d'appliquer :

- une « règle de trois » entre les +60cm 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.

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

L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau ci-dessous.

Secteur	Morphotype	100 TX arrondi/plafonné	Lmax	Lr	Lr CC
1	Cône alluvial	35	10	45	115
2	Cordon de galets	25	10	35	85
3	Cordon de galets / Embouchure	10	10	20	40

Tableau 10 - Valeurs 100Tx arrondi et plafonné ; Lmax ; Lr et Lr CC par secteurs homogènes pour la commune de Bras-Panon

Résultats cartographiques

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

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

- une carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte au 1/10 000 (Annexe 1) contenant les différents traits de côtes historiques, les limites des cellules hydrosédimentaires et des secteurs à comportement homogène ainsi que les classes de vitesses de recul associées (Figure 31) ;



Figure 31 – Extrait de la synthèse de l'évolution historique du trait de côte de Bras-Panon (cf Annexe 1)

- une carte de l'aléa recul du trait de côte au 1/5 000 (Annexe 2) contenant le trait de côte de référence (2017), le zonage de l'aléa à échéance 2100 (qualification en aléa fort uniquement), la limite de l'aléa avec prise en compte du changement climatique (cf. Figure 32).



Figure 32 – Extrait de la cartographie de l'aléa recul du trait de côte de Bras-Panon (Annexe 2)

5.3. ALEA SUBMERSION MARINE

5.3.1. Cadre méthodologique national

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

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

La méthodologie globale et les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le Tableau 11 suivant et précisés dans le chapitre 5.3.2 et 5.3.3. ::

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

Tableau 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, hormis pour la zone interne des étangs qui peut subir des débordements liés à la surcote de tempête sans action des vagues, c'est le franchissement par les vagues qui impacte l'ensemble du linéaire côtier de l'île.

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

La modélisation numérique est donc préférée car elle permet d'intégrer les spécificités du littoral de Bras-Panon. 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 centennal, 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 33). 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.

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

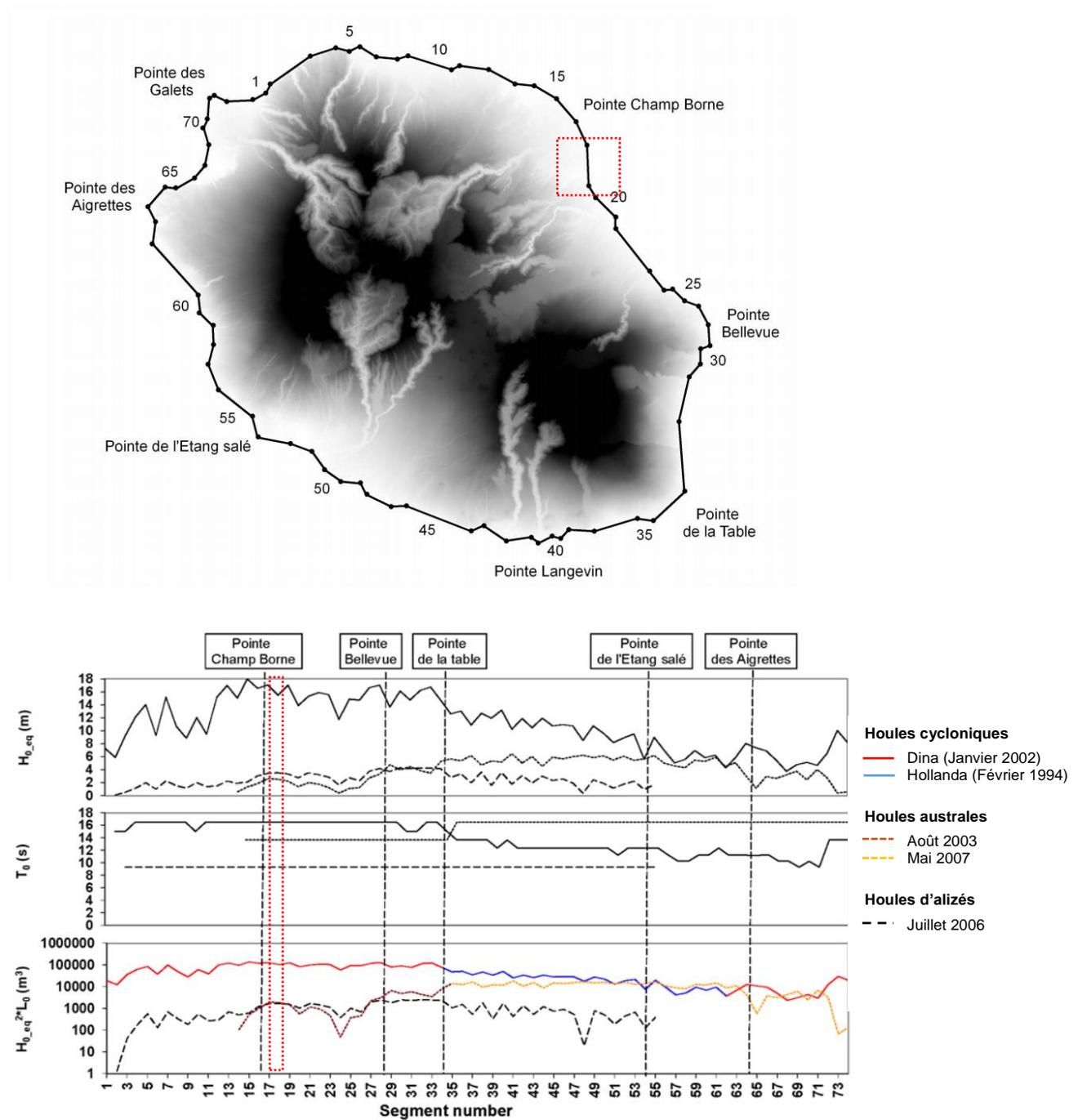


Figure 33 – Comparaison des houles engendrées par différents évènements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – (Lecacheux et al., 2012)

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 34) :

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

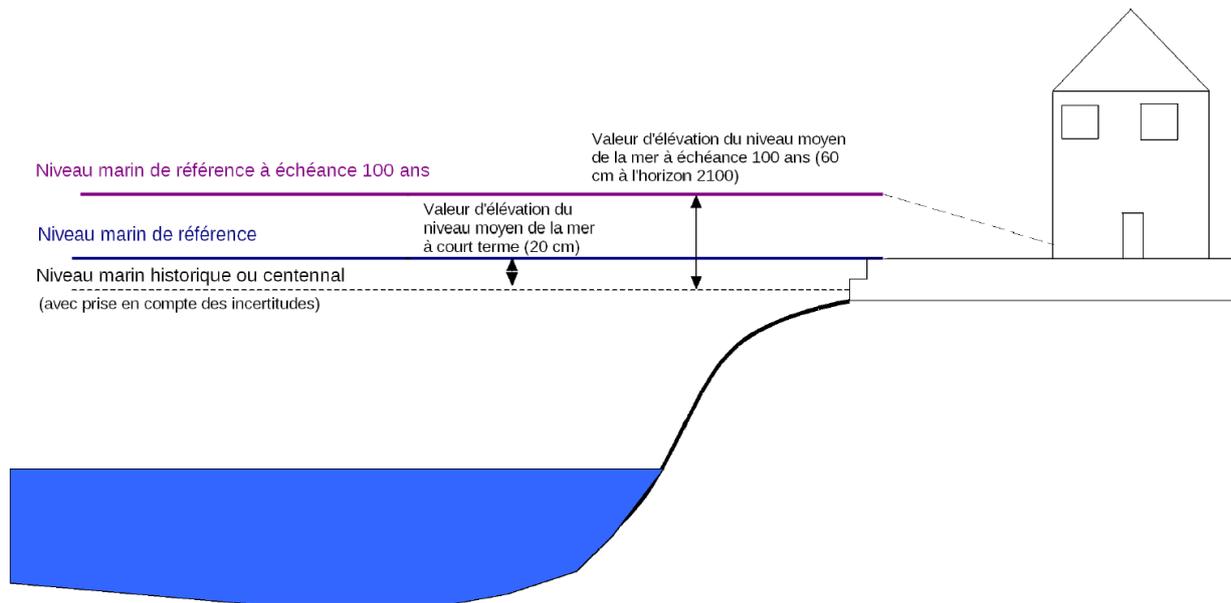


Figure 34 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (DGPR, 2014)

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 35:

- 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.

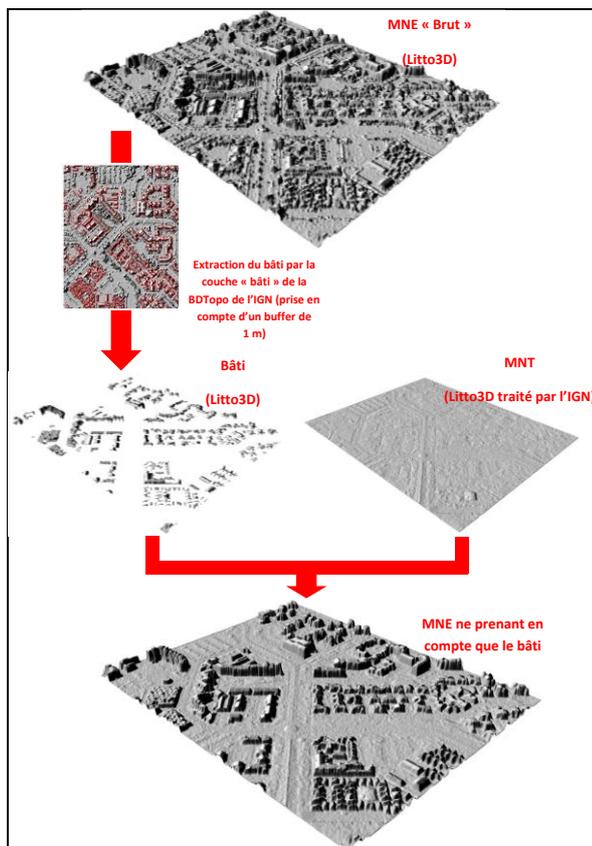


Figure 35 - Principales étapes nécessaires à la construction du MNE (Le Roy et al., 2012) – données Litto3D ©IGN.

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 retenu 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 calculé 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-France⁸ 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.

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

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

Évènement 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

⁸ Saison cyclonique – Sud-ouest de l'océan Indien, 2001-2002, Météo-France, 100p.

Stratégie de modélisation : Méthode adoptée pour les simulations

• Localisation de la simulation

La modélisation du profil 5.1 a été réalisée au niveau du centre-ville de Bras-Panon, à 500 m au nord de la Rivière des Roches (Figure 36).



Figure 36 - Localisation des transects de la simulation 1D à Bras-Panon

• Méthode adoptée pour les simulations

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 ;

- **Simulations SWAN en 2D**

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore), développé à l'université de Technologie de Delft (Pays-Bas), permet de calculer les paramètres décrivant la houle au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij et al. (2004). SWAN est basé sur l'équation spectrale de conservation de l'action de la houle qui est résolue suivant un schéma implicite en différences finies (Lecacheux S., et al. 2013).

Les simulations de houles cycloniques menées lors de l'étude HOULREU (résolution de 90 m, grilles de calcul notées R2E et R2N dans Pedreros *et al.*, 2009) et modifiées par Lecacheux *et al.* (2012) pour calculer les houles de référence au large orthogonales à la côte, sont exploitées suivant les 2 scénarios envisagés (« référence » et « 2100 »). En connaissant ainsi les différentes propriétés des cyclones (intensité, trajectoire, rayon d'action...) à l'échelle de l'océan indien, il est possible d'en déduire les caractéristiques de la houle (direction de propagation, hauteur significative, période). Le code SWAN permet alors, en rétrécissant de plus en plus le domaine d'étude, de propager ces caractéristiques jusqu'au large de l'île de la Réunion.

- **Simulations de la submersion SWASH 1D : en condition stationnaire sur une durée de une heure**

La propagation des vagues 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 (Lecacheux S., et al. 2013).

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 de la houle issues des calculs menés sous SWAN, permettent de générer à l'aide du code SWASH des séries temporelles de vagues conformes à ces caractéristiques au-delà de la zone de déferlement, pour chaque profil et pour chaque niveau d'eau considéré. Les séries temporelles sont reconstituées sur des durées d'une heure, de manière à assurer un nombre de vagues suffisant pour être représentatif, pendant laquelle la hauteur significative est considérée constante.

En ce qui concerne les calculs sur les profils, ces mêmes caractéristiques déterminées précédemment avec SWAN au large, sont utilisées comme conditions aux limites pour SWASH (à des profondeurs de l'ordre de 50 m), moyennant l'utilisation de spectres de JONSWAP (Joint North Sea WAVE Project). La propagation des spectres depuis le large jusqu'à la côte est menée à une résolution de 1 m le long du profil, et permet de connaître les principales caractéristiques des vagues le long de ce dernier dans les deux scénarios étudiés (scénarios de référence et 2100), et notamment :

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

Les calculs sont menés sur des profils topo-bathymétriques issus des données Litto3D⁹ ré-échantillonnées pour une résolution de calcul de 1m dans l'axe du profil.

En une dimension, le code SWASH prend en compte une friction homogène 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 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 associé 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}.

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}.

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}.

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.

		Conditions de houles calculées par SWAN2D et corrigée au droit des deux sites à 50m de profondeur	
Profil	Lieu	Hs (m) orthogonal	Tp (s)
5.1	Bras-Panon	15.5	17

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

5.3.4. Analyse des résultats des simulations SWASH 1D

Les paragraphes suivants présentent les résultats des simulations numériques sur la commune de Bras-Panon. 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 ».

⁹ Ces profils n'intègrent pas le bâti.

Les résultats obtenus sur le profil 1D sont représentés en Figure 37. Cette dernière permet 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.

Le littoral de Bras-Panon présente des pentes bathymétriques moins fortes que sur les autres secteurs, ce qui permet un déferlement plus éloigné du rivage et donc une meilleure dissipation de l'énergie des houles à l'approche de la côte. La pénétration des houles par franchissement à l'intérieur des terres est de l'ordre de 80m en arrière du cordon littoral (Figure 38).

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

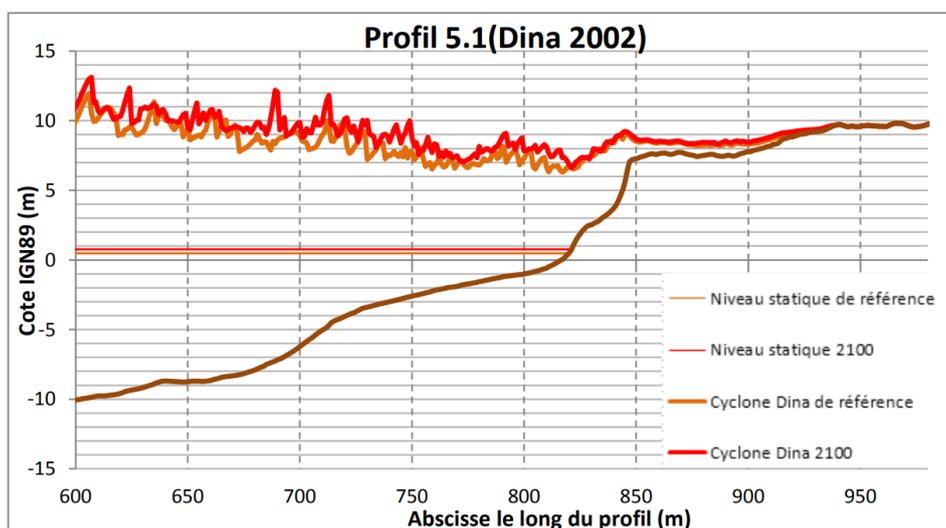


Figure 37 - Evènement de référence « cyclone Dina » : niveau d'eau maximal obtenu le long du profil 5.1 à Bras-Panon pour les scénarios « référence » et « 2100 » pour 1 heure simulée – Profils en travers



Figure 38 - Evènement de référence « cyclone Dina » : Limites de l'aléa fort le long du profil 5.1 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 sont définis par les résultats du modèle le plus représentatif du secteur*
- *Un bandeau forfaitaire (30 à 50m) 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 20m ou 10m de large suivant que le profil du terrain naturel soit plat/descendant ou ascendant*
- *A minima, le bandeau d'aléa faible fait 15m de largeur*
- *Derrière un ouvrage littoral de protection contre la submersion (type levée ou digue), un bandeau de 50m d'aléa fort est considéré*
- *De la même manière, derrière un massif de type cordon dunaire ou cordon littoral, une zone de 50m d'aléa fort est également considérée*
- *En zone de déferlement cyclonique, un bandeau de 50m 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 positionné 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 39).

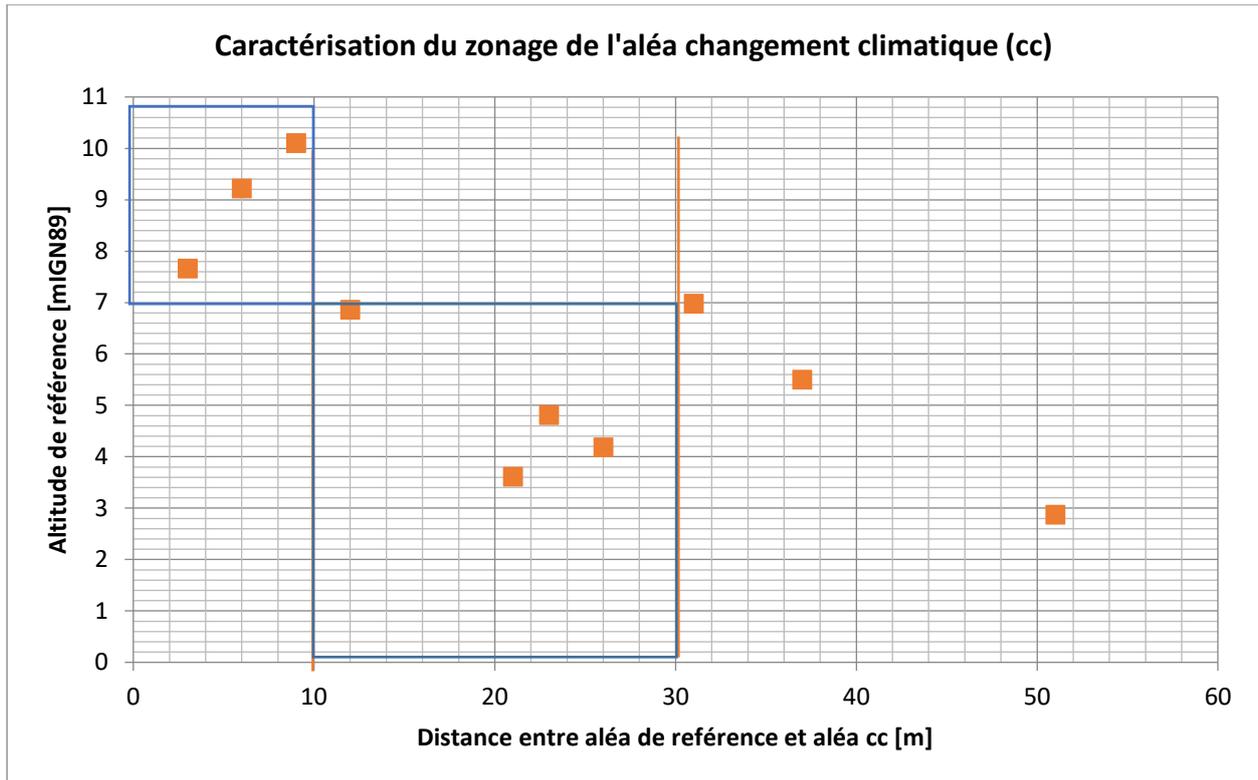


Figure 39 - Caractéristiques du zonage changement climatique

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 3m et peut monter jusqu'à 51m 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 30m 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.

Résultats cartographiques

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

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

Il en résulte la superposition d'un grand nombre d'informations sur les cartes d'aléa 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 100 ans (dit aléa 2100).

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

- Une carte de synthèse au 1/10 000^{ème} présentant les modes de submersions (extrait en Figure 40), 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 41).

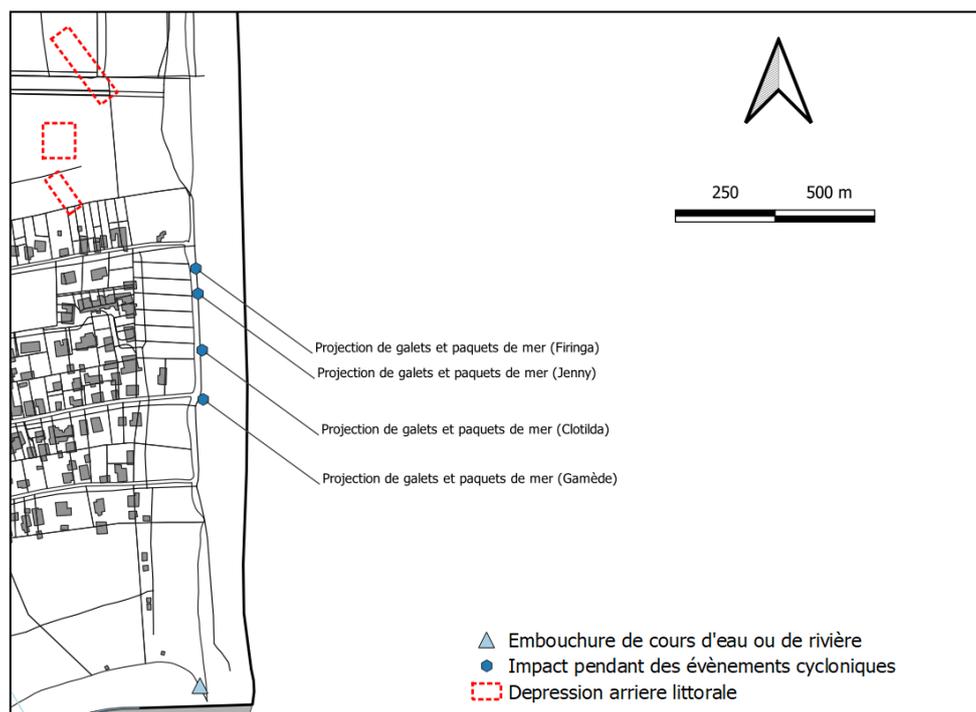


Figure 40 - Extrait de la carte de synthèse de l'historique de la submersion marine de la commune de Bras-Panon (cf. Annexe 3)

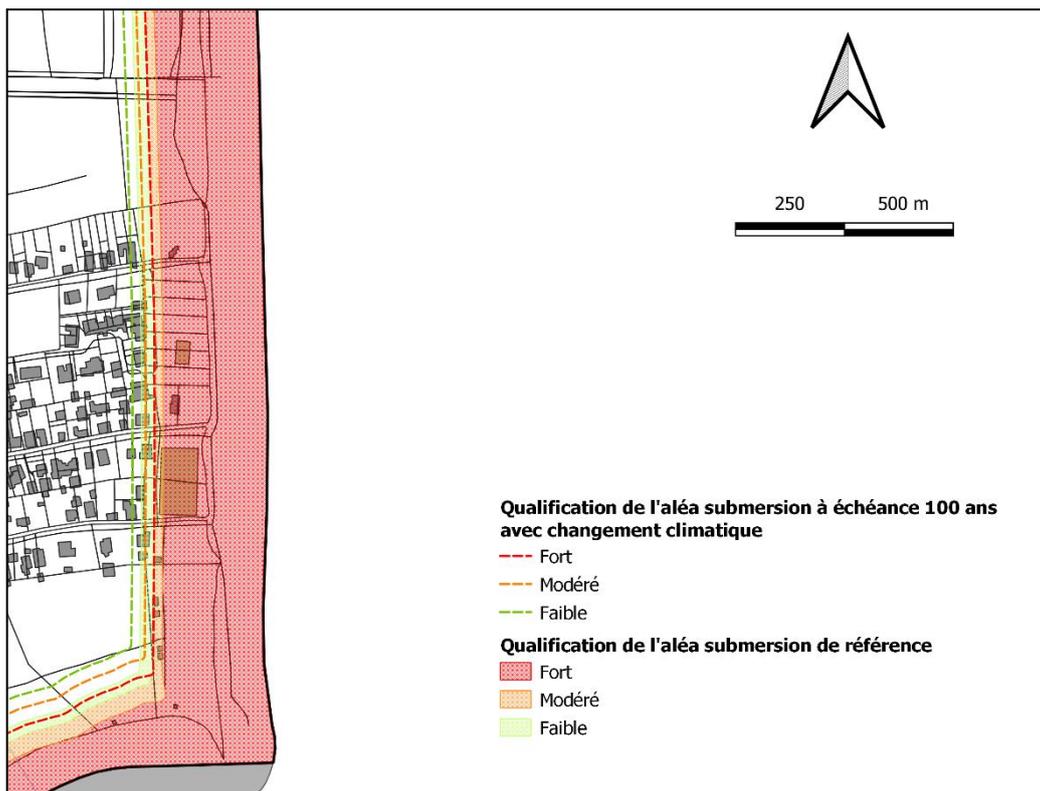


Figure 41 - Extrait de la carte d'aléa submersion marine de la commune de Bras-Panon (cf. Annexe 4)

6. Élaboration du zonage réglementaire

6.1. METHODOLOGIE

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

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

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

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

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

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

6.1.1. Les espaces urbanisés et non-urbanisés

La prise en considération des espaces urbanisés et non-urbanisés est essentielle dans le cadre de l'élaboration d'un document de risques (Figure 42). Elle a pour vocation de :

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

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

- Le Schéma de Mise en Valeur de la Mer (SMVM du 22 novembre 2011) élaboré par la Région Réunion, notamment les espaces naturels remarquables du littoral ;

- Les zones de coupure d'urbanisation du Schéma d'Aménagement Régional (SAR du 22 novembre 2011) élaborée par la Région Réunion ;
- Les zones naturelles délimitées dans les documents d'urbanismes communaux (Plan Local d'Urbanisme / Plan d'Occupation des Sols) ;
- La limite des 50 pas géométriques ;

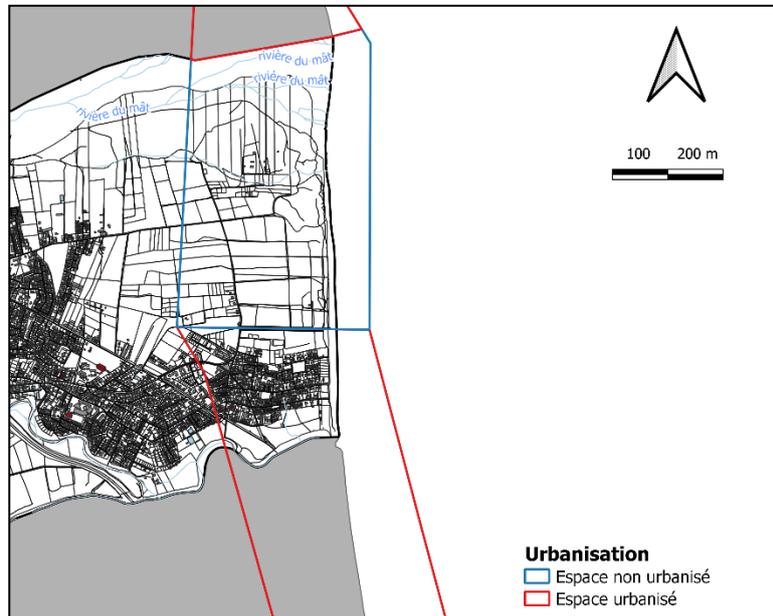


Figure 42 – Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur le littoral de Bras-Panon

6.1.2. La submersion marine

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

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

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

- « Les espaces non urbanisés soumis au risque d'inondation, quel que soit son niveau, restent préservés de tout projet d'aménagement afin de ne pas accroître la présence d'enjeux en zone inondable ;
- les espaces déjà urbanisés ne doivent pas s'étendre en espace inondable peu ou pas urbanisé, et les secteurs les plus dangereux (zone d'aléa fort) sont rendus inconstructibles ;
- D'une manière générale la vulnérabilité des espaces urbanisés ne doit pas être augmentée ;
- La prise en compte du réchauffement climatique dans l'aléa horizon 100 ans n'a pas pour conséquence directe de rendre inconstructible les secteurs concernés (sauf rare exception essentiellement liée à la topographie du lieu [...]). Dans ces zones, le périmètre et la nature des mesures de réduction de vulnérabilité à prescrire (hauteur de plancher, espace refuge...) seront définis à partir de l'aléa horizon 100 ans. Cependant, dans le respect des principes guidant la réalisation des PPR, dans quelques cas limités, l'inconstructibilité sera la règle ou à étudier. Plus précisément, il s'agit d'un terrain situé dans la zone d'aléa 2100 (modéré ou fort), en zone naturelle, et dans une zone non soumise à l'aléa de référence ».

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

Principes d'inconstructibilité liés à la submersion :

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

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

Un principe de constructibilité avec prescription s'applique sur les autres secteurs (Tableau 16 & Tableau 17).

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

Tableau 16 – Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés

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

Tableau 17 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés

6.1.3. Le recul du trait de côte

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

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

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

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

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

6.2. TRADUCTION REGLEMENTAIRE DES DEUX ALEAS

Le zonage réglementaire final (Figure 43) est la transcription du croisement entre les études techniques (qui ont notamment conduit à l'élaboration des cartes d'aléas) et l'identification des enjeux du territoire en termes d'interdictions, de prescriptions et de recommandations Tableau 18 & Tableau 19).

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

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

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

- Une **zone moins exposée à l'aléa submersion marine**, appelée **zone bleue (B)**, au principe de constructibilité sous conditions.

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

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

Tableau 18 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces non-urbanisés

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

Tableau 19 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et érosion du trait de côte dans les espaces urbanisés

Un extrait de la cartographie du zonage réglementaire de la commune de Bras-Panon est présenté ci-après.

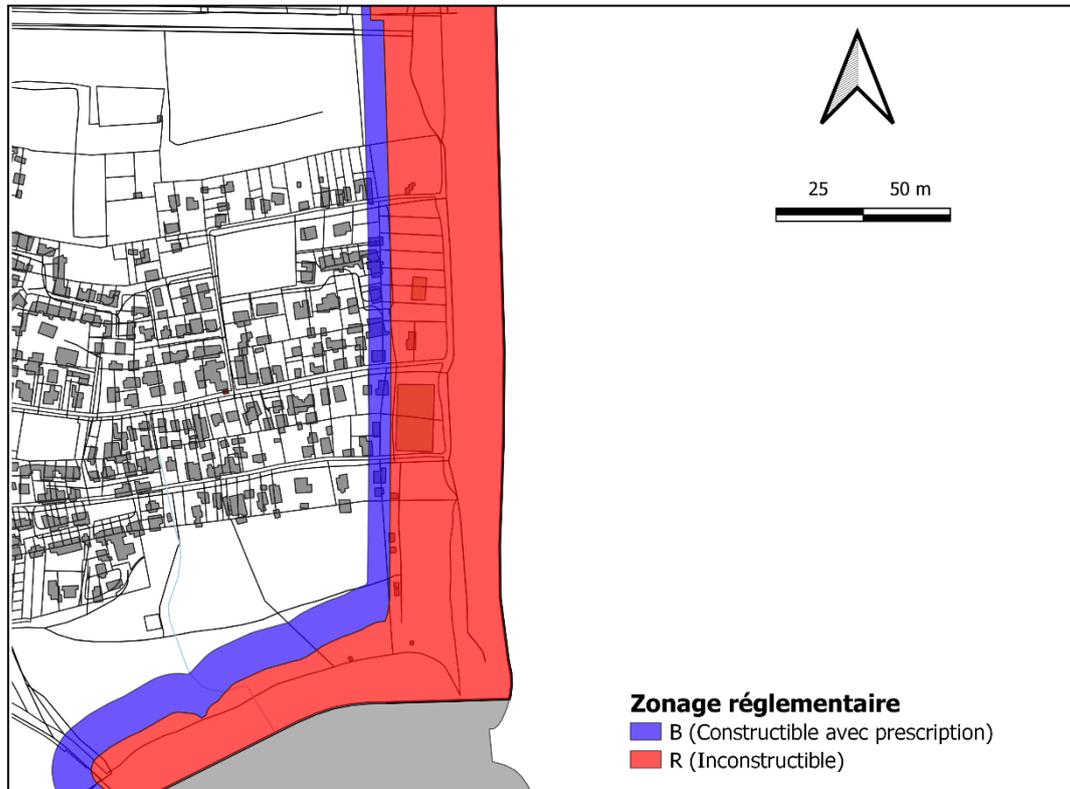


Figure 43 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL de Bras-Panon

7. Lexique des sigles et termes techniques

7.1. 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'Elévation
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

7.2. TERMES TECHNIQUES

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Falaise : Escarpement vertical ou subvertical.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Surcote : Différence positive entre le niveau marégraphique observé/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.

8. Principaux textes officiels

8.1. LEGISLATION - REGLEMENTATION

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

8.2. PRINCIPALES CIRCULAIRES

1. La circulaire interministérielle (Intérieur - Equipement - Environnement) du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables ;
2. La circulaire du ministère de l'Environnement du 19 juillet 1994 relative à la relance de la cartographie réglementaire des risques naturels prévisibles ;
3. La circulaire interministérielle (Equipement - Environnement) du 24 avril 1996 relative aux dispositions applicables au bâti et aux ouvrages existants en zones inondables ;

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

8.3. PUBLICATION DE GUIDES

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

9. Bibliographie

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Hydretudes (2007), PPRI Saint-Pierre – Rapport Houle Australe 12 Mai 2007, référence : R04-531
- Kluska, J.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., Monfort D. (2012) – ALDES : Simulations numériques du tsunami en Méditerranée Occidentale. Rapport BRGM/RP-61473-FR, 95 p., 62 ill. ;
- Le Roy S. et Pedreros R. avec la collaboration de Monfort D. (2011) – ALDES : Modélisation numérique du tsunami survenu à Antibes en 1979. Rapport BRGM/RP-60353-FR, 80 p., 61 ill. ;
- Lecacheux S., Pedreros R., Le Cozannet G., Thiébot J., De la Torre Y. et Bulteau T. (2012) – A method to characterize the different extreme waves for islands exposed to various wave regimes: a case study devoted to Reunion Island. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, pp 2425-2437. ;
- Marche F., Bonneton P., Fabrie P. and Seguin N. (2007) – Evaluation of well-balanced bore-capturing schemes for 2D wetting and drying processes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53: 867-894. ;
- Météo France, 2007. Note de synthèse sur le risque lié à la surcote cyclonique à La Réunion, 8p ;
- Météo France, 2009. Etude pour l'identification des évolutions des changements climatiques à La Réunion ;
- Pedreros R. & Garcin M. (2012) – Le Phénomène de la submersion marine in « Gestion des risques naturels, Leçons de la tempête Xynthia » p.47-56 Ed. QUAE Versailles ;
- Pedreros R., Krien Y., Poisson B. (2010) – Programme ARAI 2. Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie Française. Rapport BRGM/RP-58990-FR, 64 p., 43 fig., 4 tabl.
- Pedreros R., Lecacheux S., Le Cozannet G., Blangy A et De La Torre Y. avec la collaboration de Quetelard H. (Météo France) (2009) – « HOULREU » : Quantification de la houle centennale de référence sur les façades littorales de la Réunion. BRGM/RP-57829-FR, 119 p., 93 fig., 14 tab.
- Soler O., Météo-France, 1997. Atlas climatique de La Réunion, http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/# ;
- Stockdon H. F., Holman R. A., How P. A., Sallenger A. H. Jr. (2006) - Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coastal Engineering*, 53, pp. 573-588. ;
- Torres-Freyermuth, A., Mariño-Tapia, I., Coronado, C., Salles, P., Medellín, G., Pedrozo-Acuña, A., Silva, R., Candela, J., and Iglesias-Prieto, R.: Wave-induced extreme water levels in the Puerto Morelos fringing reef lagoon, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3765-3773, doi:10.5194/nhess-12-3765-2012, 2012
- Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coast. Engng.*, 58: 992-1012.



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

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