



DEPARTEMENT DE LA REUNION
Communes de l'Étang-Salé et des Avirons

PLAN DE PREVENTION DES RISQUES LITTORAUX

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

NOTE DE PRESENTATION

Octobre 2016

ENQUETE PUBLIQUE



Avertissement général sur les limites d'étude du document PPR

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

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

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

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

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

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

Sommaire

1.	INTRODUCTION	9
1.1.	Organisation de la gestion des risques.....	9
1.2.	Prévention des risques naturels	9
1.3.	Plan de prevention des risques (PPR) naturels	11
1.4.	Catastrophes naturelles majeures à la Réunion	11
2.	PRESENTATION DU PPR	13
2.1.	Contexte réglementaire du PPR.....	13
2.2.	Procédure réglementaire	14
2.2.1.	Secteurs géographiques concernés	14
2.2.2.	État des réflexions menées	14
2.3.	Assurances et infractions au PPR	16
2.3.1.	Rappel du régime d'assurance en vigueur	16
2.3.2.	Infractions au PPR et sanctions.....	19
2.4.	Expropriation et Mesure de sauvegarde	19
2.5.	Responsabilités	19
2.5.1.	Etablissement du PPR.....	19
2.5.2.	Autorisation d'occuper le sol.....	20
3.	PRESENTATION DES COMMUNES	21
3.1.	Contexte de la zone d'étude	21
3.1.1.	Situation géographique.....	21
3.1.2.	Contexte géologique	22
3.1.3.	Contexte géomorphologique littoral	26
3.1.4.	Contexte climatique	29
3.2.	Enjeux et vulnérabilité	36
4.	HISTORICITE ET CARACTERISATION DES PHENOMENES NATURELS	41
4.1.	Phénomènes historiques	41
4.2.	Arrêtés de catastrophes naturelles	42
4.3.	Caractérisation des aléas littoraux.....	43
4.3.1.	Aléa recul du trait de côte (RTC).....	43
4.3.2.	Submersion marine.....	49
5.	CARACTERISATION ET CARTOGRAPHIE DES ALEAS	57

5.1.	Définitions et notions générales.....	57
5.2.	Aléa recul du trait de côte.....	57
5.2.1.	Cadre méthodologique national.....	57
5.2.2.	Estimation de l'aléa recul du trait de côte.....	58
5.2.3.	Zonage de l'aléa recul du trait de côte.....	63
5.3.	Aléa submersion marine.....	67
5.3.1.	Cadre méthodologique national.....	67
5.3.2.	Modélisation des submersions marines de référence.....	68
5.3.3.	Zonage cartographique de l'aléa submersion marine.....	84
6.	ELABORATION DU ZONAGE REGLEMENTAIRE	89
6.1.	Méthodologie.....	89
6.1.1.	Les espaces urbanisés et non-urbanisés.....	89
6.1.2.	La submersion marine.....	90
6.1.3.	Le recul du trait de côte.....	92
6.2.	Traduction réglementaire des deux aleas.....	92
7.	LEXIQUE DES SIGLES ET TERMES TECHNIQUES	97
8.	PRINCIPAUX TEXTES OFFICIELS	101
8.1.	Législation - Réglementation.....	101
8.2.	Principales circulaires.....	101
8.3.	Publication de guides.....	102
9.	BIBLIOGRAPHIE	103

Liste des figures

Figure 1 : Délimitation des territoires communaux de l'Étang-Salé et des Aviron (Fond ©IGN scan100®-2010)	21
Figure 2 : Perspective géologique de La Réunion (Billard, 1974)	23
Figure 3 : Illustration de la carte géologique au 1/50 000 (Billard 1974 modifié) à l'échelle des communes de l'Étang-Salé et des Aviron	24
Figure 4 - Réseau hydrographique des bas des Aviron et de l'Étang-Salé	27
Figure 5 - Types de côtes sur le littoral de l'Étang-Salé	28
Figure 6 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)	30
Figure 7 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)	30
Figure 8 : Localisation des stations météo à proximité de l'Étang-Salé (©IGN Scan100® - 2010)	31
Figure 9 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France) L'œil est passé à peine à 30km des côtes, ce qui correspond au rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) a dépassée largement les 200km/h et les vagues ont atteint les 15m par endroit.	32
Figure 10 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)	33
Figure 11 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).	34
Figure 12 - Houles de références à La Réunion et caractéristiques au large (Pedreros et al., 2009). Littoral des Aviron et Etang Salé cerclé de rouge.	35
Figure 13 - Evolution de l'urbanisation de l'Étang-Salé les Bains entre 1950 et 2012	37
Figure 14 - Evolution de l'urbanisation de la pointe des Aviron entre 1950 et 2012	38
Figure 15 - Extrait de la carte des enjeux de la commune de l'Etang-Salé (cf. Annexe 5)	39
Figure 16 - Extrait de la carte des enjeux de la commune des Aviron (cf. Annexe 5)	39
Figure 17 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)	44
Figure 18 – Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012)	45
Figure 19 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)	45
Figure 20 - Les manifestations de l'érosion sur les côtes sédimentaires à La Réunion (De La Torre et al, 2012)	46
Figure 21 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)	47
Figure 22 - Déchaussement d'un mur de protection et d'un escalier à l'Étang-Salé-les-Bains (De La Torre et al, 2012)	48
Figure 23 - Dynamique hydro-sédimentaire du littoral des Aviron	49
Figure 24 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (BRGM).	50
Figure 25. Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)	51
Figure 26 - Sites sensibles à l'action des houles (BRGM, 2015)	52
Figure 27 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (2007)	52
Figure 28 - Plan de mouillage de l'Étang-Salé, mai 1846 (site internet de l'Étang-Salé)	53
Figure 29 – Altitude des la bande littorale (m NGR) - Source Litto3D©	54
Figure 30 - Dépôts de sable suite aux paquets de mer ayant affecté le front de mer de l'Étang-Salé lors du cyclone Béjisa (B. Aunay et al, janvier 2014)	55
Figure 31 – Configuration du littoral des Aviron	56
Figure 32 - Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral à l'Étang-Salé : a. limite de végétation ; b. limite en pied d'aménagement ; c. limite de haut de versant	60
Figure 33 - Exemple d'implantation des profils à Bassin-Pirogue	61
Figure 34 – Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)	61
Figure 35 – Exemple d'artefact (en pointillé noir trait de côte 100Tx en « dent de scie », en couleurs les différents traits de côte historiques)	62
Figure 36 – Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte dans le secteur l'Étang-Salé (cf. Annexe 1)	65
Figure 37 - Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte sur la commune des Aviron (cf. Annexe 1)	65
Figure 38 – Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur la commune de l'Etang-Salé (cf. Annexe 2)	66
Figure 39 – Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur la commune des Aviron (cf. Annexe 2)	66
Figure 40 – Comparaison des houles engendrées par différents événements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – (Lecacheux et al., 2012)	70
Figure 41 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (MEDDTL, 2012)	72

Figure 42 – Localisation du transect de la simulation 1D réalisée à l'Étang-Salé-les-Bains	73
Figure 43 – Aperçu de la propagation des vagues	76
Figure 44 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil de l'Étang-Salé pour le scénario à court-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux	78
Figure 45 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil de l'Étang-Salé pour le scénario à long-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux	79
Figure 46 – Houles australes de référence : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil de l'Étang-Salé pour les scénarios à court-terme et à long-terme pour 30 minutes simulées	80
Figure 47 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil des Avirons pour le scénario à court-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux	81
Figure 48 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil des Avirons pour le scénario à long-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux	82
Figure 49 – Houles australes de référence : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil des Avirons pour les scénarios à court-terme et à long-terme pour 30 minutes simulées	83
Figure 50 - Possibilités de déplacement des personnes en fonction des caractéristiques d'écoulement (source : Guide PPRi ruissellement péri-urbain M.E.D.D.E.)	85
Figure 51 - Exemple de représentation de la notion de continuité du niveau d'aléa submersion marine	87
Figure 52 – Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur les littoraux de l'Étang-Salé et des Avirons	90
Figure 53 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL sur la commune de l'Étang-Salé (Annexe 6)	94
Figure 54 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL sur la commune des Avirons (Annexe 6)	95

Liste des tableaux

Tableau 1 : Événements historiques majeurs survenus à La Réunion	11
Tableau 2 : Précipitations journalières décennales et centennales issues du GEDC, 1992 (en mm)	32
Tableau 3 : Evolution de la population de l'Étang-Salé et des Avirons (source : ©I.N.S.E.E.)	36
Tableau 4 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de l'Étang-Salé (source : www.prim.net - mise à jour 11/06/2014)	42
Tableau 5 - Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune des Avirons (source : www.prim.net - mise à jour 11/06/2014)	42
Tableau 6 : Liste des cyclones notables	43
Tableau 7 - Bilan de l'érosion sur le littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)	47
Tableau 8 - Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte (en jaune les choix opérés pour cette étude)	58
Tableau 9 – Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées	59
Tableau 10 – Calculs de recul du trait de côte (référence 2008 – échéance 2100) par secteurs homogènes sur la commune de l'Étang-Salé	62
Tableau 11– Calculs de recul du trait de côte (référence 2008 – échéance 2100) par secteurs homogènes sur la commune des Avirons	63
Tableau 12 – Valeurs 100Tx ; Lmax et Lr par secteurs homogènes pour la commune de l'Étang-Salé	63
Tableau 13 – Valeurs 100Tx ; Lmax et Lr par secteurs homogènes pour la commune des Avirons	63
Tableau 14– Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude)	68
Tableau 15 – Références altimétriques maritimes pour les sites de Saint-Leu et Saint-Pierre : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et Zéro IGN89 (SHOM, 2011)	71
Tableau 16 - Niveaux marins retenus pour les simulations de submersion	72
Tableau 17 – Caractéristiques des vagues au large orthogonales à la côte utilisées en forçage des profils de l'Étang-Salé et des Avirons (d'après Lecacheux et al., 2012)	74
Tableau 18 – Houles australes de référence : comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour les scénarios à court (gauche) et à long-terme (droite).	77

<i>Tableau 19 – Houles australes de référence : synthèse des résultats obtenus à l'Étang-Salé et aux Avirons</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 20 – Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 21 – Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces non-urbanisés</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 22 - Traduction réglementaire de l'aléa submersion marine dans les espaces urbanisés</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 23 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces non-urbanisés</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 24 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces urbanisés</i>	<i>93</i>

Liste des annexes

Annexe 1 Carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte au 1/10 000ème

Annexe 2 Cartographie de l'aléa recul du trait de côte au 1/5 000ème

Annexe 3 Carte de synthèse des modes de submersions et des données historiques de l'aléa submersion marine au 1/10 000ème

Annexe 4 Cartographie de l'aléa submersion marine au 1/5 000ème

Annexe 5 Cartographie des équipements sensibles (enjeux) au 1/10 000ème

Annexe 6 Cartographie des zonages réglementaires relatifs aux aléas submersion marine et recul du trait de côte au 1/5 000ème

Annexe 7 Bilan de la concertation

Préambule

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

Ce dossier comporte plusieurs documents informatifs et réglementaires :

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

- ✓ les documents réglementaires :
 - la note de présentation, décrivant les territoires de l'Étang-Salé et des Aviron et les phénomènes naturels qui les concernent, ainsi que les règles méthodologiques adoptées ;
 - une cartographie du zonage réglementaire à l'échelle du 1/5 000ème sur l'ensemble des linéaires côtiers communaux (annexe 6) ;
 - le règlement associé au zonage réglementaire.

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

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

Art 1^{er} – 1-3^e alinéa

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

1. Introduction

Les risques naturels (cyclones, submersions, fortes pluies, glissements de terrain) ont marqué l'histoire de La Réunion et la mémoire de nombre de 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.

L'Étang-Salé et les Aviron, communes respectivement peuplées de 13 647 et 11 181 habitants (population recensée par l'INSEE en 2012), sont affectées par des phénomènes d'érosion littorale et de submersion marine, comme en témoignent les cartes de phénomènes historiques (cf. annexes 1 et 3), impactant plus ou moins durement les hommes et les activités.

Dans un contexte de développement de l'urbanisation et d'augmentation inhérente de la vulnérabilité, le nombre et la diversité des phénomènes naturels auxquels sont exposés des enjeux importants sur leurs territoires communaux 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 ») commun aux deux communes de l'Étang-Salé et des Aviron.

1.1. ORGANISATION DE LA GESTION DES RISQUES

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

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

1.2. PREVENTION DES RISQUES NATURELS

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

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

Les communes de l'Étang-Salé et des Avirons sont concernées par cette politique de prévention, en particulier pour le quartier de l'Étang-Salé les Bains qui cumule une dynamique économique et une évolution démographique récente avec des aléas littoraux avérés lié à des épisodes météorologiques de forte intensité. Il y a donc nécessité pour la sécurité de la population de mettre en place des mesures de prévention efficaces.

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

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

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

« Le plan communal de sauvegarde regroupe l'ensemble des documents de compétence communale contribuant à l'information préventive et à la protection de la population. Il détermine, en fonction des risques connus, les mesures immédiates de sauvegarde et de protection des personnes, fixe l'organisation nécessaire à la diffusion de l'alerte et des consignes de sécurité, recense les moyens disponibles et définit la mise en œuvre des mesures d'accompagnement et de soutien de la population. Il peut désigner l'adjoint au maire ou le conseiller municipal chargé des questions de sécurité civile. Il doit être compatible avec les plans d'organisation des secours arrêtés en application des dispositions des articles L.741-1 à L.741-5.

Il est obligatoire dans les communes dotées d'un Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles approuvé ou comprises dans le champ d'application d'un plan particulier d'intervention. Le plan communal de sauvegarde est arrêté par le maire de la commune. [...] La mise en œuvre du plan communal ou intercommunal de sauvegarde relève de chaque maire sur le territoire de sa commune.

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

1.3. PLAN DE PREVENTION DES RISQUES (PPR) NATURELS

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

La démarche de mise en place des Plans de Prévention des Risques naturels littoraux a été relancée par le président de la République lors d'une allocution à la Roche-sur-Yon en mars 2010, suite aux effets destructeurs de la tempête Xynthia en métropole. Cette approche est relativement récente à La Réunion. Le PPRL commun aux deux communes de l'Étang-Salé et des Avirons est un des tous premiers PPR littoraux soumis à la concertation du public à la Réunion.

Sont donc pris en compte dans la présente élaboration du Plan de Prévention des Risques littoraux des communes de l'Étang-Salé et des Avirons les phénomènes de submersion marine et les phénomènes d'érosion côtière.

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 Tempête Clotilda : 9 morts ; dégâts très importants (109 millions de francs sur St Denis)	
Janvier 1989 Cyclone Firinga : 4 morts ; dégâts très importants	
Janvier 1993 Cyclone Colina : 2 morts ; dégâts importants	

Tableau 1 : Evénements historiques majeurs survenus à La Réunion

2. Présentation du PPR

2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DU PPR

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

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

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

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

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

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

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

Objectif général de l'outil PPR

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

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

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

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

2.2. PROCEDURE REGLEMENTAIRE

2.2.1. Secteurs géographiques concernés

La procédure réglementaire est définie par les articles R.562-1 à R.562-11 du code de l'environnement. Le point de départ de la présente procédure d'élaboration du PPR est l'arrêté préfectoral de prescription n° 2015-1085/SG/DRCTCV en date du 25 juin 2015.

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

2.2.2. État des réflexions menées

Le présent projet de Plan de Prévention des Risques Littoraux est élaboré par les services de l'État, 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 :

- 16 avril 2013 : Réunion de présentation aux communes de l'arrondissement préfectoral de Saint-Pierre de la méthode de caractérisation des aléas littoraux ;
- 26 juin 2013 : Réunion de présentation en Mairie de L'Étang-Salé des projets de cartes d'aléas recul du trait de côte et submersion marine et remise des cartographies pour avis ;
- 22 juillet 2013 : Transmission par courrier au Maire des Aviron des projets de cartes d'aléas recul du trait de côte et submersion marine pour avis ;
- **19 mai 2014 : Porter à Connaissance** du Préfet aux Maires des Aviron et de l'Étang-Salé **des cartes d'aléas** pour prise en compte dans la délivrance des actes d'urbanisme ;
- Premier semestre 2015 : Animation par la DEAL Réunion d'un groupe de travail réunissant plusieurs services techniques de collectivités réunionnaises afin d'élaborer les grandes lignes du « règlement-type PPR littoral réunionnais » (trois réunions en mars, avril et mai 2015) ;

– **25 juin 2015 : Arrêté Préfectoral n°2015-1085/SG/DRCTCV** prescrivant un PPR « submersion marine et recul du trait de côte » sur les communes de l'Étang-Salé et des Aviron ;

– 30 octobre 2015 : réunion de présentation du projet de PPR (zonage réglementaire et règlement) aux maires des 2 communes en sous-préfecture de Saint-Pierre.

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

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

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

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

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

Les consultations officielles des différents services se sont déroulées de la manière suivante :

– **De mai 2016 au 10 juillet 2016** : consultations officielles des partenaires associés : conseil municipal, CIVIS, chambre d'agriculture, ONF et DAAF.

Conformément à l'article 4 de l'arrêté préfectoral de prescription, un dossier contenant les documents utiles à la phase de concertation avec le public a été transmis aux services de la commune courant octobre 2015 et tenue à la disposition des administrés par ces derniers. Le dossier a été alimenté au fur et à mesure de la validation des documents par les services de l'État et la collectivité.

Le bilan de la concertation est joint en annexe 7 du PPR littoral. Les amendements formulés dans les avis de délibération des partenaires seront analysés à l'issue de la phase d'enquête publique.

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. 123-6 à R. 123-23, sous réserve des dispositions des deux alinéas qui suivent.

Les avis recueillis en application des trois premiers alinéas de l'article R. 562-7 sont consignés ou annexés aux registres d'enquête dans les conditions prévues par l'article R. 123-17.

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

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

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

L'arrêté préfectoral n°1172/SG/DRCTCV/BCLU du 23 juin 2016 a prescrit l'ouverture, sur les communes des Aviron et de l'Etang-Salé, d'une enquête publique, au titre du code de l'environnement, concernant le projet de Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles relatif aux phénomènes « submersion marine et recul du trait de côte ».

Préalablement au lancement de l'enquête publique, deux réunions publiques d'informations et d'échanges, organisée par l'État, maître d'ouvrage du projet de PPR, se tiennent le **mercredi 2 novembre 2016 en mairie des Aviron** et le **jeudi 3 novembre 2016 en mairie de l'Etang-Salé**, en présence du maître d'ouvrage représenté par la DEAL ainsi que du BRGM. Y sont conviés les représentants de la commune et les commissaire-enquêteurs.

L'enquête publique est prévue du **8 novembre 2016 au 9 décembre 2016 (32 jours consécutifs)**, sous la supervision de **M. ARLES**, commissaire-enquêteur. Les pièces du dossier PPR ainsi qu'un registre d'enquête sont mis à la disposition du public dans les mairies pendant la durée de l'enquête. Le commissaire-enquêteur tiendra notamment **10 permanences** pendant la durée de l'enquête afin de recueillir les observations du public.

2.3. ASSURANCES ET INFRACTIONS AU PPR

2.3.1. Rappel du régime d'assurance en vigueur

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

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

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

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

Champ d'application de la garantie

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

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

Risques couverts

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

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

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

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

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

Biens garantis

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

L'assureur a la possibilité de refuser la couverture des catastrophes naturelles aux propriétaires ou exploitants de biens situés dans une zone couverte par un PPR, s'ils ne se sont pas conformés, dans un délai de cinq ans, aux prescriptions imposées par le plan (des travaux d'aménagement

peuvent être imposés sous réserve de ne pas excéder 10 % de la valeur vénale du bien). Cette possibilité, prévue par l'article L.125.6 du Code des Assurances, ne peut être mise en œuvre que lors de la conclusion initiale ou du renouvellement du contrat. Evidemment, les assureurs pourront également refuser leur garantie à l'égard des biens et des activités installés postérieurement à la publication d'un PPR sur des terrains classés inconstructibles par ce plan. Le Bureau Central de Tarification (B.C.T.) est saisi des contentieux éventuels.

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

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

Etat de catastrophe naturelle

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

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

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

Règlement des sinistres

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

Dispositions pour l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles

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

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

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

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

2.3.2. Infractions au PPR et sanctions

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

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

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

Les dispositions des articles L.460.1, L.480.1, L.480.2, L.480.3, L.480.5 à L.480.9 et L.480.12 et L.480.14 du Code de l'Urbanisme sont également applicables aux infractions visées au premier alinéa du présent article, sous la seule réserve des conditions suivantes :

- 1°) Les infractions sont constatées, en outre, par les fonctionnaires et agents commissionnés à cet effet par l'autorité administrative compétente et assermentés ;*
- 2°) Pour l'application de l'article L.480.5 du code de l'urbanisme, le tribunal statue au vu des observations écrites ou après audition du maire ou du fonctionnaire compétent, même en l'absence d'avis de ces derniers, soit sur la mise en conformité des lieux ou des ouvrages avec les dispositions du plan, soit sur leur rétablissement dans l'état antérieur ;*
- 3°) Le droit de visite prévu à l'article L.460.1 du Code de l'Urbanisme est ouvert aux représentants de l'autorité administrative compétente. »*

2.4. EXPROPRIATION ET MESURE DE SAUVEGARDE

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

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

2.5. RESPONSABILITES

2.5.1. Etablissement du PPR

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

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

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

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

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

II. — Le plan de Prévention des Risques naturels prévisibles peut également être modifié. La procédure de modification est utilisée à condition que la modification envisagée ne porte pas atteinte à l'économie générale du plan. Le dernier alinéa de l'article L. 562-3 n'est pas applicable à la modification. Au lieu et place de l'enquête publique, le projet de modification et l'exposé de ses motifs sont portés à la connaissance du public en vue de permettre à ce dernier de formuler des observations pendant le délai d'un mois précédant l'approbation par le préfet de la modification. »

2.5.2. Autorisation d'occuper le sol

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

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

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

3. Présentation des communes

3.1. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1. Situation géographique

Les communes de l'Étang-Salé et des Aviron se situent dans l'Ouest de l'île de La Réunion, sur les pentes externes et la bordure littorale du massif volcanique ancien du Piton des Neiges, entre les communes de Saint-Leu au Nord-ouest et Saint-Louis au Sud-est. L'Étang-Salé, plus au Sud, s'étend sur une superficie de 38,56 km², soit un peu plus de 1,5 % de la surface totale de l'île de La Réunion. La commune des Aviron a une superficie de 26,27 km² soit 1,05% de la Réunion. Leurs littoraux sont respectivement longs de 10 767 et 869 m. **La faible longueur de linéaire côtier des Aviron justifie le fait de traiter les deux communes conjointement dans le cadre du présent PPR littoral.**



Figure 1 : Délimitation des territoires communaux de l'Étang-Salé et des Aviron (Fond ©IGN scan100®-2010)

Avec 13 647 habitants recensés en 2012 et une densité de 359 habitants par km², la ville de l'Étang-Salé a une augmentation de sa population de l'ordre de 0.4 % entre 2006 et 2011.

Le territoire de l'Étang-Salé s'étend selon un axe Nord-Sud, entre le littoral et la zone des Makes en cœur du Parc National à l'extrémité septentrionale, et de la forêt du Tévelave, de la ravine Sèche et de la forêt départementale de l'Étang-salé à l'Ouest jusqu'à la ravine du Maniron à l'Est. Il s'étend sur 12 km jusqu'au lieu-dit du Petit Détour culminant à 1 796 m d'altitude.

Sa façade marine s'étend de la Pointe des Avirons jusqu'à l'embouchure de la ravine du Gol.

La commune des Avirons a une croissance démographique plus importante, de l'ordre de 330 habitants par an entre 2006 et 2012, passant sur cette période de 9 180 à 11 181 habitants.

Elle s'étend de la pointe des Avirons sur le littoral (seule façade littorale de la commune), jusqu'au Petit Bénare à près de 2 600 m d'altitude, en haut du rempart Ouest de Cilaos. Il s'agit d'une commune très allongée, s'étalant sur près de 15 km du Nord au Sud contre environ 3 km de largeur d'Est en Ouest. Les trois zones les plus densément peuplées de la commune sont le centre-ville des Avirons et les lieux-dits de la Ravine Sèche et du Tévelave.

Les deux communes font parties de la Communauté Intercommunale des Villes Solidaires (CIVIS).

3.1.2. Contexte géologique

L'Étang-Salé et les Avirons se situent sur le flanc Sud-ouest du massif du Piton des Neiges dont l'édification a commencé il y a plus de 2,2 millions d'années. Elle s'est poursuivie jusqu'à une période très récente, estimée entre 31 000 et 12 000 ans (Gillot and Nativel, 1982¹; Kluska, 1997²).

Cette édification du Piton des Neiges s'est faite en plusieurs phases d'activité volcanique, regroupées classiquement en 4 phases (G. Billard, 1974). Les phases anciennes 1 et 2 correspondent à la Série des Océanites et les phases 3 et 4 à la Série des laves différenciées.

La planèze de l'Étang-Salé est formée de coulées de lave émises depuis le Piton des Neiges mais également à partir de coulées qui se sont épanchées depuis des cratères adventifs de basse altitude. Ces derniers ont donné naissance aux cônes stromboliens de la forêt de l'Étang-Salé et des Avirons. Toutes ces coulées se sont épanchées vers la mer.

¹ 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.

² 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.

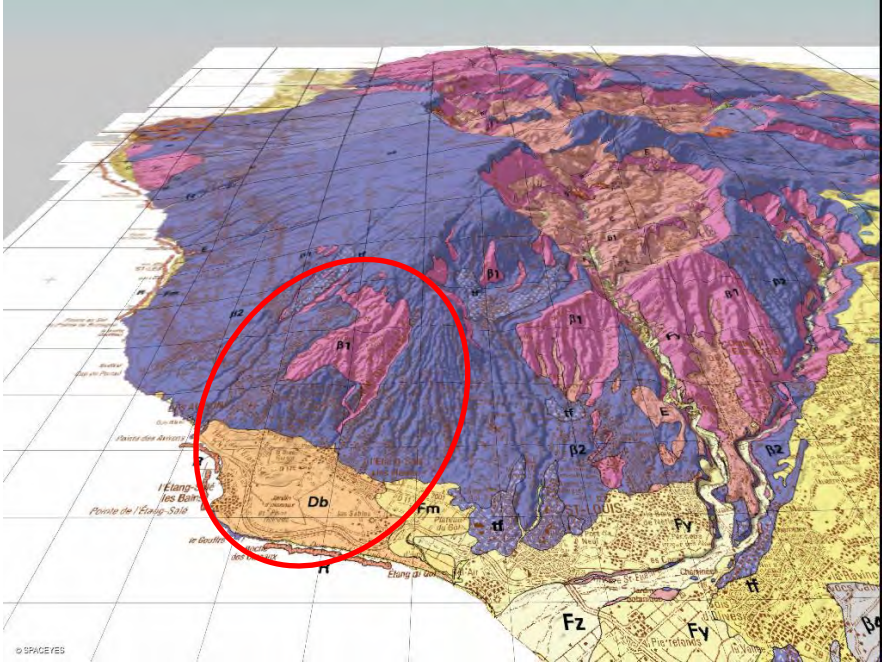


Figure 2 : Perspective géologique de La Réunion (Billard, 1974)

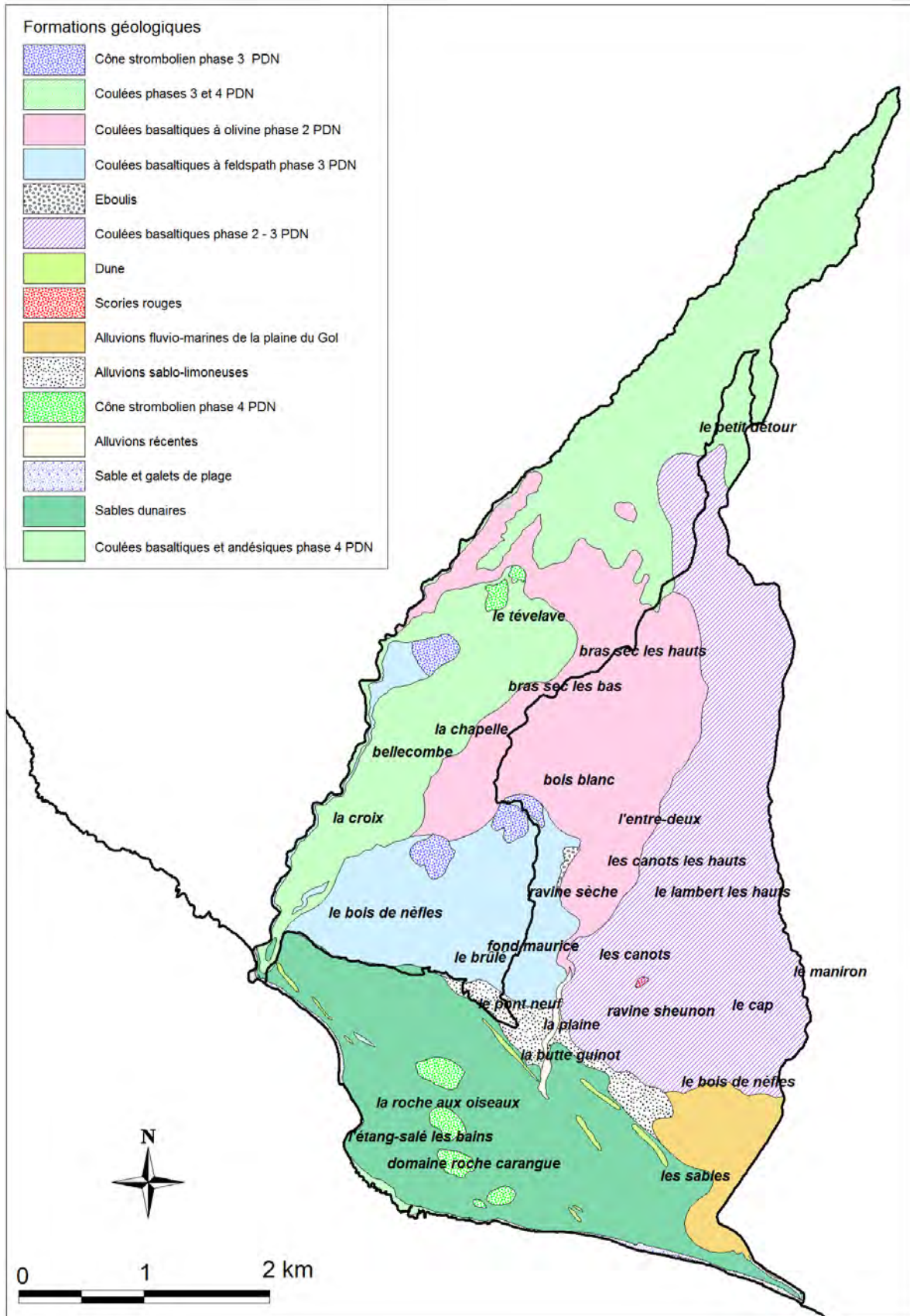


Figure 3 : Illustration de la carte géologique au 1/50 000 (Billard 1974 modifié) à l'échelle des communes de L'Étang-Salé et des Aviron

Comme le montre la Figure 3, les littoraux rocheux du secteur d'étude sont formés par des coulées récentes de la phase 4 du Piton des Neiges. Il s'agit de coulées basaltiques et andésitiques que l'on retrouve à la Pointe des Aviron et au Sud de Bassin-Pirogue. Aux Aviron, l'origine de cette coulée est identifiée au Tévelave, vers 100 m d'altitude. A l'Étang-Salé en revanche, il s'agit de formations liées aux cônes adventifs stromboliens de basse altitude situées dans l'actuelle forêt domaniale et dont les coulées ont été partiellement recouvertes de sables marins.

Les autres formations géologiques rencontrées sur les littoraux de l'Étang-Salé et des Aviron ont une origine détritique. On identifie notamment :

- **Des sables dunaires**

Les sables dunaires recouvrent une surface de plus de 12 km², depuis la ravine des Aviron à l'Ouest jusqu'au lieu-dit les Sables à l'Est, où est implantée une zone industrielle.

Les sables remontent à plus de 100 m d'altitude. Ils ont envoyé les pitons de scories de la forêt de l'Étang-Salé, les coulées basaltiques littorales et le pied de planèze.

Les dépôts s'organisent en dunes qui se prolongent jusqu'à la zone industrielle des Sables.

De nombreuses dunes ont été arasées du fait de leur utilisation prisée dans les enduits traditionnels.

Riches en olivine (40% en moyenne) et en minéraux ferromagnésiens, les sables dunaires sont très fins, avec une granulométrie fine et serrée, inférieure à 1 mm.

Les sables dunaires meubles, à cohésion nulle, reposent sur des sables lités, indurés ayant l'aspect de grès très friables. Ces séquences sableuses peuvent être observées sur la côte et dans les talus excavés de la zone industrielle des Sables.

- **Des alluvions limoneuses**

Ces dépôts sont localisés dans la dépression de la ravine Sèche qui rejoint la plaine du Gol, entre le pied de la planèze et le relief dunaire de la Butte Guinot - ZI des Sables.

Les alluvions sont riches en sables. Ces sables alternent avec des alluvions gravelo-limoneuses provenant de l'érosion des sols de la planèze amont.

Les séquences observées dans les sondages montrent une alternance régulière de sables propres avec des couches de sables indurés plus ou moins argileux.

- **Les alluvions fluviomarines de la plaine du Gol**

Les alluvions de la Plaine du Gol renferment des alluvions fluviales gravelo-limoneuses, des horizons argilo-limoneux et des sables indurés marins.

Elles sont en continuité et imbriquées avec celles de la dépression de la ravine Sèche.

- **Les sables et galets de plage**

Ces dépôts apparaissent de part et d'autre de la côte rocheuse, vers la plaine du Gol à l'Est, et entre l'Étang-Salé les Bains et la pointe des Aviron à l'Ouest. On les retrouve également au Nord de la pointe.

3.1.3. Contexte géomorphologique littoral

Généralités

La morphologie globale des deux communes correspond à celle d'une planèze où l'altitude augmente régulièrement du Sud vers le Nord. Trois entités géomorphologiques principales peuvent être distinguées :

- une plaine littorale au Sud, située globalement en aval de la D11, bordée par des côtes sableuses ou rocheuses ;
- la plaine du Gol, située dans la partie Sud-Est de la commune de l'Étang-Salé, qui constitue le secteur de plus faibles pentes de la commune avec des valeurs comprises entre 3 et 5° ;
- de 100 à 1 800 m, les pentes augmentent progressivement et de manière relativement constante avec une moyenne de 15 à 20° environ ponctuées par l'incision des ravines dont les encaissements peuvent être subverticaux.

La plaine littorale est occupée par la forêt de l'Étang-Salé, aride et sèche, et par les villages de l'Étang-Salé les Bains sur la côte et les habitations de la Pointe des Avirons. Elle est parsemée de dunes et de pitons de scories parfois masqués par ces sables dunaires. Autrefois inhospitalière en raison des vents de sables violents, elle fut boisée dans les années 1870 lors de la construction du chemin de fer. Vers l'Est, la forêt borde la plaine littorale cultivée du Gol.

La planèze est incisée par un réseau de ravines parallèles. Une majorité de ces ravines incisent les flancs du massif du Piton des Neiges de manière considérable. Ces ravines contribuent par ailleurs en période d'écoulement aux apports terrigènes (alluvions/colluvions) qui vont être remobilisés tout le long du littoral. Les principales ravines présentes sur le territoire des deux communes et se jetant en mer, sont d'Ouest en Est :

- la ravine des Avirons ;
- la ravine du Ruisseau ;
- la ravine Mulla ;
- la ravine Sèche ;
- la ravine du Maniron.



Figure 4 - Réseau hydrographique des bas des Aviron et de l'Étang-Salé

Le secteur de la forêt départemento-domaniale est contourné par le réseau hydrographique, la géologie et la pédologie locales (sables dunaires) ne permettant pas d'écoulement de surface, mais favorisant au contraire l'infiltration des eaux pluviales. Les apports terrigènes sont donc inexistant sur cette portion de littoral.

Faciès littoraux et dynamiques sédimentaires

Le littoral de l'Étang-Salé et des Aviron est complexe de par les dynamiques et les faciès que l'on rencontre. Ce littoral est découpé en plusieurs secteurs distincts de l'Est vers l'Ouest (sens de la dérive littorale) :

- Une plage à granulométrie variable (mélange de galets et sable noir basaltique) de l'exutoire de l'Étang de Gol à l'extrémité Est de la forêt départemento-domaniale de l'Étang-Salé (4 762 m) ;
- Une côte rocheuse basse de la forêt domaniale à la Pointe de l'Étang-Salé (3 446 m) ;
- La zone récifale de Bassin-Pirogue de la Pointe de l'Étang-Salé à la Pointe aux Sables (746 m) ;
- Une plage de sable noir de la Pointe aux Sables à l'exutoire de la ravine du Ruisseau (1 980 m).
- Sur le territoire des Aviron, deux plages mixtes encadrant la pointe rocheuse basse des Aviron (869 m).

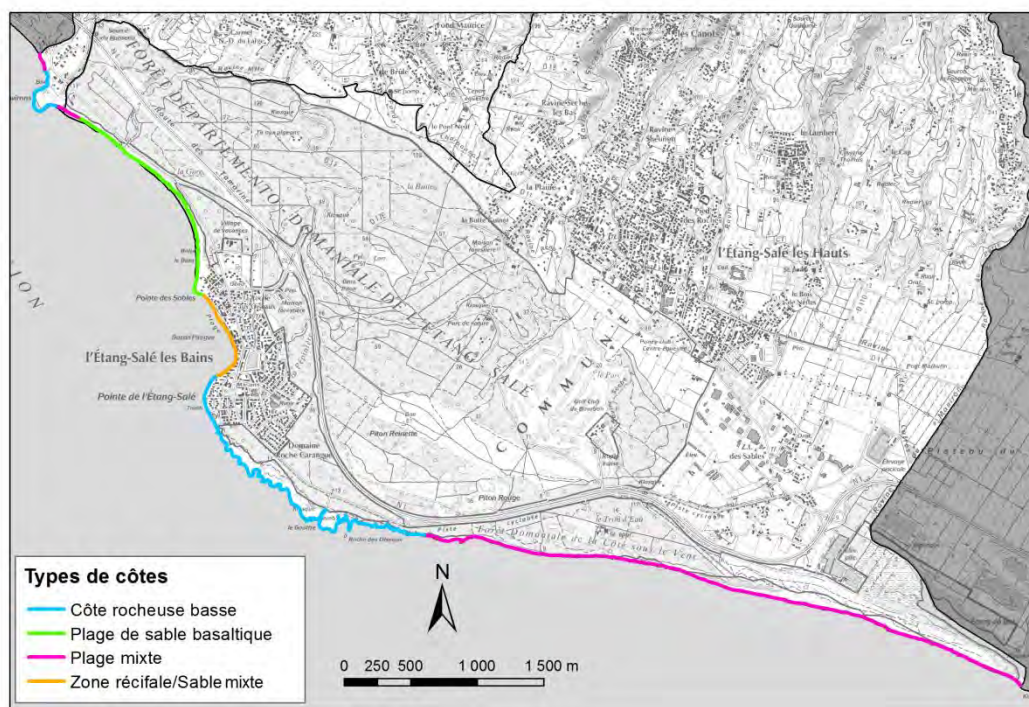


Figure 5 - Types de côtes sur le littoral de l'Étang-Salé

Le littoral de l'Étang-Salé est principalement approvisionné en sédiments par l'exutoire de la rivière Saint-Etienne situé au Sud-est, entre les communes de Saint-Louis et de Saint-Pierre. La fraction sableuse y est principalement d'origine basaltique, bien qu'une faible fraction coralligène soit présente à l'intérieur du Bassin Pirogue, du fait de la présence du secteur récifal frangeant.

Par ailleurs, on observe qu'un tri granulométrique s'opère de l'Est vers l'Ouest avec des éléments plus grossiers à l'Est de la commune suivant le sens de la dérive littorale. Il s'agit ici de blocs et de galets charriés par la rivière Saint-Etienne. Les éléments les plus fins sont de fait transportés plus loin, en passant par les petits fonds (0 à 20 m de profondeur) et contournent Bassin Pirogue le long de la barrière récifale avant de venir alimenter le secteur de la pointe des Sables, en aval-dérive. Cette pointe, située au nord du lagon, est caractéristique de la diffraction des courants sur l'extrémité de la barrière récifale. La barrière est ainsi contournée par les courants de Sud-ouest, tournant au Sud-est en se rabattant sur la pointe et l'approvisionnant en sédiments.

Le fonctionnement géomorphologique du littoral des Aviron est conditionné par les apports terrigènes en provenance des ravines des Aviron et du Ruisseau, mais surtout par une dérive sédimentaire littorale en provenance du Sud et alimentée par les apports de la rivière Saint Etienne. La pointe rocheuse des Aviron joue un rôle important dans la dynamique locale, en interceptant une partie de la dérive littorale qui vient s'accumuler sur la partie Sud du cap. On y constate ainsi une dynamique différentielle Nord/Sud, avec un blocage du transit au Sud de la pointe, engendrant un déficit sédimentaire au Nord.

Parallèlement, les apports des deux ravines justifient une granulométrie plus grossière au niveau des exutoires, et donc la présence de plage mixtes (sable et galets) de part et d'autre de la pointe des Aviron. Des formations dunaires sont également présentes en arrière de la pointe. Elles sont fixées par de la végétation (notamment de la patate à Durand) et s'étendent jusqu'à près de 6 m NGR.

3.1.4. Contexte climatique

Vent

A La Réunion, les vents dominants proviennent du secteur Est-Sud-Est (alizés), avec toutefois des variations saisonnières et localisées selon les facteurs orographiques et thermiques. Situées à l'Ouest de l'île, les communes de l'Étang-Salé et des Avirons sont protégées par les hauts reliefs de l'île et se retrouvent « sous le vent » de l'alizé. Ce territoire est donc davantage affecté par des brises nocturnes (vent soufflant de la terre vers la mer) de secteur Nord et des brises diurnes (vent soufflant de la mer vers la terre) de secteur Sud-ouest. 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 3 h (500 mm) à 12 jours (6 000 mm).

Situés sur la côte « sous le vent », les communes de l'Étang-Salé et des Avirons affichent des valeurs de pluviométrie bien moindres que les territoires de la côte « au vent ». Les précipitations moyennes annuelles dans le secteur ne dépassent pas 2 000 mm en altitude (Atlas climatique de la Réunion, Météo France 2010, cf. Figure 6).

Météo France Réunion a réalisé une carte de zonage pluviométrique en 2010, tenant compte du relief (cf. Figure 7), qui qualifie les secteurs soumis à un régime pluviométrique équivalent. Les communes de l'Étang-Salé et des Avirons sont concernées par les régions 1 et 2 :

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

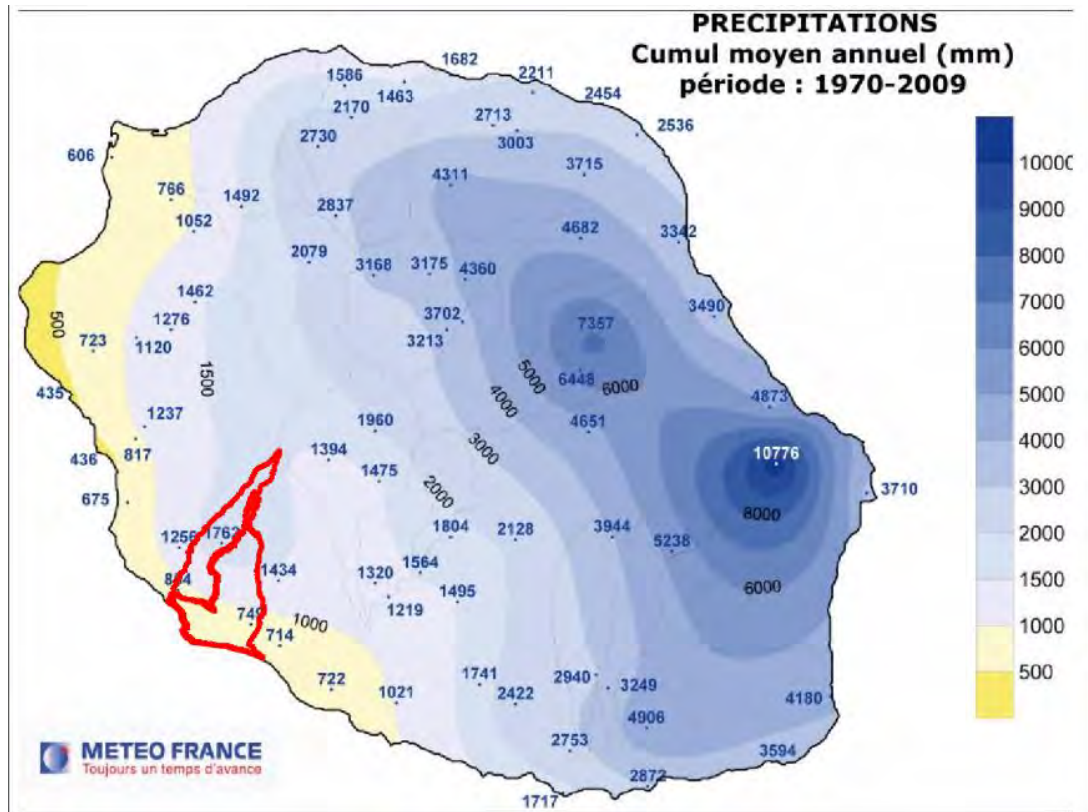


Figure 6 : Précipitations moyennes annuelles sur la période 1970-2009 (source : ©Météo France)

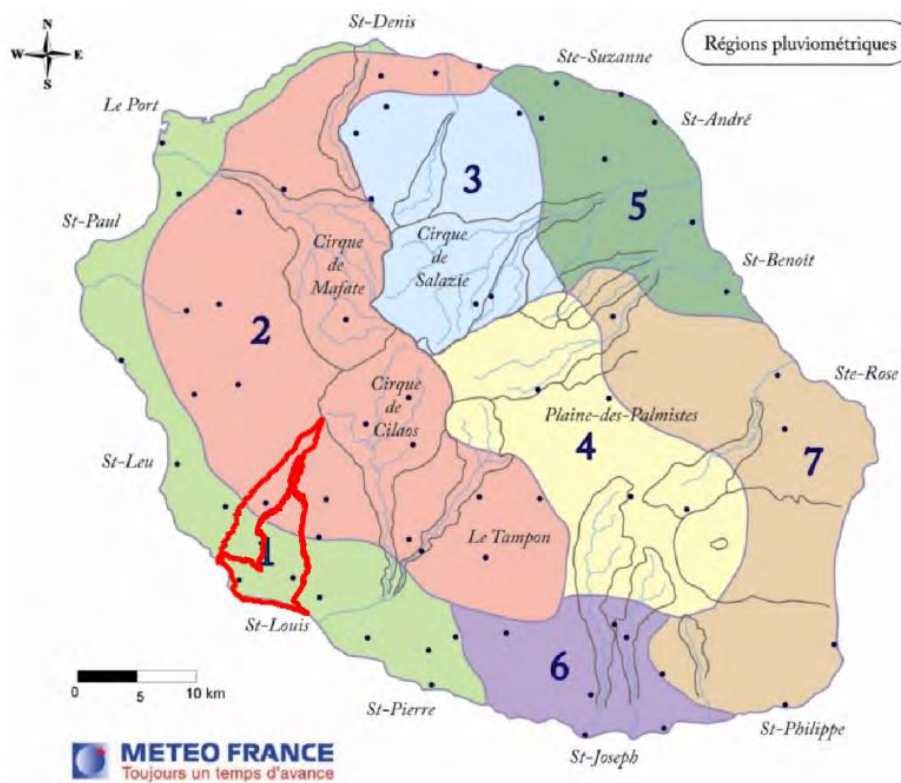


Figure 7 : Régions pluviométriques déterminées par ©Météo-France Réunion (2010)

Concernant les stations météorologiques, une station est installée et suivie sur le territoire communal de l'Étang-Salé et deux autres stations sont situées sur la commune des Avirons.

Ainsi, les données pluviométriques suivies par Météo France permettent de caractériser la pluviométrie sur les territoires communaux (cf. Figure 8). Il s'agit des stations météorologiques suivantes :

- **Pont Mathurin** (commune de l'Étang Salé, altitude 30 m, installée le 07.11.1990) ;
- **Les Avirons** (commune des Avirons, altitude 250 m, installée en 1952) ;
- **Le Tévelave** (commune des Avirons, altitude 920 m, installée en 1953).



Figure 8 : Localisation des stations météo à proximité de l'Étang-Salé (©IGN Scan100® - 2010)

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

Les valeurs caractéristiques pour les stations de l'Étang-Salé et des Avirons sont les suivantes :

Nom station	Altitude	Pluie Journalière Décennale (PJ ₁₀ en mm)	Pluie Journalière Centennale (PJ ₁₀₀ en mm = 1.6* PJ ₁₀)
Pont-Mathurin	20	192	307
Les Avirons	250	213	341
Le Tévelave	920	262	419

Tableau 2 : Précipitations journalières décennales et centennales issues du GEDC, 1992 (en mm)

Les cyclones tropicaux

L'île de La Réunion est soumise à l'importante influence cyclonique affectant le Sud-ouest de l'océan Indien. Chaque année, de novembre à avril, la saison cyclonique apporte son lot de dépressions venant de l'Est. Les trajectoires les plus pénalisantes en termes de houle cyclonique diffèrent selon la façade que l'on considère. Généralement, les cyclones arrivent du Nord-est de l'île avec une trajectoire zonale Est-Ouest puis s'orientent vers le Sud-ouest en passant soit par l'Ouest (tels que Dina et Gamède, cf. Figure 9 et Figure 10), soit par l'Est de La Réunion.

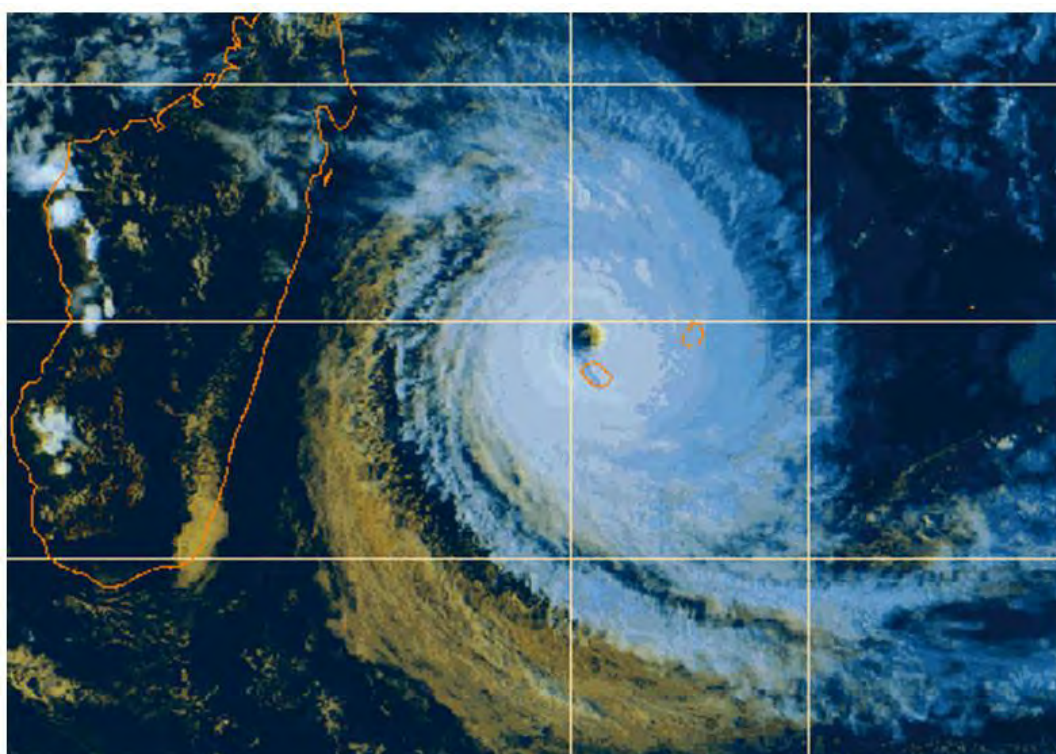


Figure 9 - Le cyclone Dina passant au plus près de La Réunion (21 janvier 2002, Météo-France)
L'œil est passé à peine à 30km des côtes, ce qui correspond au rayon de vent maximum (Rm). La vitesse maximale (Vmax) a dépassée largement les 200km/h et les vagues ont atteint les 15m par endroit.

Lors de la saison cyclonique, l'île vit au rythme des cyclones et des alertes qui lui sont associées. Bien qu'une solide politique publique de prévention soit en place sur l'île, le caractère imprévisible de la trajectoire des cyclones peut rendre difficile la gestion des risques. A La Réunion, le dernier cyclone à avoir fortement impacté le littoral réunionnais reste Gamède (février 2007), et ce en contournant La Réunion par le Nord-ouest. La difficulté de prévision de sa trajectoire s'est par

ailleurs fait ressentir. Après être passé au Nord de l'île, ce dernier est en effet resté stationnaire plusieurs jours avant de se rapprocher de nouveau de l'île, générant de fortes précipitations, un important vent d'ouest et une houle destructrice en continu sur les façades Nord et Ouest.



Figure 10 - Trajectoire du cyclone tropical Gamède de 2007 (Météo-France, 2008)

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

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

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

Depuis, un système d'alerte cyclonique et des normes de construction anticycloniques ont été mis en place. Cependant, bien que les constructions soient de plus en plus solides, il n'existe aucune obligation de respecter ces règles en dehors du domaine des constructions recevant du public. Les effets de cette consolidation progressive du parc immobilier réunionnais se fait malgré tout

ressentir ces dernières décennies, bien que des cyclones tels que Clotilda (1987), Firinga (1989), Dina (2002), Gamède (2007), ou Bėjisa (2014) aient engendré des dégâts considérables sur les biens et les personnes.

Les houles australes

Les communes de l'Étang-Salé et des Avirons ne sont pas seulement soumises à l'influence cyclonique estivale, et sont également concernées par les risques hivernaux et la survenue des grandes houles australes.

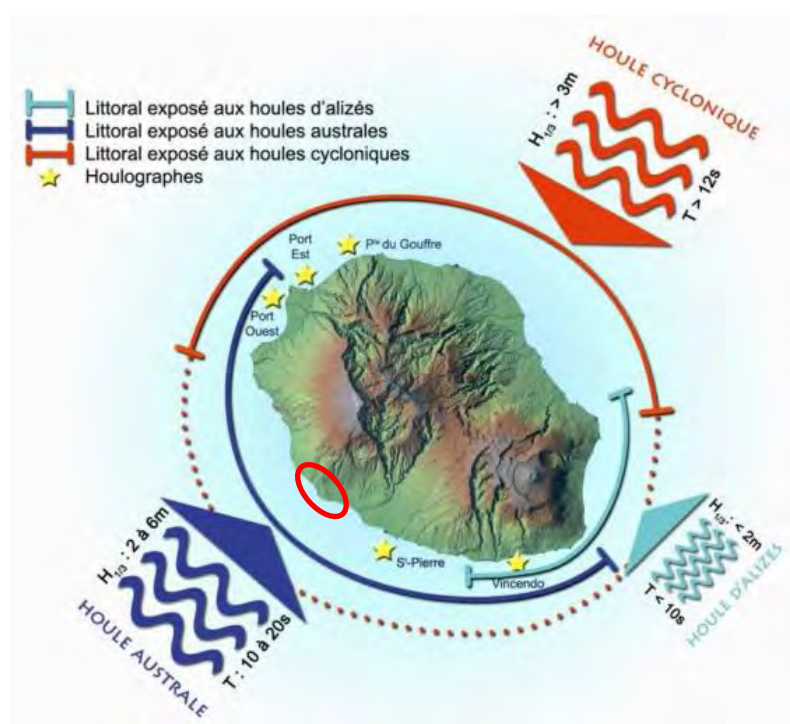


Figure 11 - Les différents régimes de houle à La Réunion (Météo France, 2009).

Les houles australes, de périodes relativement longues (périodes comprises entre 10 et 20 secondes), présentent des hauteurs moyennes de l'ordre de 3 à 4 m et affectent principalement les communes du Sud et de l'Ouest de l'île. Elles proviennent de tempêtes formées à 3 000 km au large, dans la zone tempérée de l'hémisphère Sud (plus précisément entre les 40^e et 50^e parallèles) et atteignent les rivages réunionnais 15 à 25 jours par an. Par leur énergie, ces houles sont particulièrement érosives et peuvent également être à l'origine d'importantes submersions (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Les réunionnais gardent en mémoire les houles australes du 12 mai 2007, atteignant une valeur maximale de 11,3 mètres (6,4 m de hauteur significative³) à 19h selon les données du houlographe de Saint Pierre.

De par leur orientation au Sud-ouest, les littoraux de l'Étang-Salé et des Avirons sont systématiquement soumis aux houles australes qui parviennent jusqu'à La Réunion.

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

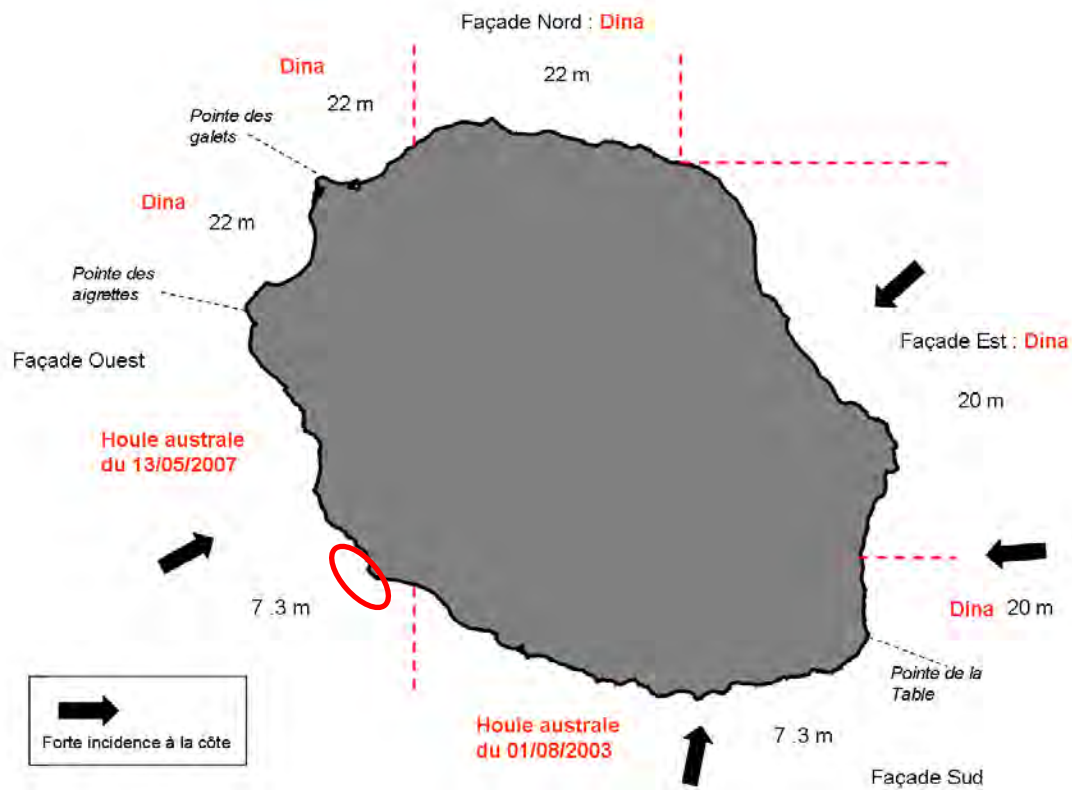
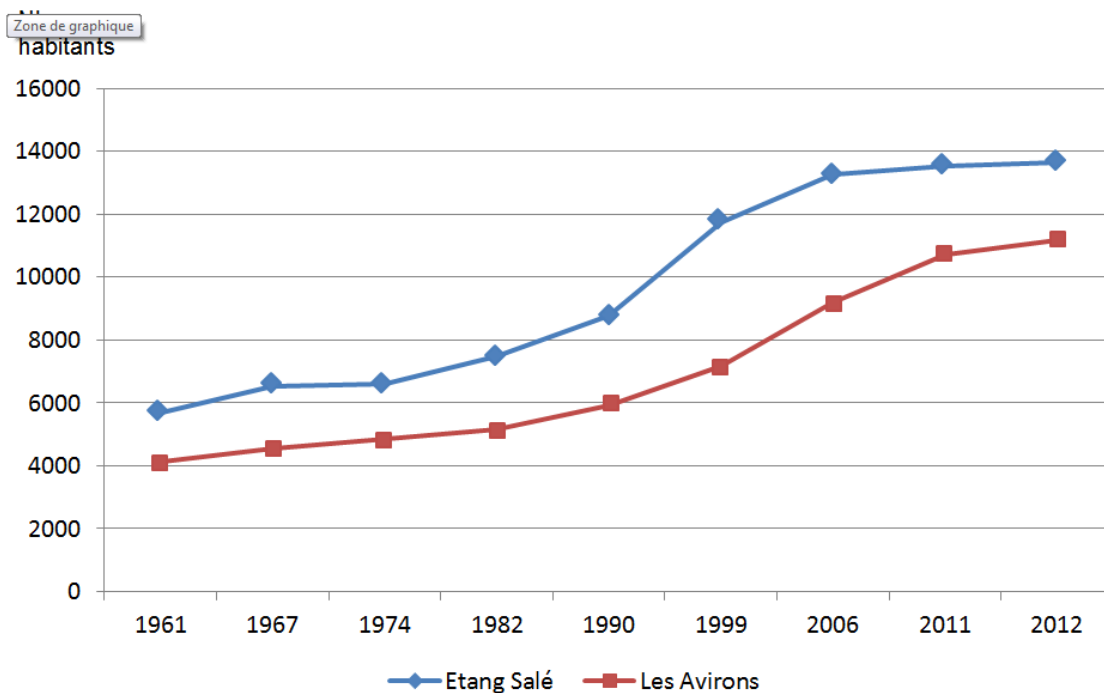


Figure 12 - Houles de références à La Réunion et caractéristiques au large (Pedreros et al., 2009). Littoral des Aviron et Etang Salé cerclé de rouge.

En 2009, Pedreros et al. ont montré que l'évènement de référence sur ce linéaire côtier est l'évènement historique de houle australe du 13 mai 2007, cet évènement ayant apporté des vagues d'une hauteur significative de 7,3 m.

3.2. ENJEUX ET VULNERABILITE

Les populations respectives des communes de l'Étang-Salé et des Avirons ont connu des évolutions démographiques similaires depuis 1961 avec une régulière augmentation. En 51 ans, l'accroissement démographique s'élève respectivement à 240% et 271%.



		1961	1967	1974	1982	1990	1999	2006	2011	2012
Etang-Salé	Population	5672	6 510	6 610	7 479	8 769	11 755	13 266	13 530	13 647
	Densité moyenne (hab./km ²)	146,8	168,4	171,0	193,5	226,9	304,1	343,2	350,1	353,1
Les Avirons	Population	4118	4 547	4 863	5 150	5 930	7 172	9 180	10 705	11 181
	Densité moyenne (hab./km ²)	156,8	173,1	185,1	196,0	225,7	273,0	349,4	407,5	425,6

Tableau 3 : Evolution de la population de l'Étang-Salé et des Avirons (source : ©I.N.S.E.E.)

La densité démographique lors du recensement de 2012 était de 353,1 hab./km² à l'Étang-Salé et de 425,6 hab./km² aux Avirons contre une moyenne de 326,1 hab./km² sur l'ensemble de l'île de La Réunion.

Le parc de logement s'établissait en 2011 à 5 398 unités (constitué à 91,1 % de résidences principales), soit une augmentation de +360% par rapport au recensement de 1967, illustrant une très forte pression foncière existante sur la commune de l'Étang-Salé.

Cette pression urbaine est particulièrement visible sur le littoral et notamment autour du Bassin-Pirogue (cf. Figure 13). Le quartier de l'Étang-Salé les Bains a ainsi connu une croissance urbaine considérable à partir des années 1960, ce qui a contribué à une fixation du trait de côte par l'intermédiaire d'aménagements multiples (murs, digues, cales d'accès, etc.). Cette forte croissance n'est pas sans poser la question de l'exposition aux risques pour les populations concernées et récemment implantées.



Figure 13 - Evolution de l'urbanisation de l'Étang-Salé les Bains entre 1950 et 2012

Aux Avirons, la dynamique est comparable. A l'échelle de la commune, le nombre de logements est passé de 1 113 en 1967 à 4 418 en 2012, soit une augmentation de près de +400% en 45 ans. Le nombre de résidences principales est quant à lui passé de 85,5 à 91,8% sur le même intervalle de temps. Cet accroissement du parc immobilier se ressent également sur le littoral (cf. Figure 14). Cependant, le linéaire côtier étant moins étendu qu'à l'Étang-Salé, l'urbanisation s'en trouve plus concentrée. De plus, le littoral étant constitué de côtes rocheuses basses, l'urbanisation s'est développée en arrière du trait de côte, ce qui a permis à la fois de :

- limiter l'impact anthropique sur les dynamiques hydro-sédimentaires ;
- limiter l'exposition des biens et personnes aux aléas littoraux

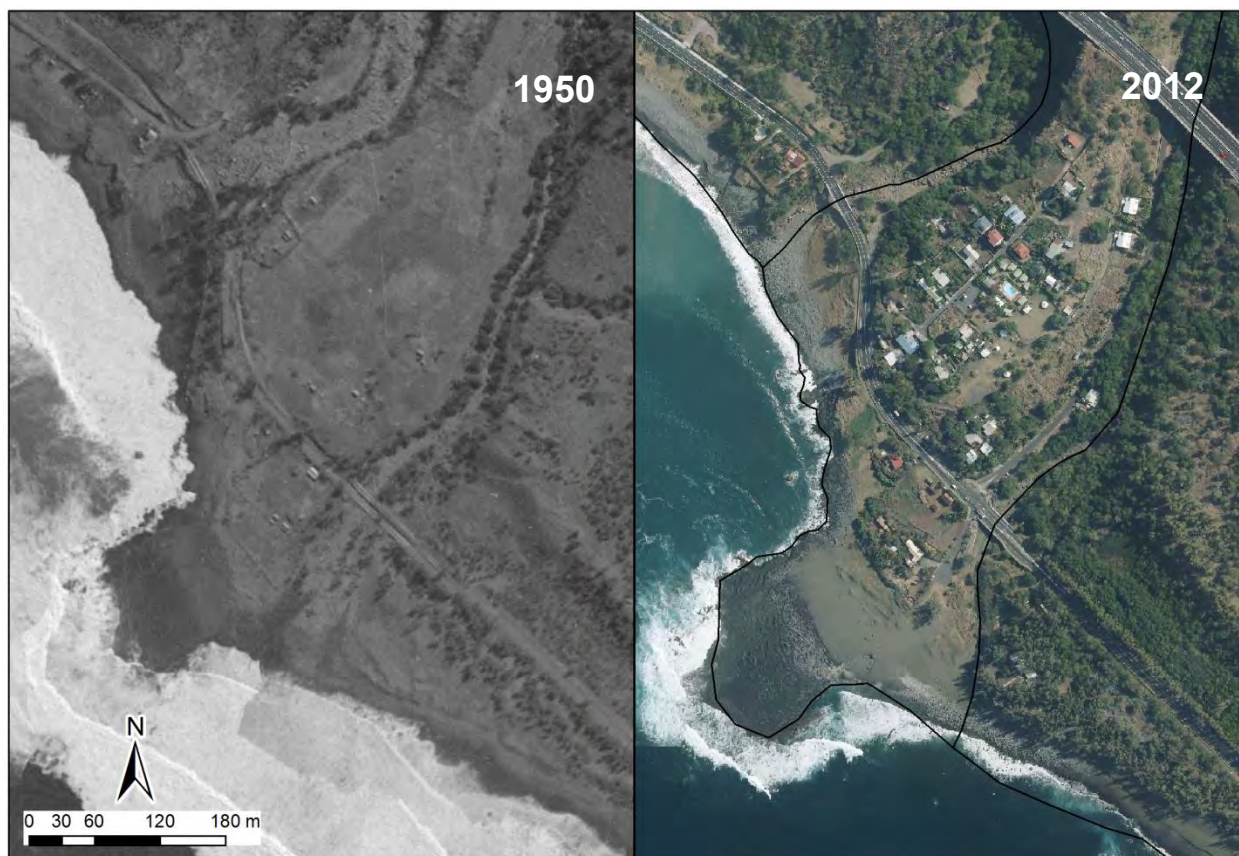


Figure 14 - Evolution de l'urbanisation de la pointe des Aviron entre 1950 et 2012

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

- les services de sécurité et de secours (gendarmerie, caserne de pompiers, poste de secours en mer, etc.) ;
- les espaces collectifs (parcs, aires de jeux, terrains de sport) ;
- les structures de traitement de l'eau potable ;
- les établissements d'enseignement (écoles, collèges, lycées) ;
- les bâtiments administratifs (mairie principale et mairies annexes, poste, impôts, etc.) ;
- les autres établissements recevant du public (lieux de culte, gymnases, golfs, etc.) ;
- les snacks et restaurants ;
- les équipements d'hôtellerie (hôtels, campings, etc.).

Le milieu physique naturel qui couvre le reste du territoire communal représente un enjeu environnemental. Il est notamment caractérisé par la forêt départementalo-domaniale de l'Étang-Salé qui englobe l'intégralité de la zone urbaine de l'Étang-Salé-les-Bains.

Les principaux enjeux, autres que le bâti, sont reportés sur la carte présentée en annexe 5 de ce dossier.

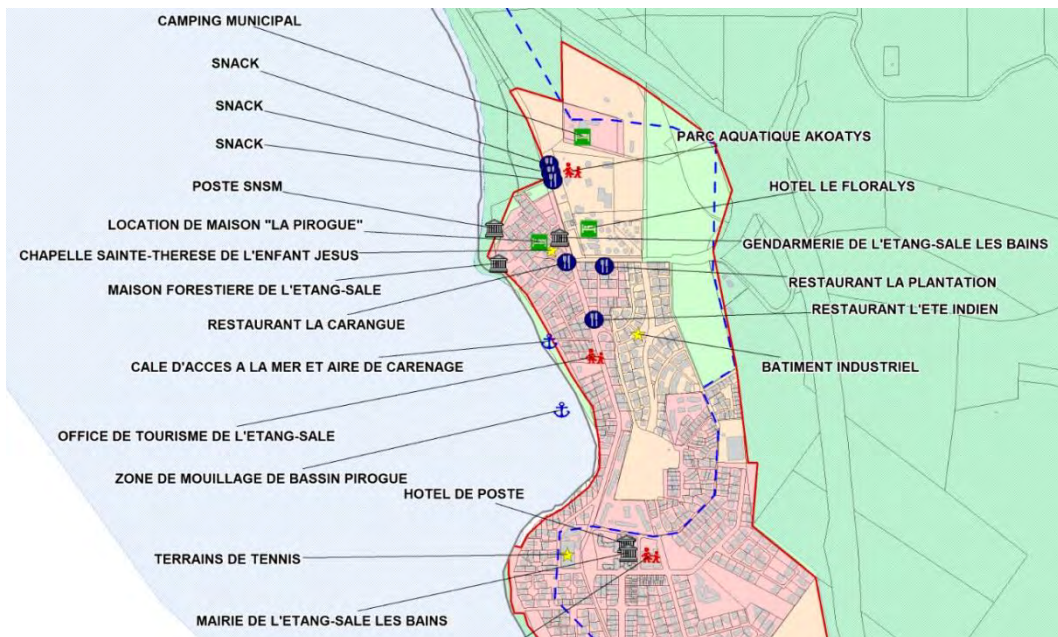


Figure 15 - Extrait de la carte des enjeux de la commune de l'Etang-Salé (cf. Annexe 5)

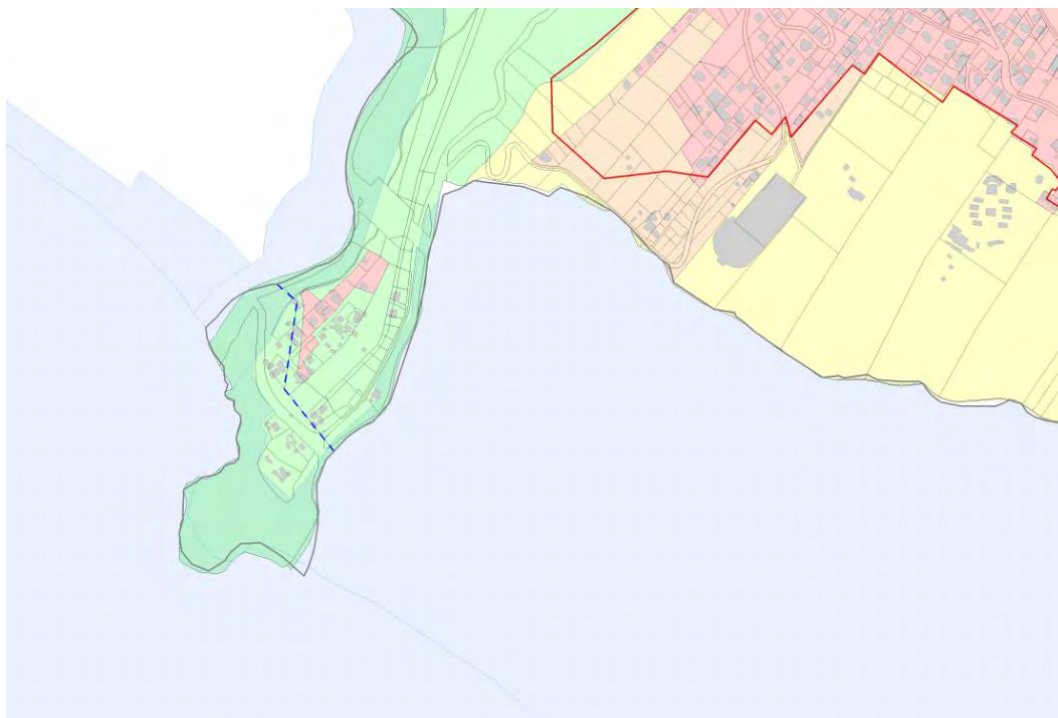


Figure 16 - Extrait de la carte des enjeux de la commune des Aviron (cf. Annexe 5)

4. Historicité et caractérisation des phénomènes naturels

4.1. PHENOMENES HISTORIQUES

L'ensemble des évènements recensés ayant affecté par le passé les territoires communaux de l'Étang-Salé et des Aviron 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 des revues de presse (revue de presse de l'ex DDE : « L'Étang-Salé dans la tourmente » et « Les Aviron dans la tourmente »), d'articles de journaux et d'enquêtes de terrain auprès des habitants réalisés en juillet 2013. Quelques éléments sur les évènements les plus marquants sont donnés ci-après (Rapport BRGM/RP-63149-FR) :

Cyclone de 1948

Submersion des anciens marais salants de l'Étang-Salé.

1980 (cyclone Hyacinthe)

Jardins et habitations partiellement submergés au Sud du Bassin-Pirogue.

Octobre 1981

Forte houle qui submerge la rue Octave Bénard (Étang-Salé) ainsi que de nombreuses habitations de Bassin-Pirogue.

2007 (cyclone Gamède)

Clôtures et murs détruits tout le long du littoral du Bassin-Pirogue avec des affouillements ponctuels, submersion du Sud de l'Étang-Salé les Bains (lame d'eau de 20 à 30 cm par endroit) et quelques habitations traversées par l'eau de mer.

2014 (cyclone Béjisa)

Affouillement de quelques aménagements en font de mer (cales et murets notamment), submersion de la promenade le long du littoral du Bassin-Pirogue.

Rapport BRGM/RP-63149-FR

4.2. ARRETES DE CATASTROPHES NATURELLES

Depuis 1993, 9 arrêtés de catastrophes naturelles ont été recensés sur la commune de l'Étang-Salé, dont 4 sont imputables aux problématiques littorales. Le tableau ci-après en présente la liste :

Type de catastrophe	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	18/01/1993	20/01/1993	18/05/1993	12/06/1993
Inondations et coulées de boue	10/02/1994	12/02/1994	12/04/1994	23/04/1994
Inondations et coulées de boue	22/01/2002	23/01/2002	05/02/2002	08/02/2002
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	24/02/2007	27/02/2007	23/03/2007	28/03/2007
Chocs mécaniques liés à l'action des vagues	12/05/2007	13/05/2007	14/11/2007	16/11/2007
Inondations et coulées de boue	30/01/2011	30/01/2011	30/03/2011	06/04/2011
Inondations et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	01/01/2014	03/01/2014	13/05/2014	18/05/2014
Inondations et coulées de boue	01/01/2014	03/01/2014	17/01/2014	18/01/2014
Mouvements de terrain	01/01/2014	03/01/2014	22/04/2014	26/04/2014

Tableau 4 : Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune de l'Étang-Salé
(source : www.prim.net - mise à jour 11/06/2014)

Sur le territoire communal des Avirons, seul un arrêté de catastrophe naturel est en lien avec les aléas côtiers (cyclone Colina, 1993). Cela traduit bien la moindre vulnérabilité de cette commune aux aléas submersion marine et recul du trait de côte :

Type de catastrophe	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le JO du
Inondations, coulées de boue, glissements et chocs mécaniques liés à l'action des vagues	18/01/1993	20/01/1993	18/05/1993	12/06/1993
Inondations et coulées de boue	10/02/1994	12/02/1994	12/04/1994	23/04/1994
Inondations et coulées de boue	22/01/2002	23/01/2002	05/02/2002	08/02/2002
Inondations et coulées de boue	30/01/2011	30/01/2011	30/03/2011	06/04/2011
Inondations et coulées de boue	17/04/2011	17/04/2011	19/10/2011	23/10/2011
Inondations et coulées de boue	01/01/2014	03/01/2014	17/01/2014	18/01/2014

Tableau 5 - Liste des arrêtés de catastrophes naturelle sur la commune des Avirons
(source : www.prim.net - mise à jour 11/06/2014)

Les ouvrages généraux de Météo-France (Soler, 1997 et Mayoka, 1998), listent les cyclones majeurs ayant concernés La Réunion, et plus ou moins directement les communes de l'Étang-Salé et des Avirons. Ce listing a été reporté et complété au Tableau 6 ci-après.

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 6 : Liste des cyclones notables

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 PPRL⁴, le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. Il est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, érosion naturelle induite par les forçages marins, combinée parfois à des actions continentales, ou d'une érosion générée ou accélérée par l'homme (sur-fréquentation, extraction, aménagements et ouvrages de protection, urbanisation proche du littoral entraînant des ruissellements de surface et la présence de réseaux, etc.).

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

⁴ Guide méthodologique : Plan de Prévention des Risques littoraux, DGPR, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Mai 2014.

est souvent plus complexe à appréhender du fait de la combinaison des actions continentales (infiltration, ruissellement, etc...) en haut de falaise et des actions directes de la mer. L'évolution du trait de côte dépend de plusieurs paramètres :

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

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

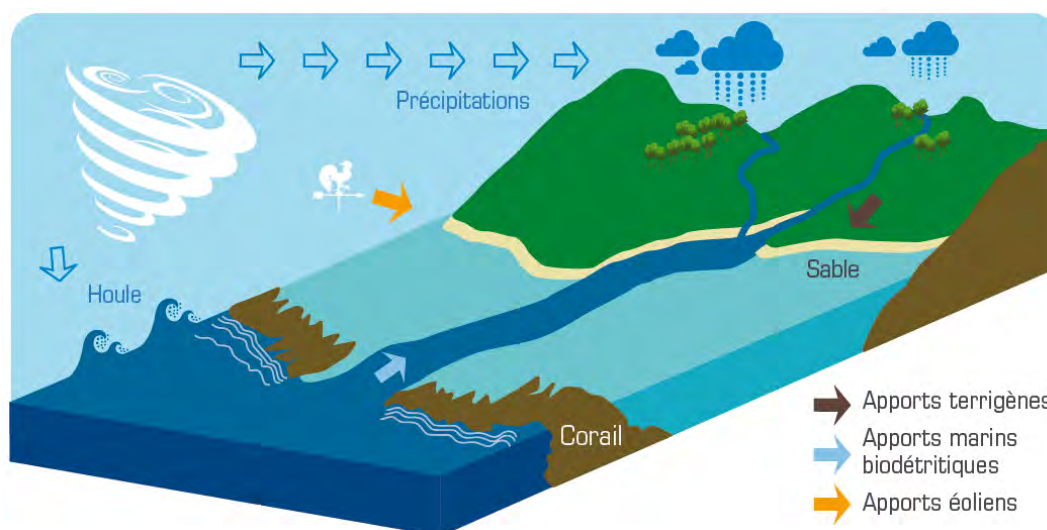


Figure 17 – Fonctionnement naturel du système littoral réunionnais (De La Torre et al, 2012)

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

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

Sur le littoral des communes de L'Étang Salé et des Aviron, la résultante annuelle du transport sédimentaire littoral est orientée vers le Nord.



Figure 18 – Exemple de digue bloquant le transit sédimentaire à Saint-Benoît (De La Torre et al, 2012)

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

L'érosion peut aussi être observée de manière ponctuelle après un événement tempétueux. Le phénomène érosif d'une plage peut être plus ou moins important en fonction des caractéristiques des vagues (hauteur significative, longueur d'onde⁵, 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).

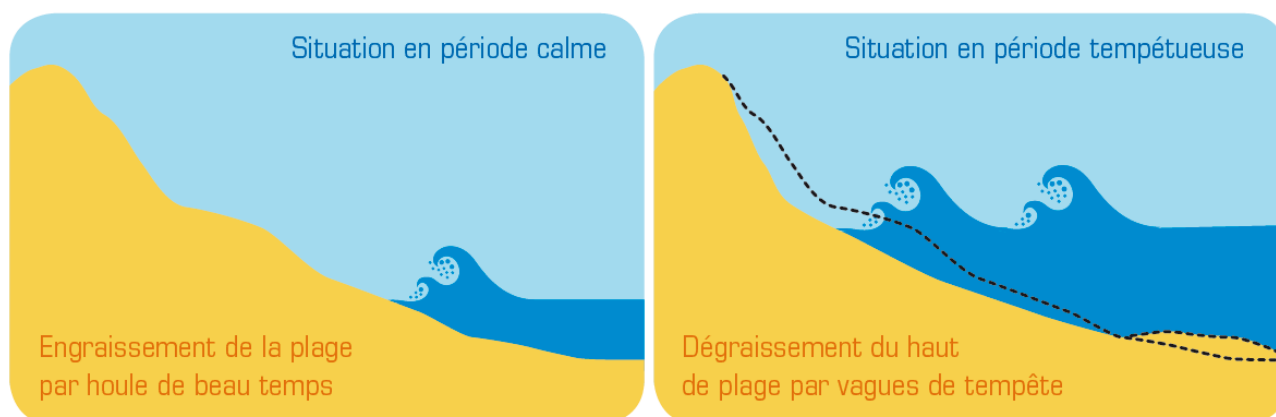


Figure 19 - Variations du profil de plage en fonction du régime de houles (De La Torre et al, 2012)

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

Sur les côtes sédimentaires, on peut constater (cf. Figure 20) :

- La mise à nue racinaire ou l'arrachage de la végétation littorale (filaos, vacoas, patate à Durand, veloutier, etc.) ;

⁵ Distance séparant deux crêtes ou deux creux successifs

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

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

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

Sur les côtes à falaises, les phénomènes rencontrés sont les suivants (cf. Figure 21) :

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

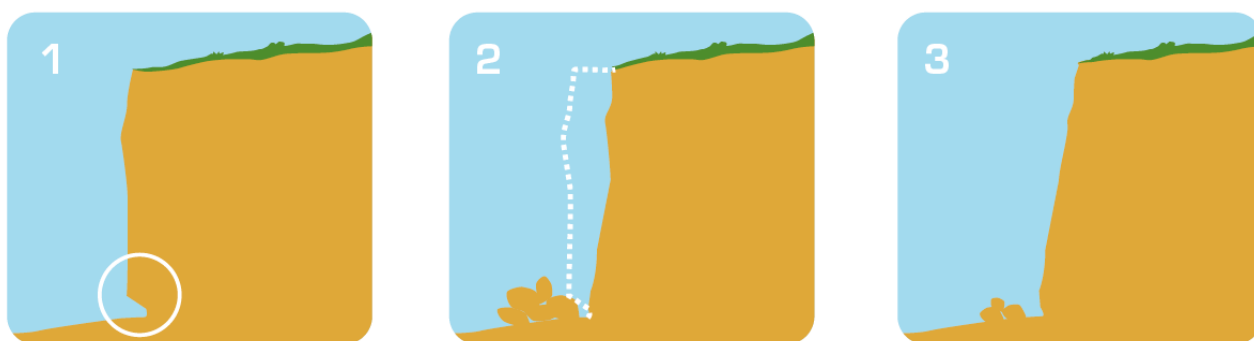


Figure 21 - Recul classique d'une falaise (De La Torre et al, 2012)

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 7).

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

L'aléa RTC sur les communes de l'Étang-Salé et des Aviron

- L'Étang-Salé

La commune de l'Étang-Salé est confrontée aux problématiques de recul du trait de côte sur la quasi-totalité de son linéaire. Cependant, la morphologie littorale définit des rythmes d'évolution assez différenciés. Les secteurs sédimentaires (aux extrémités de la commune) sont en effet soumis à des processus plus rapides que les côtes rocheuses. Les côtes rocheuses de l'Étang-Salé sont par ailleurs constituées de coulées de basalte cohésives (séries différenciées du Piton des Neiges), limitant quelques peu les effets des forçages sur l'évolution du trait de côte.

L'orientation de la côte joue également un rôle non-négligeable dans les vitesses d'évolution. Ainsi, l'Est de la commune, exposée aux houles de Sud, connaît un recul plus important que la côte sableuse au Nord du Bassin-Pirogue. Étant en connexion directe avec les apports en provenance de l'exutoire de la rivière Saint-Etienne située juste à l'Est, il s'agit du secteur le plus mobile de la commune.

L'étude de l'évolution de la position du trait de côte montre cependant qu'aucun tronçon n'est épargné par cette dynamique érosive (cf Annexe 1). L'ensemble de la commune connaît donc un recul plus ou moins important, les processus pouvant s'accélérer lors d'évènements exceptionnels de type houle cyclonique ou houle australe.

Au vu de son exposition, la commune est exposée aux houles australes hivernales. L'impact des houles cycloniques est quant à lui plus complexe à appréhender. Il dépend en effet de la position du cyclone (et donc de l'angle de la houle incidente) par rapport au trait de côte communal. Un cyclone pourra donc tout aussi bien reconstituer les stocks sédimentaires, ou à l'inverse, participer à l'accélération des phénomènes de recul (les deux dynamiques pouvant être rencontrées durant le même épisode).

Cette tendance à l'érosion a tendance à affecter les constructions et ouvrages au niveau du linéaire urbanisé de l'Étang-Salé-les-Bains. On y note un abaissement progressif du profil de plage caractérisé par un sous-cavage régulier sous les murs et autres ouvrages d'accès après les épisodes énergétiques.



Figure 22 - Déchaussement d'un mur de protection et d'un escalier à l'Étang-Salé-les-Bains (De La Torre et al, 2012)

La portion la moins affectée par la dynamique érosive est située au Nord de la commune. Comme décrit précédemment, les sédiments apportés par la dérive littorale Sud/Nord ont une tendance à contourner le récif frangeant pour alimenter le linéaire au Nord de la pointe des Sables. La pointe et les bancs sableux qui lui font face constituent donc un petit stock sédimentaire. La redistribution de ce stock liée au transit général permet un approvisionnement régulier de tout le secteur nord jusqu'à la Pointe des Avirons. On notera cependant un recul léger de ce linéaire depuis 1966, ce qui caractérise bien un appauvrissement des apports en provenance du Sud de la commune.

- Les Avirons

Le recul du trait de côte n'affecte pas la totalité du linéaire côtier des Avirons. On observe une dynamique différentielle entre le Nord et le Sud de la pointe rocheuse. Comme précisé au chapitre 3.1.3, les apports des bassins versants en lien avec les ravines des Avirons et du Ruisseau, ainsi que les apports liés à la dérive sédimentaire en provenance de l'Étang-Salé sont responsables de ce fonctionnement.

On observe une accumulation sédimentaire sur toute la partie Sud de la Pointe des Avirons. Les sédiments en transit depuis le Sud viennent s'accumuler contre ce promontoire naturel, générant un profil d'accrétion. L'orientation de la côte par rapport à l'incidence des houles australes est la raison principale de ces observations, le déferlement différentiel des houles générant un flux sédimentaire dirigé vers le Nord.

Sur le secteur Nord de la commune, on peut constater un profil d'érosion assez marqué. Les matériaux fins situés au sud du cap n'arrivent pas à franchir l'obstacle rocheux. La granulométrie y est donc assez grossière et probablement en partie compensée par des apports de la ravine des Avirons qui contribue à limiter le déficit sédimentaire lié au blocage du transit.



Figure 23 - Dynamique hydro-sédimentaire du littoral des Avirons

4.3.2. Submersion marine

Considérations générales sur l'aléa submersion marine

La submersion marine est l'inondation temporaire de la zone côtière liée à des conditions météorologiques défavorables. Lors du passage d'un cyclone, les vents violents et la chute de la pression atmosphérique contribuent de différentes manières à la submersion (cf. *Figure 24*) en générant :

- Une **surcote atmosphérique** : il s'agit d'une surélévation du niveau moyen de l'eau qui résulte de l'effet combiné de la dépression, qui crée un effet de baromètre inverse (on considère que la surcote augmente de 1 cm par hectopascal de dépression par rapport à la

pression atmosphérique moyenne), et du vent, qui pousse les masses d'eau vers la côte en particulier dans les baies et les zones de haut fond.

- Des **vagues** qui contribuent de deux manières à la submersion :
 - Lors du déferlement, l'apport de masses d'eau au niveau de la côte engendre également une surcote très locale qui contribue à l'élévation du niveau moyen (cette surcote est communément appelée le **wave-setup**);
 - Sous l'impulsion des vagues, une nappe d'eau (appelée **jet-de-rive**) est projetée sur le rivage et peut atteindre des zones plus élevées que le niveau moyen. De plus, si les vagues déferlent au niveau de la côte et des aménagements côtiers (protections ou habitations), la libération de leur énergie peut engendrer des dégâts importants.

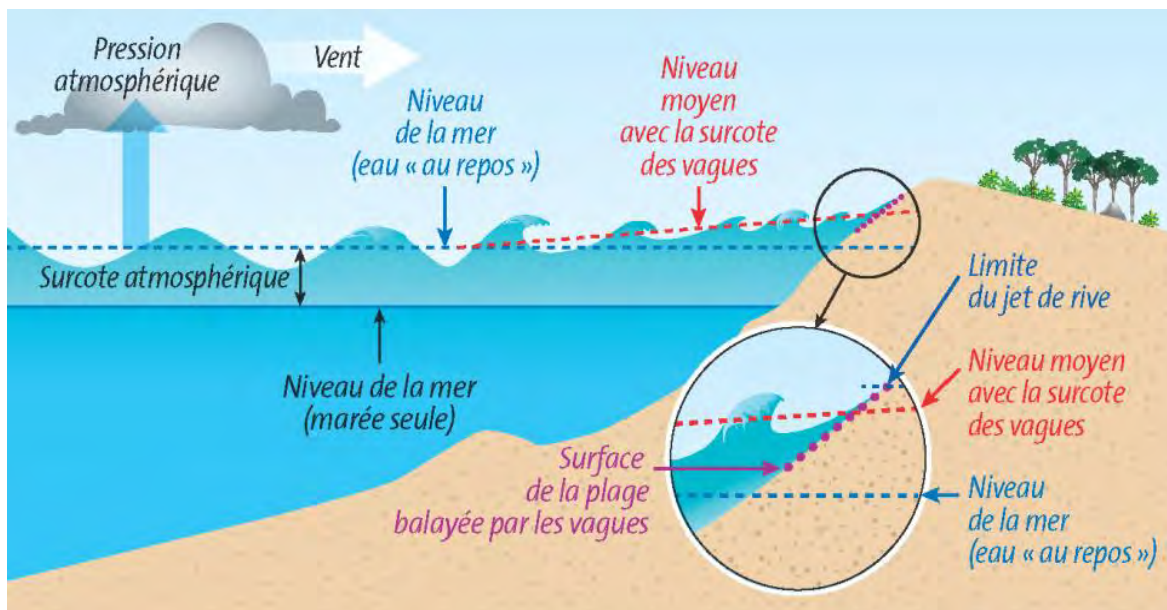


Figure 24 - Représentation des phénomènes qui concourent à la submersion marine (BRGM).

On distingue traditionnellement plusieurs types de submersions marines (cf. Figure 26) :

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

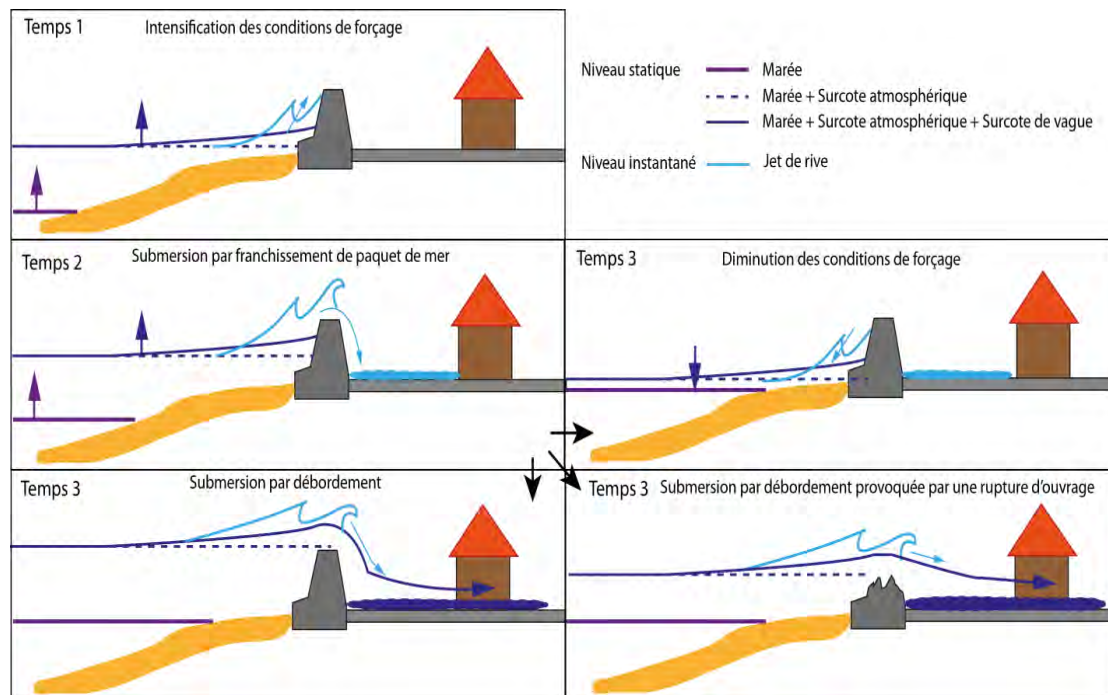


Figure 25. Les différents types de submersion marine (Pedreros R. & Garcin M. 2012)

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

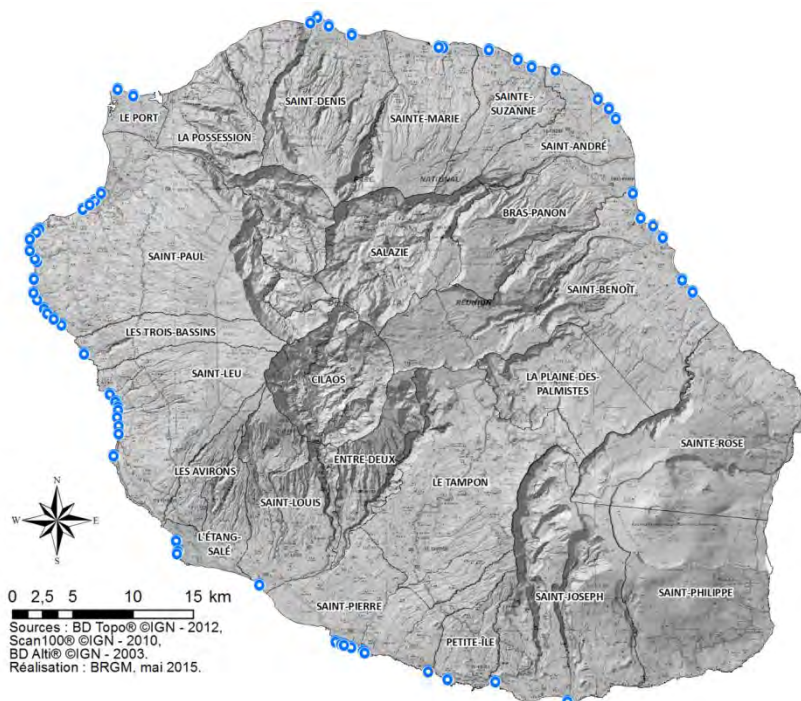


Figure 26 - Sites sensibles à l'action des houles (BRGM, 2015)



Figure 27 - Submersion par paquets de mer suite au cyclone Gamède, Sainte-Suzanne (2007)

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

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 sur les communes de l'Étang-Salé et des Avirons

L'Étang-Salé

Le littoral de l'Étang-Salé a été submergé à plusieurs reprises au cours de son histoire. Le nom même de la commune se rapporte à l'influence marine. Le site de la municipalité explique à ce sujet que *"le village doit son nom au petit étang que la mer formait jadis. Signalé par Flacourt dès 1652, l'étang s'assécha progressivement ; au moment des fortes marées, la mer venait s'y reposer dans un espace assez profond situé derrière l'ancienne gare"*.

Ainsi, le secteur de l'Étang-Salé-les-Bains est situé entre le lagon de Bassin-Pirogue et une dépression arrière littorale caractérisée par ce qui deviendra les anciens marais salants. Cette configuration très défavorable l'expose clairement aux intrusions marines, ce qui ne manquera pas de se produire plusieurs fois ces dernières décennies et à presque chaque événement exceptionnel.



Figure 28 - Plan de mouillage de l'Étang-Salé, mai 1846 (site internet de l'Étang-Salé)

La Figure 28 met par ailleurs en avant un point préférentiel d'entrée des eaux situé au nord de la zone habitée du secteur de la pointe aux Sables, au niveau de l'actuelle forêt domaniale. Cette configuration se vérifie sur le modèle numérique de terrain (SHOM-IGN, 2012) qui permet de distinguer deux zones basses sur le littoral communal (cf. Figure 29).

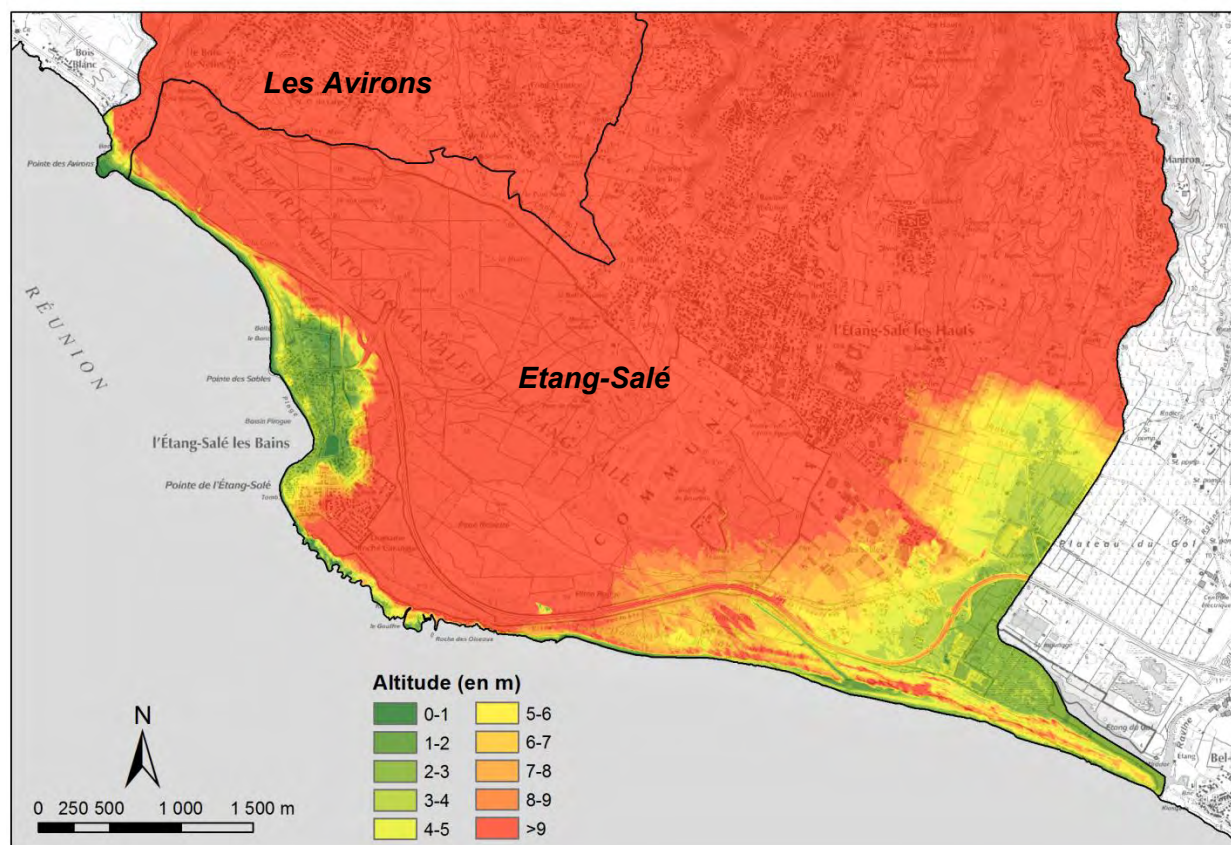


Figure 29 – Altitude des la bande littorale (m NGR) - Source Litto3D©

L'analyse du modèle numérique de terrain réalisé à partir des données lidar⁶, montre que la vulnérabilité du littoral de l'Étang-Salé à la submersion est assez variable en fonction des secteurs.

A l'extrémité Nord-ouest de la commune, les terrains occupés par la forêt départemento-domaniale s'élèvent rapidement au-dessus des 10 m NGR, ce qui met les terrains hors d'eau vis-à-vis des épisodes les plus énergétiques.

Plus au Sud, on remarque donc la première zone basse située en arrière du Bassin-Pirogue, au niveau du principal espace urbanisé du bord de mer. On y aperçoit un petit bourrelet sableux au Nord de la pointe des Sables, derrière lequel s'étend une vaste zone dépressionnaire (entre 0 et 4 m NGR) d'environ 50 ha. Aucune barrière naturelle n'est en revanche présente face à la zone récifale, où en cas de conjonction de phénomènes, des surverses par paquets de mer peuvent se produire. Des cas de submersion ont d'ailleurs été rapportés sur le secteur. Les points préférentiels d'entrée des eaux identifiés sont les rues perpendiculaires au littoral au fond du Bassin-Pirogue (les cales d'accès au littoral favorisant cette dynamique), ainsi que le secteur de forêt juste au nord de la zone urbaine. De fréquents cas de submersion de cette forêt ont d'ailleurs eu lieu historiquement.

⁶ Le lidar ou « light detection and ranging » est une technique d'acquisition topographique et/ou bathymétrique de haute densité. La mesure est basée sur le calcul du délai entre l'émission et la réception d'un signal lumineux par technologie laser, la vitesse de la lumière étant une constante connue.



Figure 30 - Dépôts de sable suite aux paquets de mer ayant affecté le front de mer de l'Étang-Salé lors du cyclone Bépisa (B. Aunay et al, janvier 2014)

La zone de falaises située entre la Pointe de l'Étang-Salé et la forêt domaniale de la côte sous le Vent est quant à elle hors d'atteinte des houles sur un linéaire d'un peu plus de deux kilomètres.

Une seconde zone basse se situe à l'extrémité Sud-est de la commune, le long de la ravine Maniron (alimentant l'Étang du Gol) et dans la continuité du plateau du Gol. Dans ce secteur, une zone inférieure à 4 m NGR s'étend sur plus de 100 ha. Si historiquement, aucun cas de submersion n'est relaté sur ce secteur, c'est probablement du fait de l'absence d'habitation et d'occupation humaine, ce qui raréfie les témoignages et observations. Par ailleurs, on peut noter sur ce secteur la présence d'un large cordon sédimentaire mixte (mélange de sable et de galets) qui protège les terrains en arrière-littoral sur toute la partie Sud-est de la commune de l'Étang-Salé. Ce cordon est de largeur variable (moyenne de l'ordre de 50 m) et s'étend sur plus de 4,3 km de longueur. En revanche, l'intégralité de ces terrains est soumise à l'aléa inondation car la topographie fait de ce territoire une zone de concentration préférentielle des écoulements.

Les Avirons

La commune des Avirons n'est que peu soumise à l'aléa de submersion marine. La configuration de son littoral place les secteurs à enjeux à distance raisonnable des aléas sur le secteur Sud de la pointe rocheuse, notamment du fait de l'accumulation sédimentaire qui y est présente.

La Pointe des Avirons en elle-même est balayée continuellement par les houles de par son altitude basse et sa pente faible ($\approx 1\%$ sur la partie rocheuse). La zone active des houles est caractérisée par l'absence de sable sur tout le secteur "nettoyé" par le runup (cf. Figure 31). Cette limite est cependant évolutive dans le temps. En arrière, les dunes végétalisées que l'on rencontre sont plus stables et participent à la protection des habitations vis-à-vis d'une potentielle submersion.



Figure 31 – Configuration du littoral des Avirons

Au Nord de la pointe des Avirons, l'érosion littorale rapproche progressivement quelques habitations du trait de côte. Cependant, ces dernières sont situées à une altitude comprise entre 6 et 7 m NGR, ce qui ne les rend potentiellement atteignables que par des houles cycloniques exceptionnelles.

La vulnérabilité du littoral des Avirons à la submersion marine est donc limitée mais reste conditionnée par l'orientation des houles incidentes, les houles cycloniques de Nord étant plus pénalisantes que les houles australes de Sud.

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 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 Tx⁷)	Création orthophotographies et numérisation multi-dates du trait de côte	Calcul marge d'erreur et calculs automatiques taux moyens d'évolutions par profils (Tx)	Projection des taux moyens à 100 ans (100 Tx)
Prise en compte du recul lié à un évènement majeur (Lmax)	Données historiques sur un évènement majeur	Modèle numérique (modélisation morphodynamique liée à une tempête spécifique)	Analyse géomorphologique à dire d'expert
Zone soumise à l'aléa	Lr = 100 Tx + Lmax		
Etape 2	Prise en compte des ouvrages de protection (vocation à fixer le trait de côte)		
Estimation du rôle à long terme	Capacité à retenir le recul et à résister aux évènements majeurs (analyse historique et dire d'expert)		
Adaptation de la zone soumise à l'aléa	Pas d'adaptation si la plage existe encore à échéance 2100	Prise en compte de l'évolution des zones naturelles adjacentes non protégées (si existantes à échéance 2100)	Bande de précaution forfaitaire de 50 m en l'absence d'information
Etape 3	Prise en compte de l'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte		
Identification des facteurs de recul	Analyse historique du fonctionnement du site		
Méthode pour les côtes connaissant un recul sur la période étudiée	Une règle de trois prenant en compte le scénario de l'ONERC : 20 cm au XX s., et 60 cm à échéance 2100.		
Côtes basses meubles sans évolution historique récente	Même règle de trois basée sur les reculs occasionnés lors d'un évènement tempétueux passé		
Côtes non soumises à l'érosion	Sur la base altimétrique d'une augmentation d'un niveau d'eau de 60 cm (étangs, lagunes, fonds de baie)		
Etape 4	Qualification de l'aléa		
Qualification unique	Fort		
Etape 5	Résultats cartographiques		
Carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte	Positions du trait de côte, délimitation des cellules hydrosédimentaires, ouvrages de protection, secteurs de comportements homogènes, vitesses d'évolution du trait de côte (Tx et Lmax)		
Cartes du zonage de l'aléa recul du trait de côte	Zonage de l'aléa de référence (sans changement climatique) à échéance 2100	Position du trait de côte à échéance 2100 avec prise en compte du changement climatique	

Tableau 8 - 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 sur la photo-interprétation de clichés aériens anciens. Le calcul du recul du trait de côte suit les étapes suivantes :

- préparation des photographies aériennes ;
- définition et numérisation du trait de côte aux différentes dates ;

⁷ Vitesse d'évolution annuelle

- calcul du recul du trait de côte à échéance 2100⁸.

Préparation des photographies aériennes anciennes

Les photographies utilisées dans cette étude sont issues des campagnes aériennes couvrant l'ensemble du linéaire côtier des communes de l'Étang-Salé et des Avirons de 1966 à 2008 (cf. Tableau 9).

Années	Nature des clichés	Echelle de prise de vue	Résolution image numérique
1966	Noir & Blanc	1 : 50 000	1 pixel = 1 m
1978	Couleur et Noir & Blanc	1 : 20 000	1 pixel = 0.5 m
1997	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 1 m
2003	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m
2008	Couleur	1 : 25 000	1 pixel = 0.5 m

Tableau 9 – Détail des campagnes photographiques de l'IGN utilisées

Elles ont été numérisées (scan photogrammétrique pour les prises de vues argentiques), orthorectifiées (correction des déformations dues à l'optique et au relief) et géoréférencées par l'IGN. Les images de 1997, 2003 et 2008 sont issues du produit « BD Ortho ». Celles de 1966 et 1978 ont été orthorectifiées spécifiquement pour les besoins de ce PPRL.

Définition et numérisation des traits de côte

Compte-tenu de l'évolution des aménagements côtiers et des conditions hydrodynamiques (marée, état de mer) d'une date à l'autre, la définition du trait de côte comme étant la limite du contact terre-mer visible sur les photographies aériennes n'est pas satisfaisante.

La limite haute du littoral a donc été privilégiée comme indicateur pour matérialiser la dynamique d'évolution du trait de côte, à savoir (cf. Figure 32) :

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

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

⁸ 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.



Figure 32 - Exemple de définition du trait de côte suivant les morphotypes du littoral à l'Étang-Salé :
a. limite de végétation ; b. limite en pied d'aménagement ; c. limite de haut de versant

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

Calcul du recul du trait de côte à 100 ans

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

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



Figure 33 - Exemple d'implantation des profils à Bassin-Pirogue

Les transects sont implantés tous les 20m (cf. Figure 33), 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.

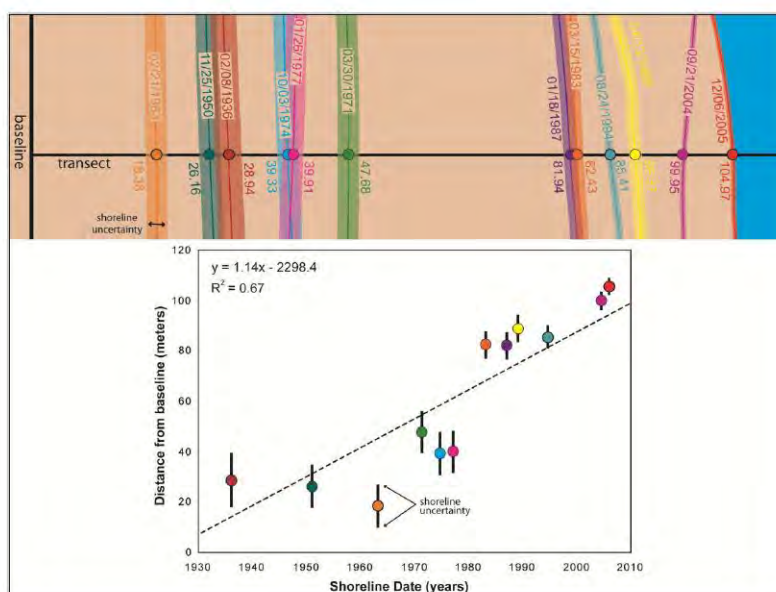


Figure 34 – Principe de la régression linéaire pondérée pour le calcul par DSAS de l'évolution du trait de côte (Himmelstoss, 2009)

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 35), il convient de regrouper et « moyenner » les valeurs au sein de secteurs au comportement morpho-dynamique homogène.



Figure 35 – Exemple d'artefact (en pointillé noir trait de côte 100Tx en « dent de scie », en couleurs les différents traits de côte historiques)

Au sein de grandes cellules hydrosédimentaires, des secteurs sont ainsi définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral. Les reculs moyens par secteur (moyenne des Tx obtenus sur chacun des profils) sont enfin classés par catégories de vitesses de recul soit :

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

Un exemple est donné dans le tableau ci-dessous :

Secteur	Morphotype	Recul Tx par secteur (m/an)	Classe	100 TX
1	Plage et cordon de galets	-0,08	Faible	-8,33
2	Plage/Récif/Aménagement	-0,05	Faible	-4,67
3	Côte rocheuse basse	-0,03	Faible	-3,00
4	Falaises	-0,12	Modéré	-12,30
5	Falaises – Cordon de galets	-0,26	Fort	-25,62
6	Embouchure – Cordon de galets	-0,31	Fort	-30,86

Tableau 10 – Calculs de recul du trait de côte (référence 2008 – échéance 2100) par secteurs homogènes sur la commune de l'Étang-Salé

Secteur	Morphotype	Recul Tx par secteur (m/an)	Classe	100 TX
1	Plage et cordon de galets	-0,20	Modéré	-20,29
2	Falaise	-0,26	Fort	-25,50

Tableau 11– Calculs de recul du trait de côte (référence 2008 – échéance 2100) par secteurs homogènes sur la commune des Aviron

Il convient en outre de prendre en compte le recul lié à un événement tempétueux majeur (L_{max}). Sur la base des tempêtes et cyclones connus (cyclone Gamède et houles australes de mai 2007), le L_{max} est estimé à -10 m pour les secteurs de cordons sédimentaires exposés au large et à -5 m pour les plages protégées par un récif corallien ou des falaises.

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

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

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

La largeur de la zone d'aléa résultante ($L_r = 100Tx + L_{max}$) est affectée en arrière du trait de côte le plus récent (2008). Ces valeurs sont calculées comme dans l'exemple ci-dessous :

Secteur	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné	L_{max}	L_r
1	Plage et cordon de galets	-10	-10	-20
2	Plage/Récif/Aménagement	-5	-5	-10
3	Côte rocheuse basse	-5	-5	-10
4	Falaises	-15	-5	-20
5	Falaises – Cordon de galets	-25	-10	-35
6	Embouchure – Cordon de galets	-30	-10	-40

Tableau 12 – Valeurs 100Tx ; L_{max} et L_r par secteurs homogènes pour la commune de l'Étang-Salé

Secteur	Morphotype	100 Tx arrondi/plafonné	L_{max}	L_r
1	Plage et cordon de galets	-20	-10	-30
2	Falaise	-25	-5	-30
3	Côte rocheuse basse	0	-5	-5

Tableau 13 – Valeurs 100Tx ; L_{max} et L_r par secteurs homogènes pour la commune des Aviron

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

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

Lorsque les aménagements présents sur le littoral se caractérisent par des ouvrages légers de particuliers (murs, palissades), ces aménagements ne sont pas considérés comme des ouvrages de défense au sens du guide national 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 n'ont pas été pris en compte pour corriger le zonage.

Zonage 2100 : recul du trait de côte 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 national⁹ propose d'appliquer :

- une règle de trois entre les +60cm d'élévation du niveau de la mer attendu pour 2100 et les +20 cm enregistrés le siècle dernier, ce qui revient à tripler le recul 100Tx entre 2008 et 2100 (sans Lmax) ;
- pour les côtes basses meubles ne subissant pas de recul (en accrétion à long terme), en triplant le recul Lmax selon cette même règle de trois ;
- pour les zones non soumises à l'érosion (étangs), en déplaçant le trait de côte à +60 cm d'altitude.

Ce principe a été appliqué sur les communes de l'Étang-Salé et des Avirons (cartographie avec l'outil *buffer*) à l'exception des zones où la morphologie du littoral change avec notamment le passage vers l'intérieur des terres d'un cordon sédimentaire à une falaise ou d'une falaise côtière à un massif montagneux. Dans ces cas, étant donné qu'il ne s'agit pas du même type de recul, la limite est ramenée au pied du massif.

Résultats cartographiques

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

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

- une carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte au 1/10 000ème (cf Annexe 1) contenant les différents traits de côtes historiques, la position des transects, les limites des cellules hydrosédimentaires et des secteurs à comportement homogène ainsi que les classes de vitesses de recul associées (cf. Figure 36) ;

⁹ Analyse et cartographie des aléas littoraux pour l'élaboration des PPRL – Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – Septembre 2012 – 146 p.



Figure 36 – Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte dans le secteur l'Étang-Salé (cf. Annexe 1)

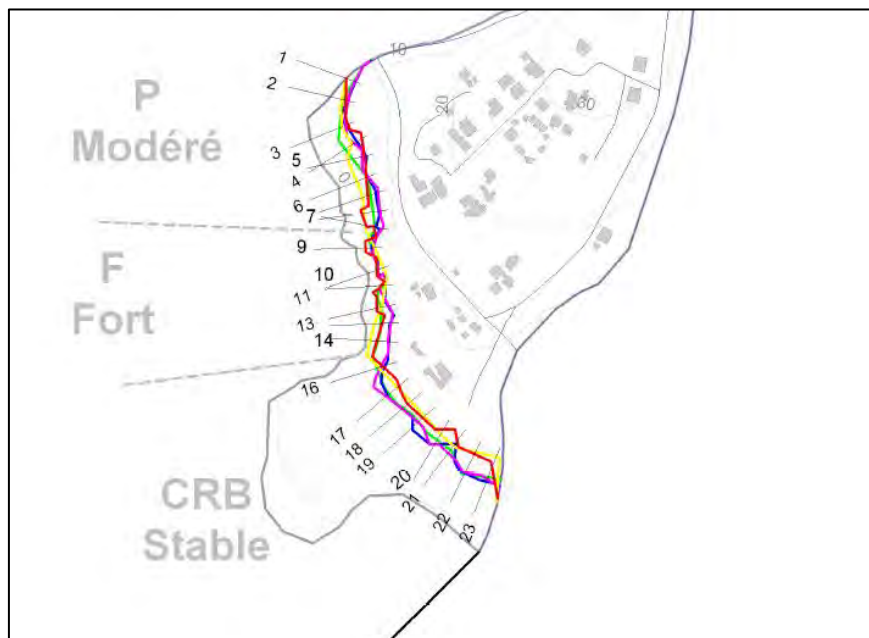


Figure 37 - Extrait de la carte de synthèse de l'évolution historique du trait de côte sur la commune des Avirons (cf. Annexe 1)

- une carte de l'aléa recul du trait de côte au 1/5 000 (Annexe 2) contenant le trait de côte de référence (2008), le zonage de l'aléa de référence à échéance 2100 (qualification en aléa fort uniquement), ainsi que la limite de l'aléa avec prise en compte du changement climatique (cf. Figure 38).

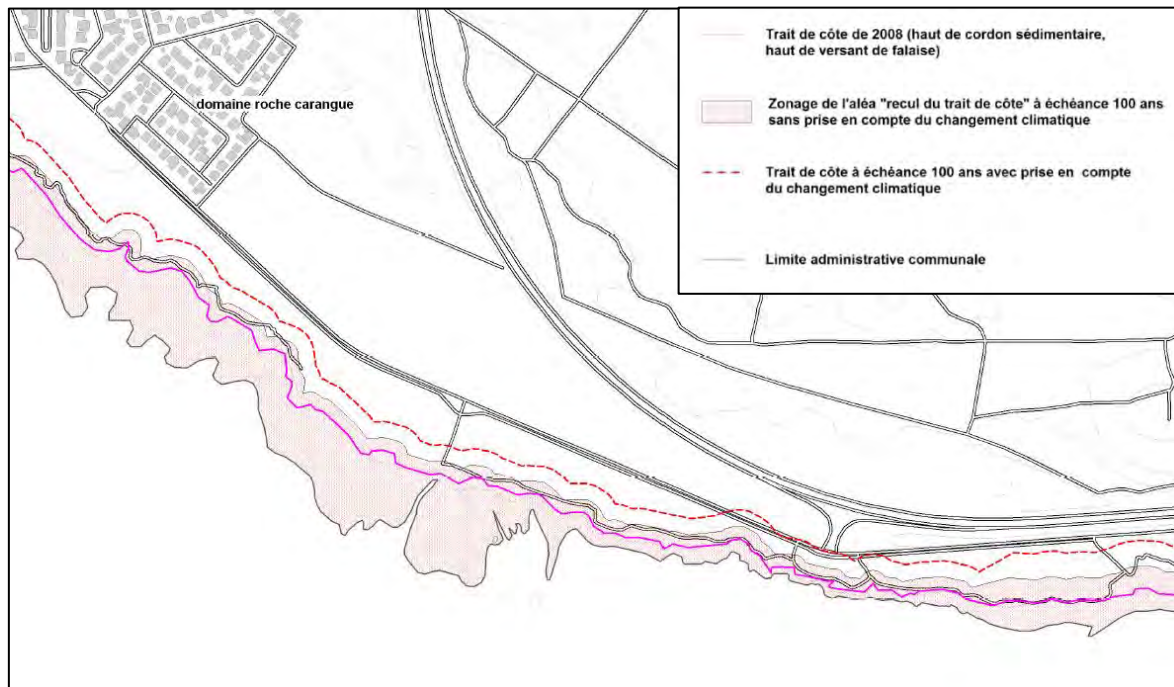


Figure 38 – Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur la commune de l'Étang-Salé (cf. Annexe 2)

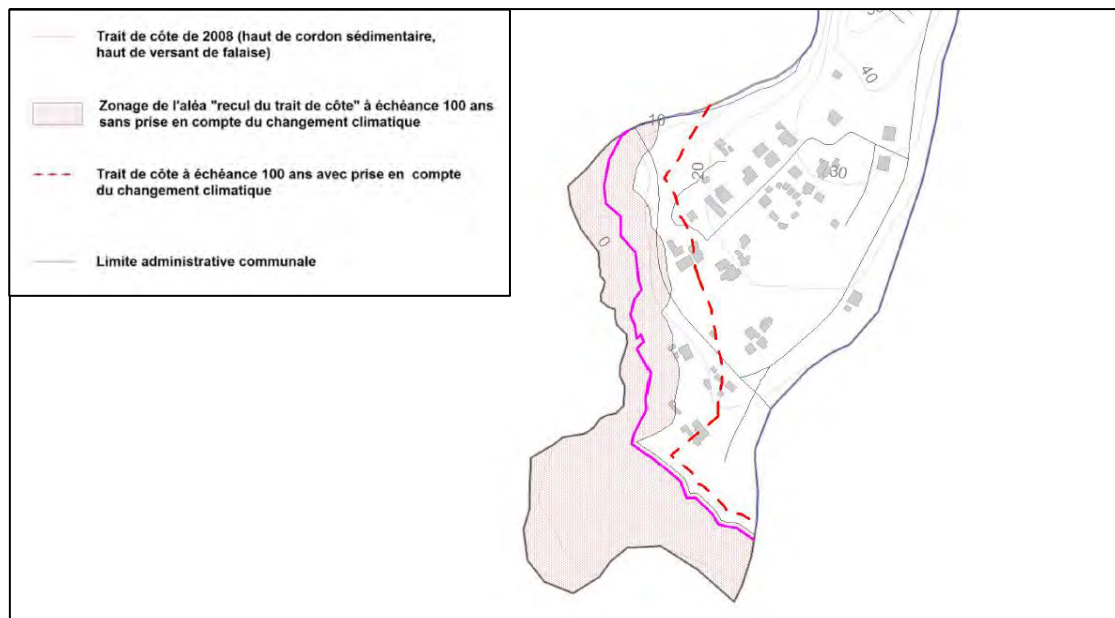


Figure 39 – Extrait de la carte d'aléa recul du trait de côte sur la commune des Aviron (cf. Annexe 2)

5.3. ALEA SUBMERSION MARINE

5.3.1. Cadre méthodologique national

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

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

La méthodologie globale et les choix opérés pour cette étude sont synthétisés dans le tableau 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 ($L = 100 \times h$ ou ≥ 50 m)	Éléments 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 14– Synthèse de la méthodologie nationale de caractérisation de l'aléa submersion marine (en jaune les choix opérés pour cette étude)

5.3.2. Modélisation des submersions marines de référence

Méthodologie et scénarios

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

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

Pour la submersion par franchissement, plusieurs méthodes d'estimation sont possibles. Les formules empiriques de calcul du run-up¹⁰ telle que Stockdon *et al.* (2006) ont été utilisées à La Réunion (De la Torre et Louzé, 2008). Cependant, elles ne s'appliquent pas dans les environnements récifaux ou lorsque la houle est très fortement diffractée et ne permettent pas de quantifier la hauteur d'eau et les vitesses d'écoulement.

La modélisation numérique est donc préférée car elle permet d'intégrer les spécificités du littoral des communes de l'Étang-Salé et des Avirons. 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. Pour ces deux communes, les modélisations ont été réalisées en 1D (profils).

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

Pour rappel, les calculs de probabilités conjointes (houle/niveau marin extrême, périodes de retour) nécessitent un nombre important d'événements observés. Or, à La Réunion, les données

¹⁰ Run-up : altitude maximale atteinte par le jet de rive sous l'action des vagues.

concernant les événements cycloniques ne sont disponibles que depuis la fin du XX^{ème} siècle, et les cyclones y restent peu fréquents (comparativement aux tempêtes métropolitaines). Les données disponibles rendent donc incertains les calculs d'extrêmes par cette approche. On adopte donc une approche historique en sélectionnant les événements passés les plus dommageables comme scénarios de référence.

Le mode de submersion prépondérant étant le franchissement suite au déferlement des vagues, l'évènement naturel de référence est donc déterminé à partir de l'analyse comparative d'évènements historiques majeurs pour différents régimes de houles extrêmes (Lecacheux *et al*, 2012). Pour le littoral de l'Étang-Salé et des Aviron, les événements de référence sont donc :

- **La houle australe issue de l'évènement de mai 2007 du nord des Aviron à la Pointe de l'Étang Salé.**
- **La houle cyclonique de Hollanda (1994) au Sud de la pointe de l'Étang-Salé (cf. Figure 40).**

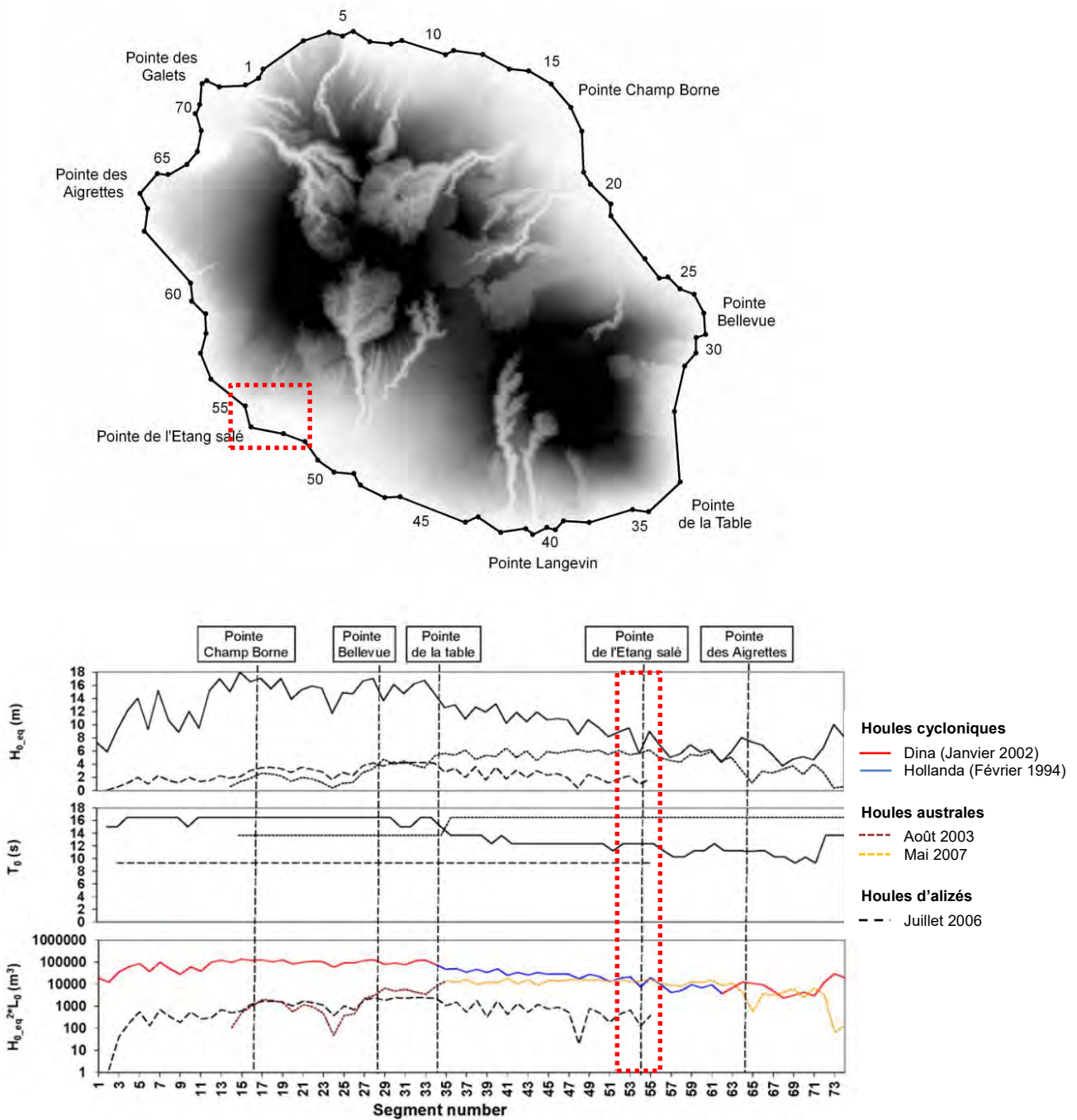


Figure 40 – Comparaison des houles engendrées par différents évènements historiques (cyclones ou houles australes) en termes de hauteur significative (graphiques du haut), période pic (graphiques du centre) et énergie (graphiques du bas) le long de la côte réunionnaise – (Lecacheux et al., 2012)

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

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

2100 font l'objet d'une adaptation cartographique des sorties du modèle à partir des observations historiques.

Données disponibles

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 modèle numérique de terrain Litto3D a été utilisée.

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. Compte-tenu de la localisation des simulations de l'Étang-Salé et des Avirons, deux ports peuvent être jugés représentatifs pour la présente étude : Saint-Leu et Saint-Pierre.

Site	Plus haute mer astronomique (m/ ZH)	Moyenne des plus hautes mers journalières (m/ ZH)	Niveau moyen (m/ZH)	Moyenne des plus basses mers journalières (m/ ZH)	Plus basse mer astronomique (m/ ZH)	ZH / 0 IGN89 (m)
Saint-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 15 – Références altimétriques maritimes pour les sites de Saint-Leu et Saint-Pierre : Plus hautes et basses mers astronomiques, Moyenne des plus hautes et basses mers journalières, Niveau moyen et écart entre Zéro Hydrographique (ZH) et Zéro IGN89 (SHOM, 2011)

Les prédictions de marée n'étant disponibles à La Réunion que pour les sites de la Pointe des Galets et de Saint-Pierre (logiciel SHOMAR), c'est finalement le site de Saint-Pierre qui a été retenu comme référence unique pour l'étude, pour des raisons de cohérence et compte-tenu des écarts minimes entre les sites de Saint-Leu et de Saint-Pierre (hors basses-mers).

Pour mémoire, on retiendra que le niveau de plus haute mer astronomique (marée) est estimé pour le secteur d'étude à +0,36 m IGN89¹¹.

Niveaux d'eau considérés

Les niveaux d'eau ont été choisis à partir des cas historiques correspondants aux événements de houle référence :

- Le niveau de marée prédite est calculé à l'aide du logiciel SHOMAR du SHOM à Saint-Pierre, à l'heure du pic estimé de la houle lors de l'événement ; dans le cas où le pic de

¹¹ Ce niveau est exactement à +0,32 m IGN89 à St Leu et à 0,366 m IGN89 à Saint-Pierre.

houle ne serait pas tout à fait concomitant avec la haute-mer, afin de tenir compte des diverses incertitudes liées aux données de forçage, il a été choisi de retenir le niveau de pleine mer le plus proche du pic de houle, ce qui revient à se placer dans des conditions maximisantes afin de vérifier les possibilités de franchissements par les vagues ; ce niveau de marée est ensuite ramené au zéro IGN89 par l'intermédiaire des références altimétriques présentées dans le Tableau 15.

- La surcote atmosphérique est prise en compte à partir des données disponibles pour l'événement considéré. Pour les houles australes, la surcote atmosphérique reste inconnue ; ces houles étant générées par des tempêtes lointaines (et n'induisant donc a priori pas de dépression au niveau de La Réunion), il a été choisi de ne pas superposer de surcote pour cet évènement.

Les niveaux d'eau ainsi calculés sont ensuite considérés conformément à la méthodologie recommandée par le ministère en charge de l'écologie (DGPR, 2014), à savoir :

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

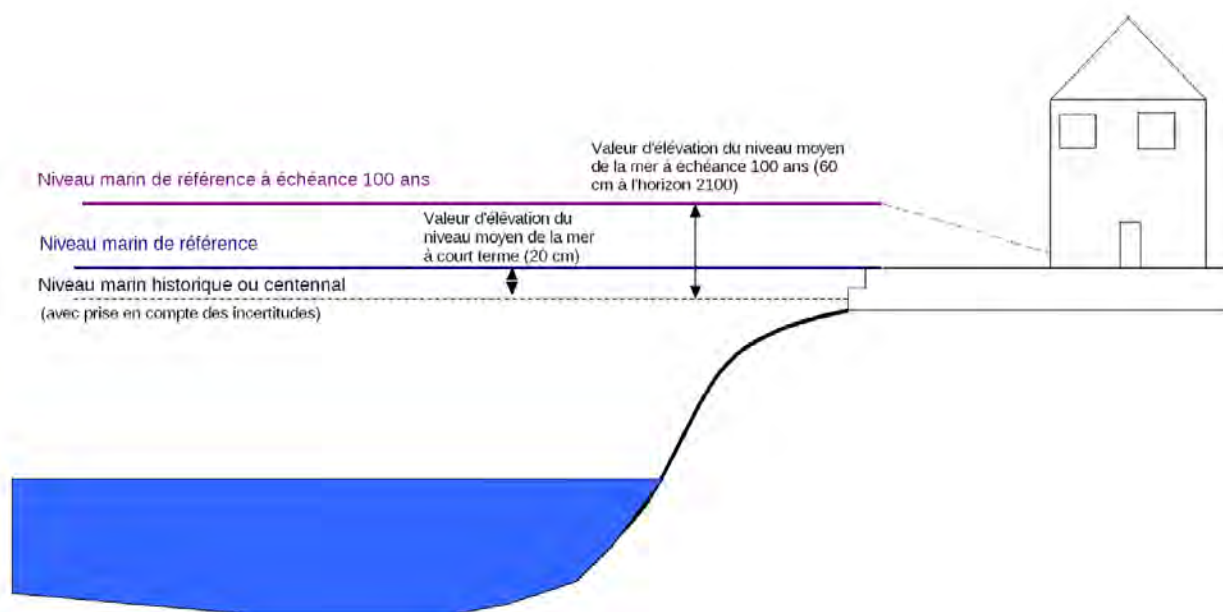


Figure 41 - Niveaux marins à prendre en compte pour la caractérisation de l'aléa submersion marine (MEDDTL, 2012)

Les niveaux considérés sont donc les suivants :

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

Tableau 16 - Niveaux marins retenus pour les simulations de submersion

Nature des simulations

Localisation des simulations

Au vu des enjeux sur les littoraux des communes de l'Étang-Salé et des Aviron, il a été convenu de réaliser 2 modèles 1D sur le secteur : le premier sur la pointe des Aviron, et le second sur le site plus sensible de l'Étang-Salé-les-Bains. Ces simulations permettent de mieux appréhender les dynamiques de submersion et d'extrapoler les résultats aux secteurs adjacents. La localisation de ces profils est précisée à la Figure 42 ci-après.



Figure 42 – Localisation du transect de la simulation 1D réalisée à l'Étang-Salé-les-Bains

Les simulations réalisées étant au Nord de la Pointe de l'Étang-Salé, l'évènement de référence utilisé a été les **houles australes de référence de mai 2007**, pour lesquelles ont été définies :

- Un scénario à court-terme, incluant une élévation du niveau marin de 20 cm ;
- Un scénario à long-terme (dit changement climatique), ou à horizon 2100, incluant une élévation du niveau marin de 60 cm.

Méthode adoptée pour les simulations en 1D

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

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

- **propagation du spectre des vagues du large à la côte avec le code SWAN** en 1D, en conditions « maximisantes » (associant pic des vagues et niveau d'eau maximal, même si les deux phénomènes ne se sont pas produits simultanément lors de l'événement historique) à partir du calcul des houles équivalentes au large orthogonales à la côte (Lecacheux *et al.*, 2012) ;
- **génération de séries temporelles** au-delà de la zone de déferlement pour générer des données d'entrée pour le modèle-vague-à-vague SURFWB;
- **simulation de la submersion en 1D avec le code SurfWB sur une durée de 30 minutes** (en conditions maximisantes), ce qui correspond à une centaine de vagues afin d'obtenir un nombre de vagues représentatif des phénomènes ;
- selon les résultats sur 30 minutes :
 - si aucun franchissement n'est constaté pour les conditions « maximisantes », ce résultat constitue le résultat final et permet de déterminer le run-up maximal atteint par les vagues ;
 - si par contre un franchissement est constaté, il est nécessaire pour quantifier le volume d'eau à terre, d'effectuer des **simulations en conditions instationnaires** (i.e. dont les conditions en termes de niveau d'eau et de caractéristiques des vagues évoluent au cours du temps) ; ces simulations permettent d'accéder aux instants auxquels le franchissement débute et s'achève, et aux débits franchissant associés.

Simulations SWAN en 1D

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

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

Les caractéristiques des houles de référence au large exploitées suivant les 2 scénarios envisagés (court-terme et long-terme) sont présentées dans le Tableau 17.

Lieu	Segment identifié par Lecacheux et al. (cf. Figure 40)	HS (m)	Tp (s)
Étang-Salé	54	5.65	16.51
Les Avirons	55	6.19	16.51

Tableau 17 – Caractéristiques des vagues au large orthogonales à la côte utilisées en forçage des profils de l'Étang-Salé et des Avirons (d'après Lecacheux *et al.*, 2012)

Ces caractéristiques des houles de référence au large sont utilisées comme forçages pour SWAN sur les profils (à des profondeurs de l'ordre de 60 m), moyennant l'utilisation de spectres de

Jonswap. La propagation des spectres depuis le large jusqu'à la côte est menée à une résolution de 1 m le long du profil, et permet de connaître les principales caractéristiques des vagues le long du profil dans les deux scénarios étudiés, et notamment :

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

Génération d'une série temporelle

Les caractéristiques des spectres issues des calculs menés sous SWAN (hauteurs significatives et périodes-pic des vagues) sont ensuite utilisées pour reconstituer des séries temporelles de vagues conformes à ces caractéristiques au-delà de la zone de déferlement, pour chaque profil et pour chaque niveau d'eau considéré. Les séries temporelles ont été reconstituées sur des durées de 30 minutes, de manière à assurer un nombre de vagues supérieur à 100 pour une représentativité suffisante.

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

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

Les simulations de submersion en 1D sont menées avec comme forçage, pour chaque profil et pour chaque niveau d'eau étudié, les séries temporelles de 30 minutes reconstituées précédemment à partir des spectres calculés par le code SWAN.

Les calculs sont menés sur des profils topo-bathymétriques¹² issus des données Litto3D ré-échantillonnées pour une résolution de calcul de 50 cm dans l'axe du profil.

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

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

¹² Ces profils n'intègrent pas le bâti.

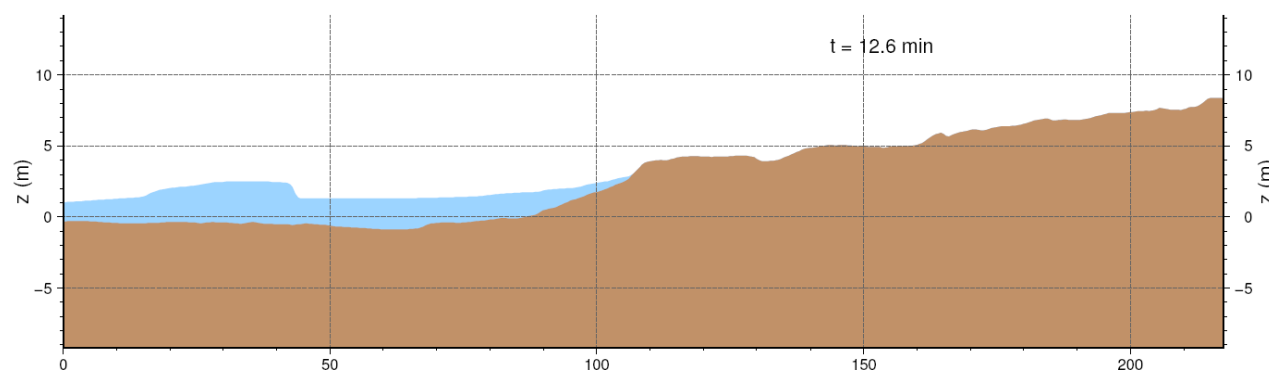


Figure 43 – Aperçu de la propagation des vagues

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

En cas de franchissement, simulation de la submersion en 1D en conditions instationnaires

En cas de franchissement, il s'avère nécessaire d'effectuer de nouvelles simulations en conditions instationnaires réalistes (évolution des conditions de vague et des niveaux d'eau au cours du temps) afin de quantifier les débits franchissant au cours du temps.

Pour cela, les simulations en 2D menées avec le code SWAN dans le cadre de l'étude HOULREU à une résolution de 90 m sur la côte Sud de l'île (grilles de calcul notées R2O et R2S dans Pedreros *et al.*, 2009) sont traitées selon la méthode proposée par Lecacheux *et al.* (2012) afin d'obtenir les caractéristiques de vagues au large orthogonales à la côte et équivalentes à celles simulées au cours du temps (et non uniquement au pic de la houle, comme réalisé par Lecacheux *et al.*, 2012).

Par ailleurs, les variations du niveau d'eau doivent également être prises en compte au cours du temps, ce qui est notamment possible par des calculs de marée par le logiciel SHOMAR.

Suivant la même approche que celle adoptée pour les simulations en conditions stationnaires maximisantes, les caractéristiques horaires des vagues sont propagées jusqu'à la côte avec le code SWAN en 1D, en prenant en compte l'évolution du niveau d'eau.

A partir des caractéristiques des vagues au-delà de la zone de déferlement, une série temporelle couvrant l'ensemble de la période susceptible de donner lieu à des franchissements peut être générée, en assemblant les séries temporelles composées pour chaque heure à partir des caractéristiques des vagues et des niveaux d'eau associés (incluant de plus le setup calculé lors de la propagation 1D avec le code SWAN).

Les simulations « vague-à-vague » avec le code SurfWB peuvent alors être menées sur l'ensemble de la période. L'analyse des résultats permet alors d'accéder aux heures des premiers et des derniers franchissements, de quantifier les débits franchissant au cours du temps et d'estimer la submersion à terre lors de l'événement.

Simulation 1D des houles australes de référence à l'Étang-Salé et aux Avirons

Simulations Swan 1D : propagation des conditions de vagues

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du niveau d'eau dans le scénario à long-terme par rapport au scénario à court-terme conduit à des hauteurs significatives des vagues à la côte plus élevées de 20 cm car les vagues franchissent plus aisément les petits-fonds du fait d'un déferlement légèrement moins marqué.

L'analyse de ces résultats permet d'identifier les zones de déferlement des vagues. Une extraction des spectres et des paramètres des vagues est réalisée au-delà de cette zone pour chacun des deux scénarios, afin de réaliser le couplage avec le code SurfWB (qui ne prend pas en compte le phénomène de déferlement).

Reconstitution des séries temporelles

Les spectres de vagues obtenus montrent que la fréquence dominante des vagues est de l'ordre de 0,058 Hz, ce qui correspond à des vagues de période de l'ordre de 17 secondes. On remarque toutefois que plus le niveau d'eau considéré est important, plus la hauteur du pic est importante, ce qui traduit une énergie plus importante des vagues (l'énergie étant représentée par la surface comprise sous la courbe du spectre).

Chaque série temporelle reconstituée à partir des spectres est « rétro-analysée » de manière à vérifier la cohérence entre les paramètres issus de SWAN et ceux propres aux séries temporelles générées. Ces comparaisons sont présentées vis-à-vis des hauteurs significatives et des périodes moyennes au Tableau 18, respectivement pour les scénarios à court-terme (+20 cm) et à long-terme (+60 cm).

	Scénario +20 cm					Scénario +60 cm			
	Les Avirons		L'Étang-Salé			Les Avirons		L'Étang-Salé	
	Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)		Hs (m)	Tmoy (s)	Hs (m)	Tmoy (s)
SWAN	0,99	14,92	0,70	14,88	SWAN	1,23	14,90	0,89	14,87
Série tempo	0,96	15,20	0,68	15,38	Série tempo	1,18	15,17	0,86	15,20
Ecart	0,03	0,28	0,02	0,50	Ecart	0,05	0,27	0,03	0,33

Tableau 18 – Houles australes de référence : comparaison entre les caractéristiques des vagues (Hs : Hauteur significative ; Tmoy : Période moyenne) en entrée des profils calculées par SWAN et celles des séries temporelles reconstituées, pour les scénarios à court (gauche) et à long-terme (droite).

Simulations de submersion en conditions stationnaires sur 30 minutes

Les résultats obtenus pour le profil de Bassin-Pirogue sont présentés aux figures 41, 42 et 43. Ces figures permettent de visualiser :

- Le niveau initial de référence : il s'agit du niveau de mer statique au large dans lequel se propagent les vagues
- Le setup : il s'agit du niveau moyen de la mer incluant le setup induit par les vagues
- Le Hmax : l'enveloppe supérieure maximale atteinte par les crêtes de vague
- Le Hmin : l'enveloppe inférieure minimale atteinte par les creux de vague.

Pour mémoire, le niveau de plus haute mer astronomique (marée) se situe dans le secteur d'étude aux alentours de +0,36 m IGN89. Il correspond à la limite d'action de la mer par temps calme (pas de vagues) pour les plus hautes mers astronomiques.

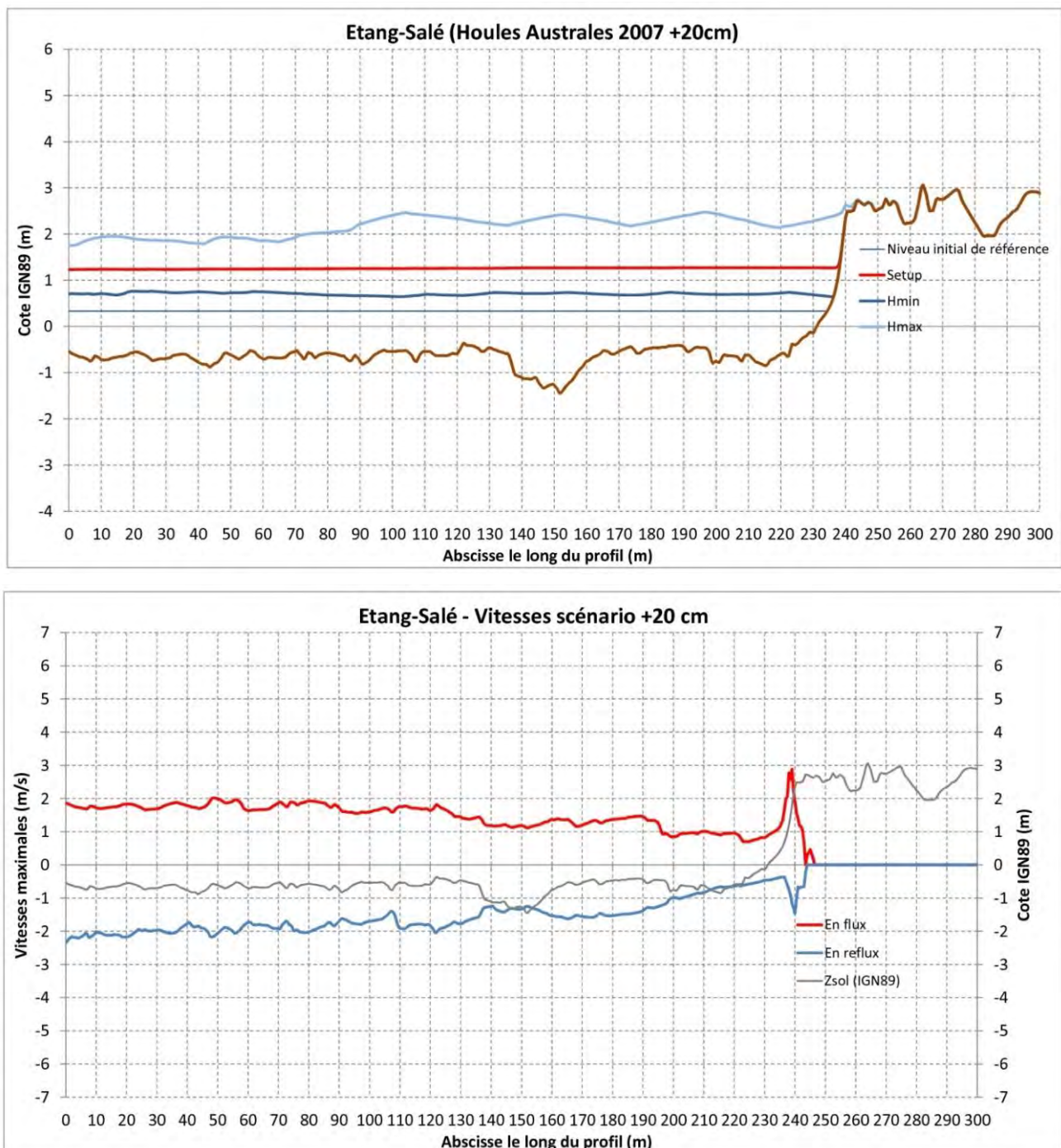


Figure 44 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil de l'Étang-Salé pour le scénario à court-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux

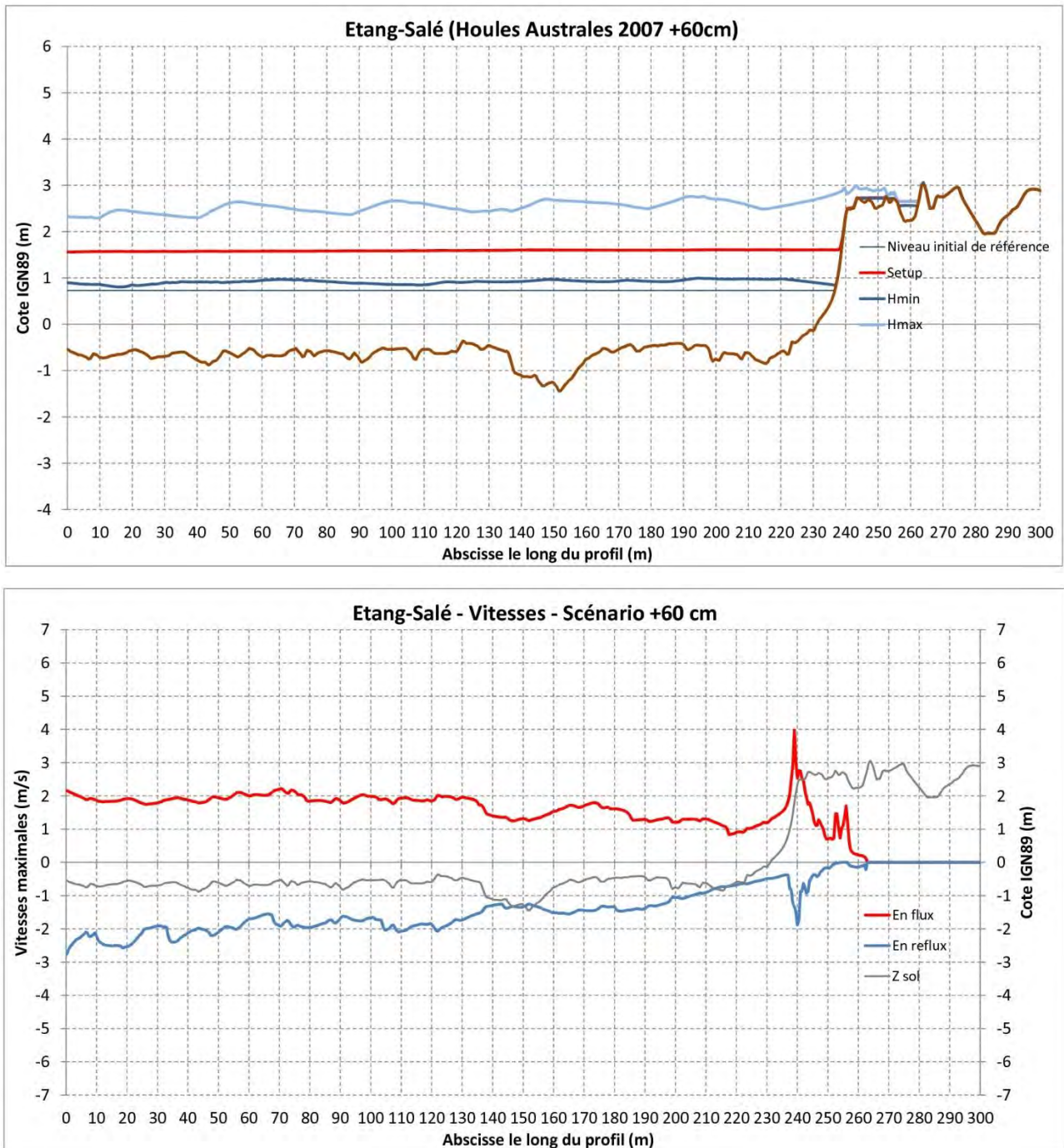


Figure 45 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil de l'Étang-Salé pour le scénario à long-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux

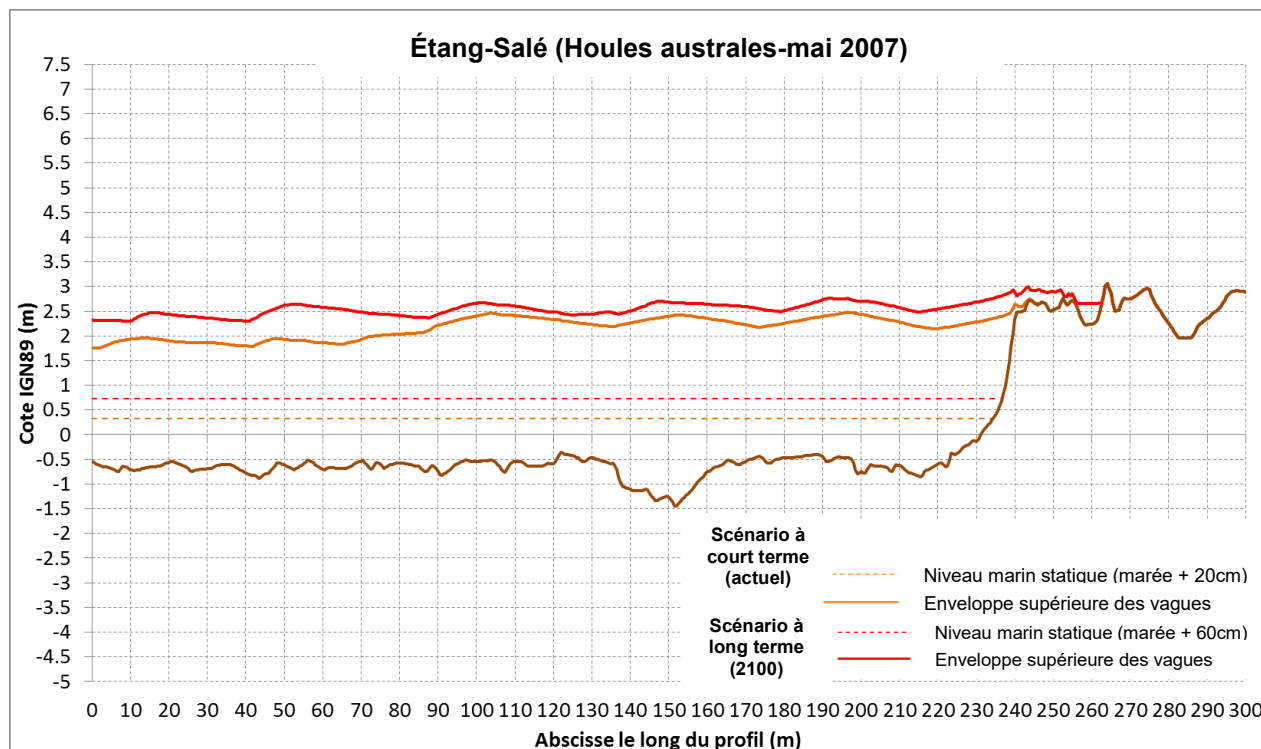


Figure 46 – Houles australes de référence : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil de l'Étang-Salé pour les scénarios à court-terme et à long-terme pour 30 minutes simulées

Le profil réalisé à l'Étang-Salé est situé à l'extrémité de la rue des Capucins. D'après les simulations 1D (cf. Figure 46), l'eau s'arrête exactement à l'emplacement du bout de la rue dans le scénario à court-terme, alors qu'elle parvient à pénétrer d'une quinzaine de mètres de plus dans le scénario à long-terme (le profil ne suit toutefois pas exactement la rue). Dans ce dernier cas, compte tenu de la topographie, il est possible que l'eau parvienne à atteindre l'emplacement des premières maisons.

Les résultats obtenus pour le profil des Avirons sont présentés aux figures 44, 45 et 46.

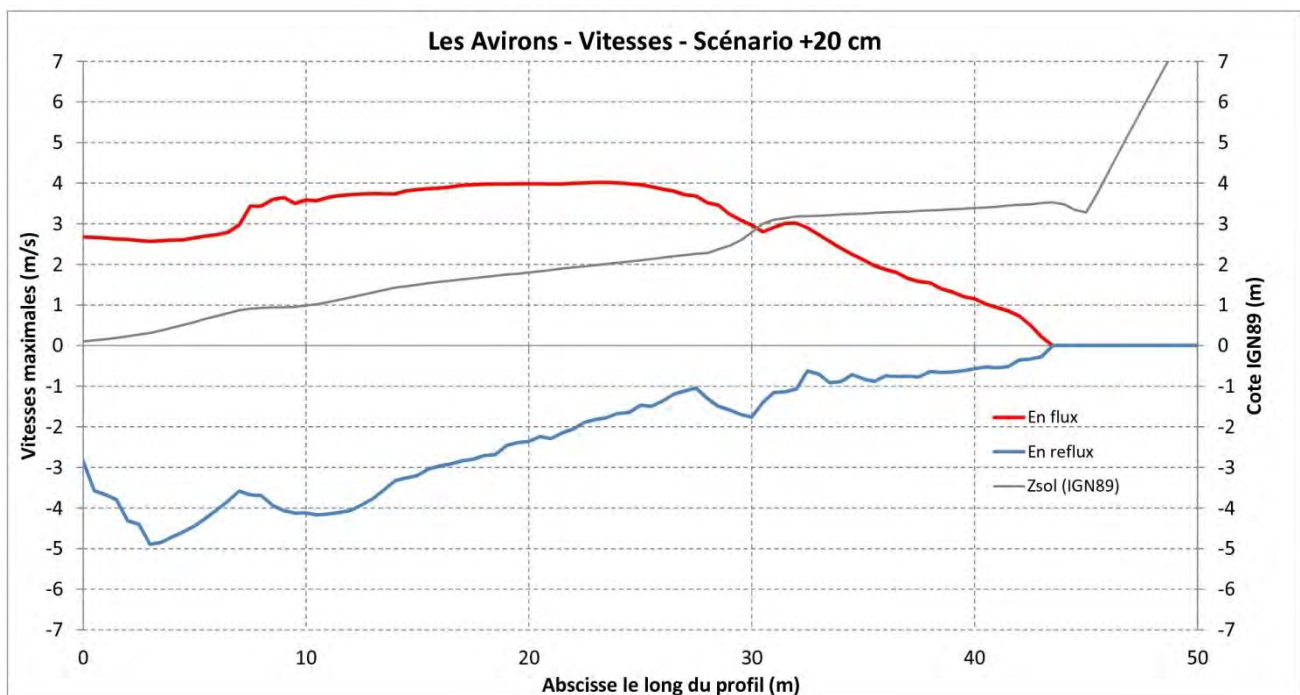
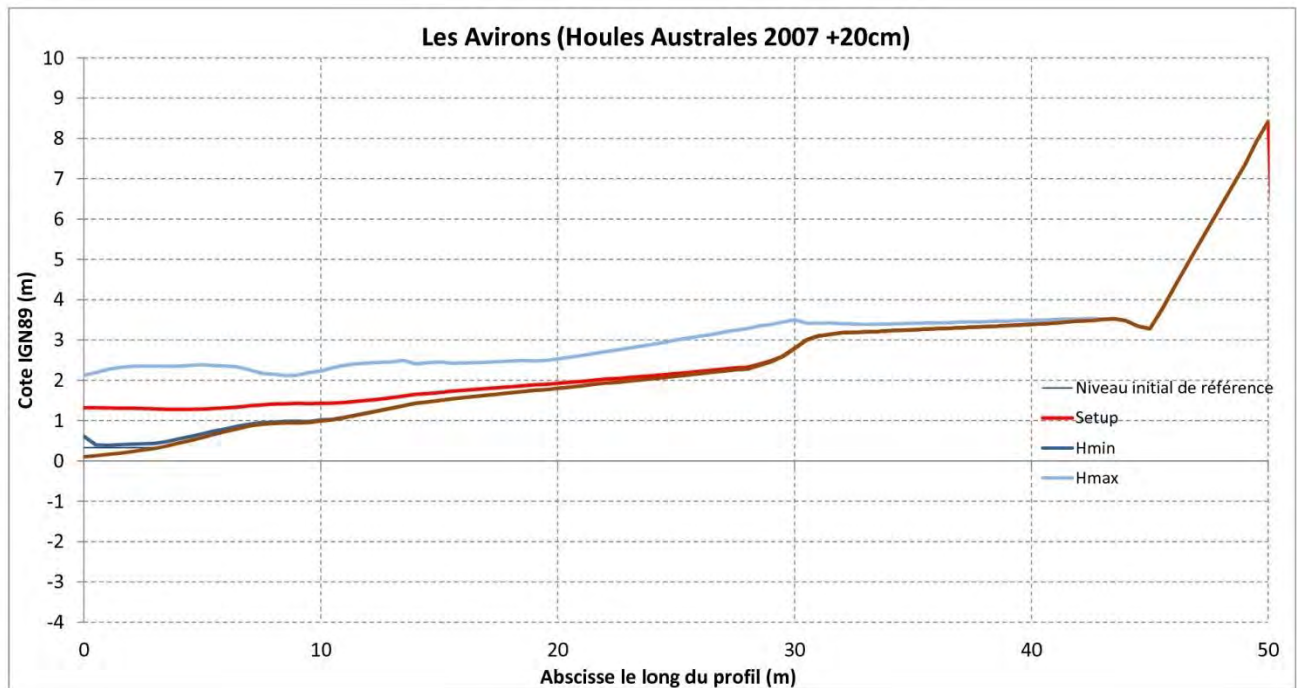


Figure 47 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil des Avirons pour le scénario à court-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux

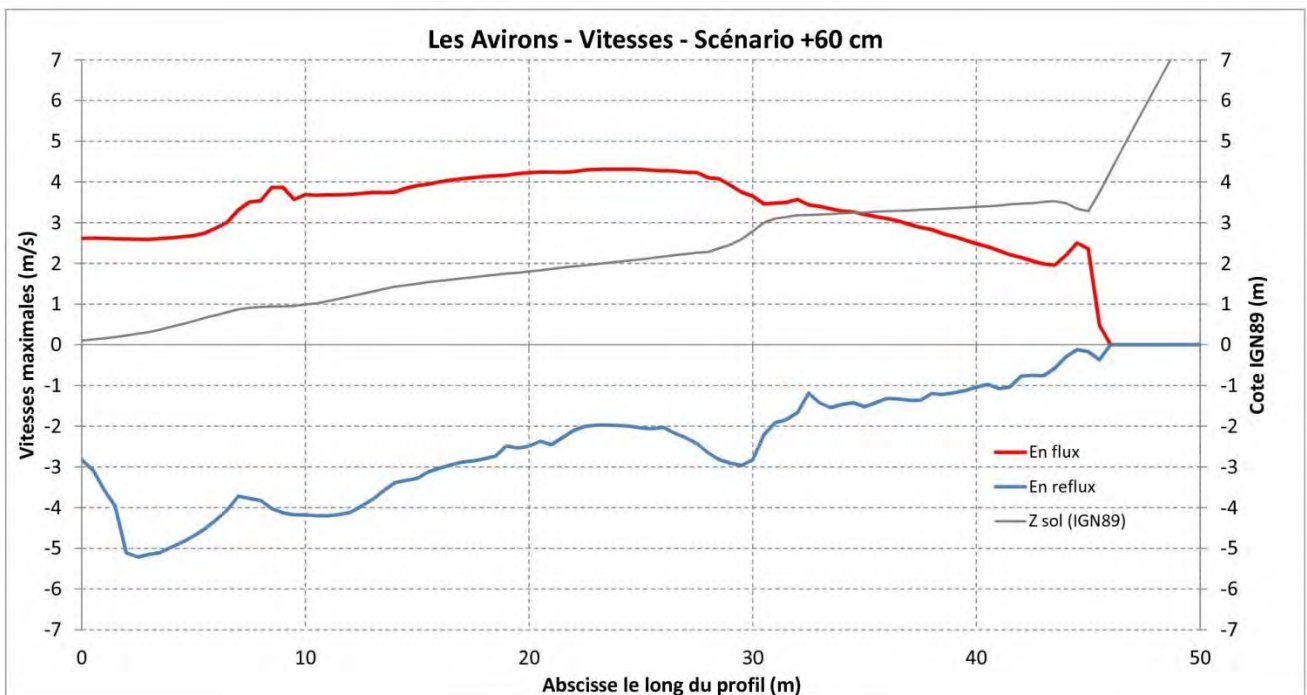
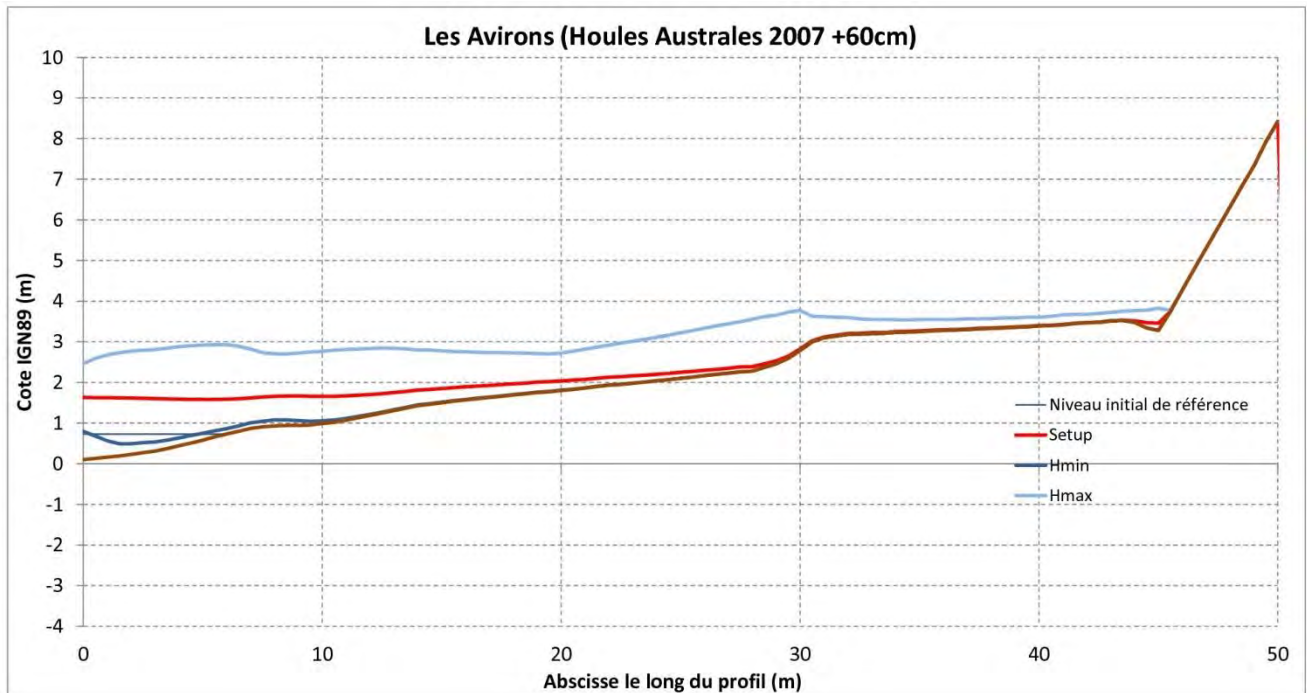


Figure 48 – Houles australes de référence : caractéristiques globales de la simulation sur le profil des Avirons pour le scénario à long-terme : hauteurs d'eau moyennes, maximales et minimales et vitesses maximales en flux et en reflux

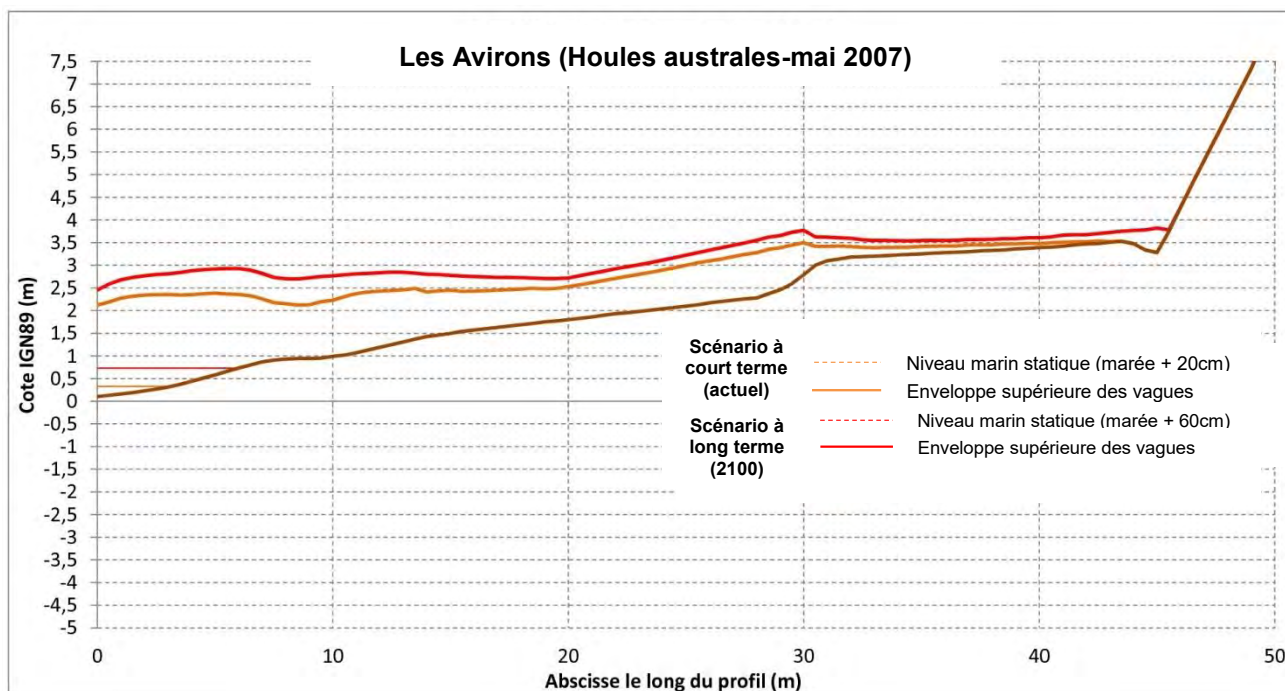


Figure 49 – Houles australes de référence : hauteurs d'eau maximales obtenues le long du profil des Avirons pour les scénarios à court-terme et à long-terme pour 30 minutes simulées

Sur le profil de la pointe des Avirons, la submersion est contenue par la topographie bien marquée : les vagues peuvent affecter l'intégralité de la plage (notamment dans le scénario à long-terme), mais ne peuvent franchir la forte pente marquée par la présence du massif dunaire en arrière de la côte rocheuse basse.

SYNTHESE

Le Tableau 19 synthétise les résultats obtenus pour chaque profil et chaque scénario en termes de niveau moyen de l'eau et de cote maximale atteinte à terre correspondant au jet de rive des vagues les plus fortes modélisées.

	Scénario à court-terme (+20 cm d'élévation de la mer)		Scénario à long-terme (+60 cm d'élévation de la mer en 2100)	
	Altitude moyenne atteinte à terre par les vagues ¹³ (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte à terre par les vagues ⁶ (m, IGN89)	Altitude moyenne atteinte à terre par les vagues ⁶ (m, IGN89)	Altitude maximale atteinte à terre par les vagues ⁶ (m, IGN89)
L'Étang-Salé	1,8	2,7	2,7	2,8
Les Avirons	2,6	3,5	3,4	3,7

Tableau 19 – Houles australes de référence : synthèse des résultats obtenus à l'Étang-Salé et aux Avirons

La cote moyenne atteinte par les vagues augmente de presque un mètre entre les scénarios à court et à long-terme (90 cm à l'Étang-Salé contre 80 cm aux Avirons).

Parallèlement, l'altitude maximale atteinte par les vagues (runup) n'augmente que de 10 cm à l'Étang-Salé contre 20 cm aux Avirons entre les deux scénarios. Cela traduit principalement le fait que les littoraux des deux communes sont particulièrement plans, l'arrière côte de l'Étang-Salé étant caractérisée par une vaste dépression arrière littorale, alors que celle des Avirons est constituée de côte rocheuse basse.

5.3.3. Zonage cartographique de l'aléa submersion marine

Qualification de l'aléa

Concernant la cartographie de l'aléa submersion marine, les seuils suivants sont utilisés pour la vitesse d'écoulement :

- **V>0,75m/s** vitesse d'écoulement **rapide** ;
- **0.25<V<0.75m/s** vitesse d'écoulement **modérée**
- **V<0,25m/s** vitesse d'écoulement **lente**.

Les hauteurs d'eau sont systématiquement quantifiées pour l'aléa de référence. Les seuils de hauteur d'eau sont définis par un pas de 50 cm, de la même manière que pour l'inondation par débordement de cours d'eau, soit :

- **H>1m** hauteur d'eau **forte**
- **0,5<H<1m** hauteur d'eau **modérée**
- **H<0,5m** hauteur d'eau **faible**

¹³ Jet de rive compris en haut de rivage

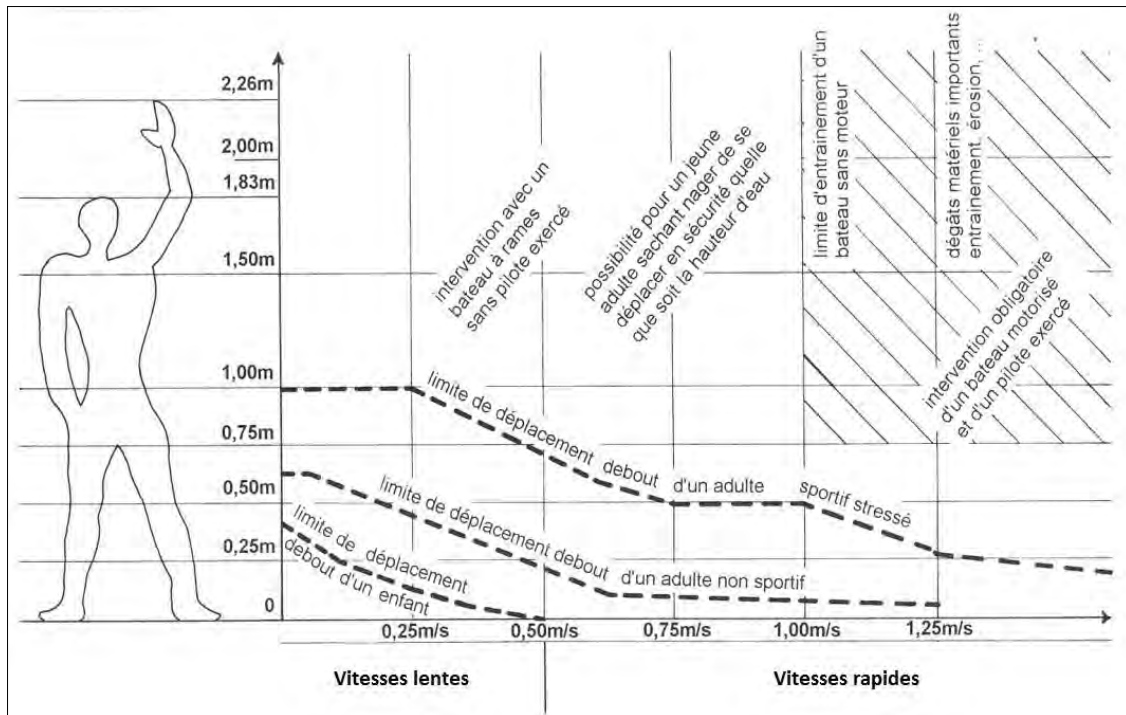


Figure 50 - Possibilités de déplacement des personnes en fonction des caractéristiques d'écoulement (source : Guide PPRi ruissellement péri-urbain M.E.D.D.E.)

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

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

Au final, la qualification de l'aléa repose sur la prise en compte de la dynamique de submersion de la manière suivante :

		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	Fort

Tableau 20 – Qualification de l'aléa submersion marine en fonction de la dynamique de submersion

Traitements et zonages cartographiques

Le zonage est cartographié sous SIG à partir :

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

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

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

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

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

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

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

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

Résultats cartographiques

Pour chaque aléa (Submersion marine et Recul du Trait de Cote), le niveau d'intensité de l'aléa est évalué selon deux scénarios d'évènement types :

- **Un scénario à court-terme, incluant une élévation du niveau marin de 20 cm ;**
- **Un scénario à long-terme (dit changement climatique), ou à horizon 2100, incluant une élévation du niveau marin de 60 cm.**

Concernant l'aléa submersion marine, pour chacun des deux scénarios ci-dessus, 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). L'ensemble des méthodes permettant la caractérisation des niveaux d'aléa sont précisées dans le chapitre 0

Il en résulte la superposition d'un grand nombre d'informations sur les cartes d'aléa submersions marine. Les informations concernant les deux scénarios ci-dessus sont différenciées par l'usage de surfaces colorées pour le scénario court terme, et de lignes discontinues pour le scénario long terme. La figure ci-dessous montre un exemple de cartographie de l'aléa submersion marine.

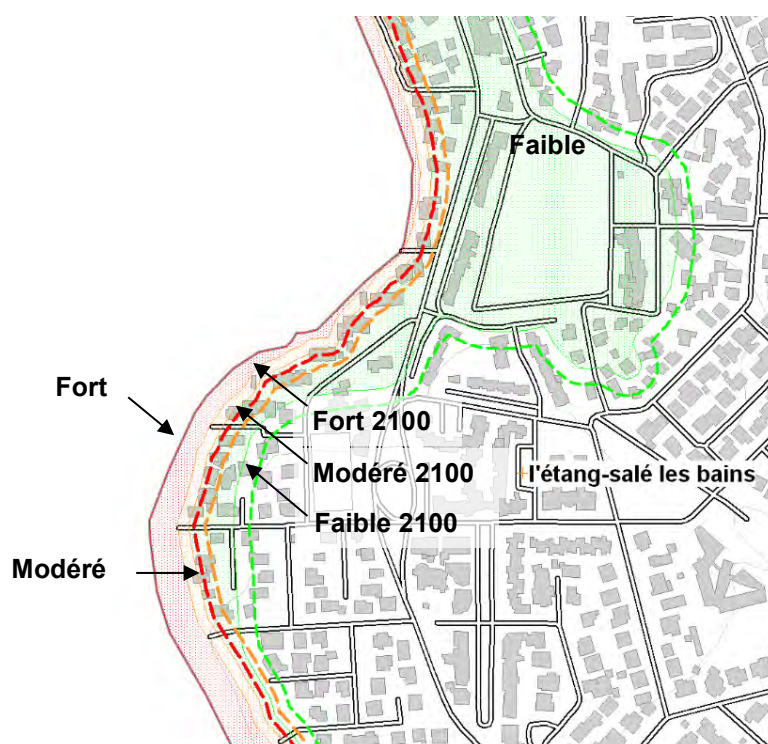


Figure 51 - Exemple de représentation de la notion de continuité du niveau d'aléa submersion marine

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, 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.

6. Elaboration du zonage réglementaire

6.1. METHODOLOGIE

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

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

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

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

- 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 de PPR littoral des communes de l'Étang-Salé et des Avirons.

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. Elle a pour vocation de :

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

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

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

- Les zones de coupure d'urbanisation du Schéma d'Aménagement Régional (SAR du 22 novembre 2011) 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.

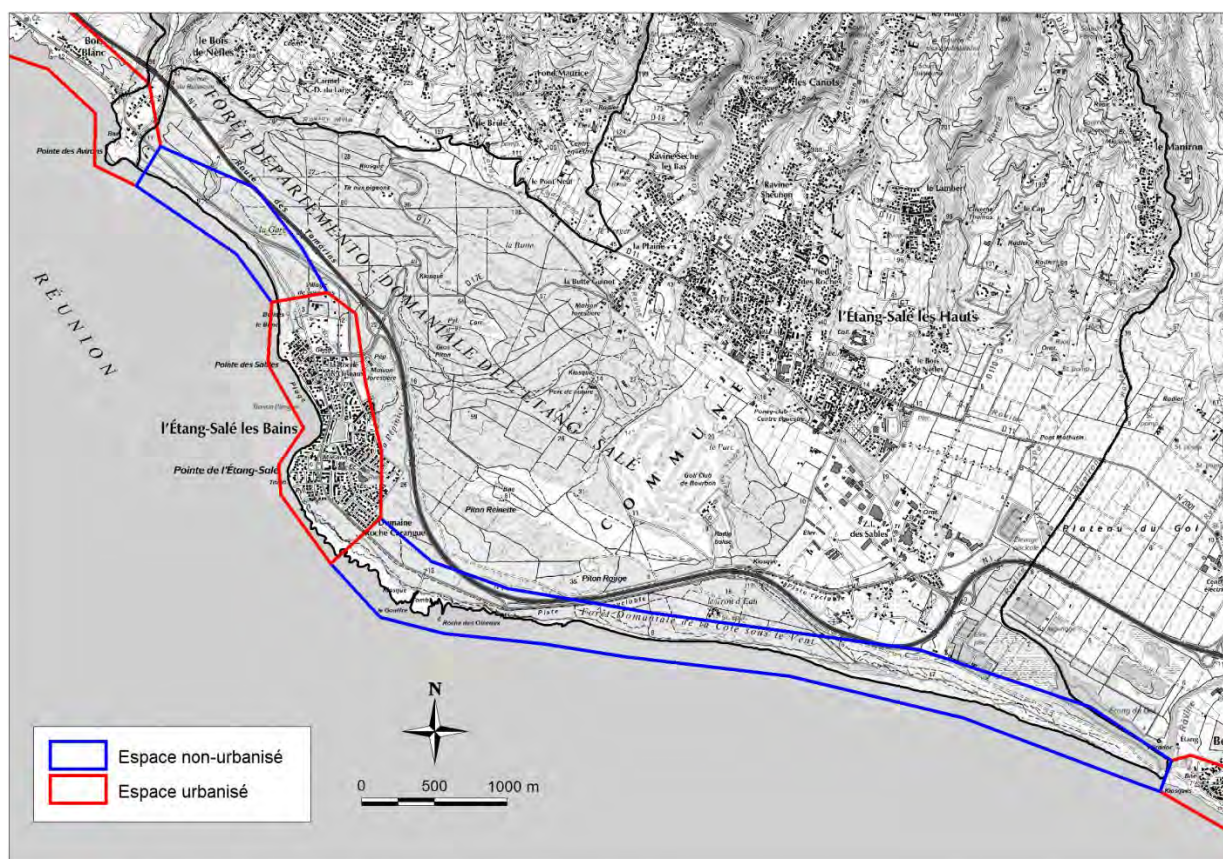


Figure 52 – Délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés sur les littoraux de l'Étang-Salé et des Avirons

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 ces deux aléas avec les espaces urbanisés/non-urbanisés dans un second temps.

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

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

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

A partir de ces dispositions générales et en tenant compte des spécificités communales de l'Étang-Salé et des Avirons, il a été décidé de distinguer les zones réglementaires suivantes :

Principes d'inconstructibilité liés à la submersion :

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

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

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

Tableau 21 – 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 22 - 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'aléa de référence est voué à disparaître à échéance 2100. Pour cette raison, l'aléa RTC est toujours affecté du code degré "fort". Logiquement, l'inconstructibilité est donc la règle pour l'aléa 2100 sans prise en compte du changement climatique. Le guide méthodologique national est d'ailleurs particulièrement explicite à ce sujet :

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

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

Concernant l'aléa RTC avec prise en compte du réchauffement climatique, il a été décidé au vu des spécificités territoriales réunionnaises et des caractéristiques spatialement limitées de l'aléa sur les communes de l'Étang-Salé et des Avirons, 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 référence sans prise en compte du changement climatique.

6.2. TRADUCTION RÉGLEMENTAIRE DES DEUX ALÉAS

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

La DEAL Réunion et les partenaires qui 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 mouvements de terrain), principalement déployés à La Réunion depuis 2012.

Concernant les communes de l'Étang-Salé et des Avirons, 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 des communes de l'Étang-Salé et des Avirons 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
EROSION CÔTIÈRE	Fort	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Fort 2100 ou Nul	Rouge	Rouge	Rouge	Bleue

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

Transcription réglementaire des aléas		SUBMERSION MARINE			
		Fort réf.	Modéré réf.	Faible réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100	Nul réf. ET Fort, Modéré ou Faible 2100
EROSION CÔTIÈRE	Fort	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Fort 2100 ou Nul	Rouge	Rouge	Bleue	Bleue

Tableau 24 - Traduction réglementaire du croisement des aléas submersion marine et recul du trait de côte dans les espaces urbanisés

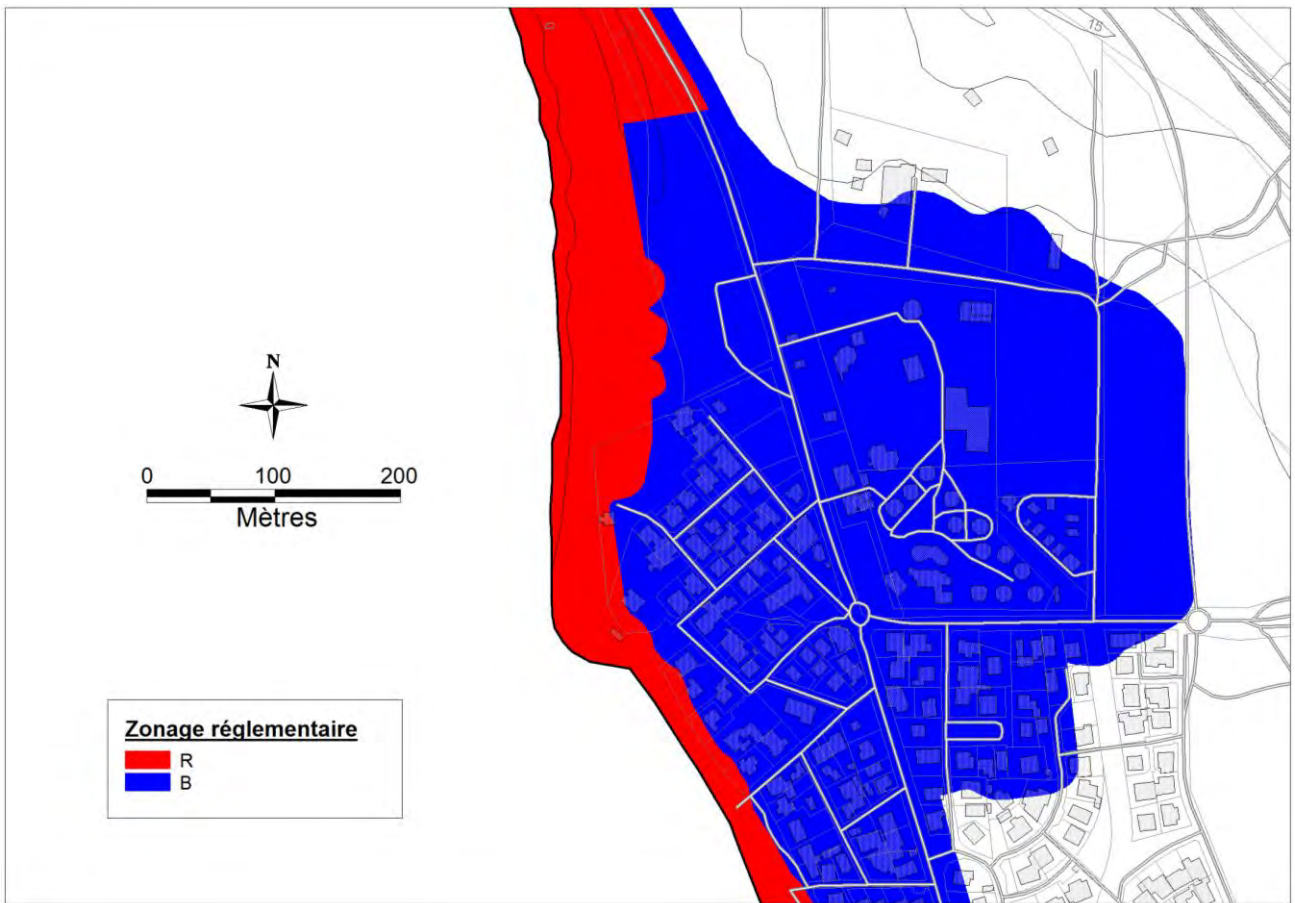


Figure 53 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL sur la commune de l'Étang-Salé (Annexe 6)

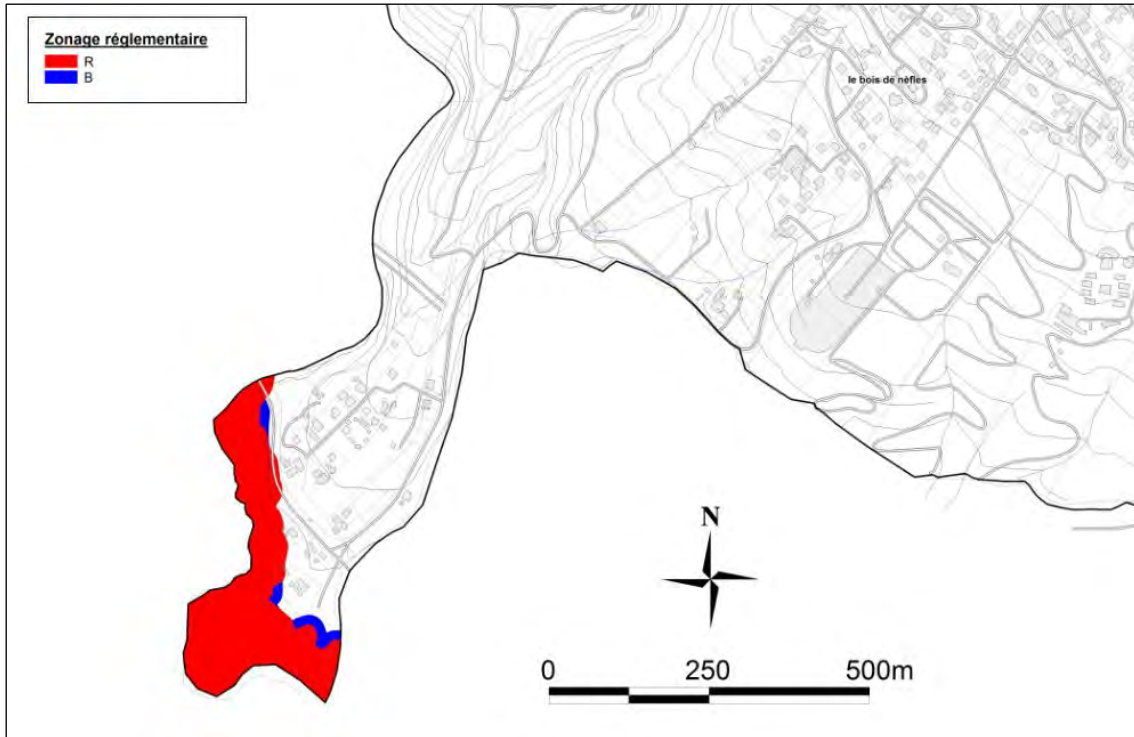


Figure 54 - Extrait de la traduction réglementaire du PPRL sur la commune des Aviron (Annexe 6)

7. Lexique des sigles et termes techniques

Sigles

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

Organismes / Administrations

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

Termes techniques

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

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

Aléa de référence : Au sens du guide national de mai 2014, l'aléa de référence désigne le phénomène naturel engendré par l'évènement de référence du site concerné. Les événements retenus pour la détermination de l'aléa de référence submersion marine intègrent au niveau moyen de la mer une marge d'élévation du niveau de la mer de 20 cm.

Aléa 2100 : Au sens du guide national de mai 2014, l'aléa 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 (Hs) : hauteur caractéristique de l'état de mer, estimée par une analyse statistique des vagues (moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée finie), ou par une analyse spectrale (à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

9. Bibliographie

- Bao S., Xie L. ; Pietrafesa L.J., 2006. An asymmetric wind model for storm surge and wave forecasting. Conference on Hurricanes and tropical meteorology ;
- BCEOM, 2007, modélisation numérique de l'énergie des vagues sur l'île de La Réunion, MAR 50550A ;
- Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, R. Trimmer, J. Von Rosenberg, G. Wallace, P. Weatherall., 2009. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS, *Marine Geodesy*, 32:4, 355-371 ;
- Booij, N., Haagsma IJ.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, 115p ;
- Bretschneider, C.L., 1972. A non-dimensional stationary hurricane wave model. In: Proceedings of the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, vol. I, pp. 51–68 ;
- Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rychlik, J. and Sjö, E., 2000. "WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads", *Proc. 10th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, Seattle, USA, Vol III, pp. 343-350 ;
- Cazes-Duvat V. et Paskoff R., 2004. Les littoraux des Mascareignes entre nature et aménagement, L'Harmattan, 186 p ;
- 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 ;
- DHI, Novembre 2007. Nouvelle liaison Saint Denis ouest La Réunion, étude des houles cycloniques, Rapport final ;
- EGIS EAU, janvier 2008. Etude des houles d'alizés et houles australes, HER / 71112R ;
- Holland G., 1980. An analytic model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review* vol.108 1212-1218 ;
- Hugodot, P., P. Dubois, 2003. Rapport de l'inspection générale de l'environnement, Cyclone Dina à La Réunion les 22 et 23 janvier 2002 ; Caractérisation, conséquences et retour d'expérience ;
- Le Cozannet G., Lecacheux S., Delvallée E., Oliveros C., 2009. Analyse de climats de houle, BRGM/RP 56 878-FR ;
- MAZAS, F., HAMM, L., 2008. Réconcilier théorie et pratique dans la détermination des houles extrêmes, in proc. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis ;
- Soler O., Météo-France, 1997. Atlas climatique de La Réunion, http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/# ;
- 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 ;
- Monbet V., P. Aillot, 2005, Metocean Time Series (METIS) Toolbox Documentation, Ifremer;
- Phadke, A.C., Martino, C.D., Cheung, K.F., and Houston, S.H., 2003. Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management. *Ocean Engineering*, 30(4), 553-578;
- Tolman, H.L., 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222, 133 pp.

Xie L, Bao S., Pietrafesa L.J., Foley k., Fuentes M., 2006. A Real-Time Hurricane Surface Wind Forecasting Model: Formulation and Verification. *American Meteorological Society - Monthly Weather Review*, vol. 134 pp.1355-1370.

Mireille Mayoka, Les cyclones à La Réunion, Saint-André, Direction interrégionale de Météo-France à La Réunion, coll. « Réunion, hommes, nature », avril 1998, 58 p

De La Torre Y., Guide de Gestion de l'érosion du littoral de La Réunion, 2012B. Aunay, S. Bès de Berc, E. Chateauminois, A. Rey, L. Schuller, G. Thirard, C. Vincent (2014) – Impacts du cyclone BEJISA sur l'île de la Réunion. Compte rendu des observations réalisées en janvier 2014. Rapport final. Rapport BRGM/RP-63149-FR. 93 p., 24 fig., 2 tabl., 2 ann

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

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.

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.

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.

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

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

Booij N., Haagsma IJ.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.

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.

Le Roy S. et Pedrerros 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.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

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