



Pacific
Community
Communauté
du Pacifique

RESCCUE

LUTTE CONTRE LE RECUK DU TRAIT DE CÔTE ET L'ÉROSION DES PLAGES

A 'OPUNOHU/MOOREA : DIAGNOSTIC ET PLAN D'ACTION



L'opérateur en charge de la mise en œuvre du projet RESCCUE en Polynésie française, sous le double contrôle de la CPS et du gouvernement de la Polynésie française, représentée par sa Direction de l'Environnement, est :



L'Agence des aires marines protégées avec principalement l'IRCP-EPHE, l'Université de la Polynésie française, Créocéan, le GIE Océanide, PTPU, Vertigo Lab, l'association SOP Manu et plusieurs consultants individuels.

Agence des aires marines protégées

Mahé CHARLES
mahe.charles@aires-marines.fr

Créocéan

Julien GUILLET
guillet@creocean.fr

SOP Manu

Thomas GHESTEMME
tghestemme@manu.pf

PTPU

Charles EGRETAUD
charles.egretau@ptpu.pf

Commune des Gambier

Firmin PAEMARA
mairiederikitea@mail.pf

Jean-François BUTAUD

jfbutaud@hotmail.com

GIE Océanide

Jean-Brice HERRENSCHMIDT
ddatpacific@gmail.com

IRCP-EPHE

Serge PLANES
planes@univ-perp.fr

Vertigo Lab

Thomas BINET
thomasbinet@vertigolab.eu

Université de Polynésie française (UPF)

Nabila GAERTNER-MAZOUNI
nabila.gaertner-mazouni@upf.pf

Hervé LALLEMANT

lallemant.herve@gmail.com

Annie AUBANEL

annie.aubanel.3@gmail.com

Rédacteur Principal/Contributeur (s)	Date de publication
Julien GUILLET, Fany SEGUIN, Anthony MOUCHEL (Créocéan) / Jason VII, Gille SIU, Serge PLANES (IRCP)	À préciser une fois validé

Photographies de couverture : plage publique de Ta'ahiamanu, Moorea (Créocéan, 2016)

Version	Date d'envoi
Version 1 transmise à la DIREN et à la CPS	31/08/2016
Version 2 transmise à la DIREN et à la CPS	30/09/2016

Le projet RESCCUE vise à contribuer à accroître la résilience des pays et territoires insulaires du Pacifique face aux changements globaux par la mise en œuvre de la gestion intégrée des zones côtières (GIZC). Il prévoit notamment de développer des mécanismes de financement innovants pour assurer la pérennité économique et financière des activités entreprises. Ce projet régional opère sur un à deux sites pilotes dans chacun des pays et territoires suivants : Fidji, Nouvelle-Calédonie, Polynésie française et Vanuatu.

RESCCUE est financé principalement par l'Agence française de développement (AFD) et le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM), pour une durée de cinq ans (01/01/2014 - 31/12/2018). Le montant global du projet est estimé à 13 millions d'Euros. La CPS bénéficie d'un financement total de 6,5 millions d'euros : une subvention de l'AFD octroyée en deux tranches (2013 et 2016 à hauteur de 2 et 2,5 millions d'Euros respectivement), et une subvention du FFEM de 2 millions d'Euros. Le projet RESCCUE fait en complément l'objet de cofinancements. Sa maîtrise d'ouvrage est assurée par la CPS, assistée par les gouvernements et administrations des pays et territoires concernés.

RESCCUE est structuré en cinq composantes :

Composante 1 - Gestion intégrée des zones côtières : Il s'agit de soutenir la mise en œuvre de la GIZC « de la crête au tombant » à travers l'élaboration de plans de GIZC, la mise en place de comités ad hoc, le déploiement d'activités concrètes de terrain tant dans les domaines terrestres que marins, le renforcement des capacités et le développement d'activités alternatives génératrices de revenus.

Composante 2 - Analyses économiques : Cette composante soutient l'utilisation d'une large variété d'analyses économiques visant d'une part à quantifier les coûts et bénéfices économiques liés aux activités de GIZC, d'autre part à appuyer diverses mesures de gestion, politiques publiques et mises en place de mécanismes économiques et financiers.

Composante 3 - Mécanismes économiques et financiers : Il s'agit de soutenir la mise en place de mécanismes économiques et financiers pérennes et additionnels pour la mise en œuvre de la GIZC : identification des options possibles (paiements pour services écosystémiques, redevances, taxes, fonds fiduciaires, marchés de quotas, compensation, certification...) ; études de faisabilité ; mise en place ; suivi.

Composante 4 - Communication, capitalisation et dissémination des résultats du projet dans le Pacifique : Cette composante permet de dépasser le cadre des sites pilotes pour avoir des impacts aux niveaux national et régional, en favorisant les échanges d'expérience entre sites du projet, les expertises transversales, la dissémination des résultats en particulier au cours d'événements à destination des décideurs régionaux, etc.

Composante 5 - Gestion du projet : Cette composante fournit les moyens d'assurer la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre du projet, l'organisation des réunions des comités de pilotage, des évaluations et audits, etc.

SOMMAIRE

1.	RESUME DU RAPPORT	1
2.	Préambule	4
3.	Choix de la zone d'étude et sa localisation géographique	5
3.1	Choix de la zone d'étude	5
3.2	Résultats	5
3.3	Localisation du site	6
4.	Historique et évolution de la plage de Ta'ahiamanu	7
4.1	Historique	7
4.2	Evolution du littoral de Ta'ahiamanu	7
4.3	Indices et répartitions des désordres	9
5.	Caractéristiques physiques de la zone d'étude	14
5.1	Caractéristiques géographiques	14
5.2	Géomorphologie	15
5.3	Contexte hydrodynamique	18
5.4	Sédimentologie	27
5.5	processus sédimentaires	30
6.	Enjeux aleas et risques du site	40
7.	Préconisations d'ouvrages pour lutter contre les phénomènes érosifs	40
7.1	Bibliographie	40
7.2	Propositions d'aménagements applicables à Ta'ahiamanu	46
7.3	Synthèse des coûts des solutions envisagées	61
7.4	Planning	63
8.	Bibliographie	64
9.	Annexes	65
9.1	Résultats de la granulométrie	66
9.2	Modélisation hydrodynamique	69
9.3	Annexe 5 : Traits de côte de Ta'ahiamanu de 1955 à 2014	72

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Compilation des traits de côte depuis 1955 de la baie de Opunohu. (Cercles bleus : zone de plus grande stabilité ; cercles rouges : zone de plus fort changement géomorphologique) (IRCP-EPHE)	5
Figure 2: Localisation de Moorea (a) et zoom de la plage du site de Ta'ahiamanu (b) au NE de la baie d'Opunohu (149°50'O ; 17°30'S)	6
Figure 3 : Graphique des surfaces d'érosion et d'accrétion de la plage de Ta'ahiamanu entre 1955 et 2014 et évolution de la ligne de rivage (extrait rapport IRCP-EPHE)	8
Figure 4 : Exemple de photos aériennes (1955, 1981 et 2014) montrant la régression progressive de la surface de la plage.....	8
Figure 5 : Mise en évidence de la zone d'accrétion de la partie au nord de la plage de 1997 à 2014....	9
Figure 6 : Compartimentation de la zone d'étude	10
Figure 7 : Identification des désordres causés par l'érosion dans la zone E	12
Figure 8 : Identification des désordres causés par l'érosion dans la zone E au niveau de la plage sous-marine	13
Figure 9 : Caractérisation de la ligne de rivage de Ta'ahiamanu et ses environs (Benet 2010).....	15
Figure 10 : Les unités géomorphologiques du site.....	16
Figure 11 : Bathymétrie de la zone d'étude au niveau du lagon (source : Créocéan)	17
Figure 12 : Provenance et intensité des vents à Tahiti Faa'a (Météo France) à gauche et Rose des vents au point IOWAGA (à droite).....	19
Figure 13 : Rose des houles au point IOWAGA	19
Figure 14 : Analyse statistique des houles extrêmes au point IOWAGA (méthode POT)	20
Figure 16 : Cas n° 1 SW : Hauteur significative et direction des vagues (à gauche) / Cas n° 1 HD : Vitesse et direction des courants induits par les vagues (à droite)	21
Figure 17 : Zoom : Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite).....	22
Figure 18 : Cas n°3 Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / Cas 3 HD : Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite).....	22
Figure 19 : Zoom Cas 3 : Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite)	23
Figure 20 : Cas 6 : Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / zoom HD : Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite).....	23
Figure 21 : Aléa surcote marine sur la zone d'étude (PPR de Moorea, BRGM)	25
Figure 22 : Schéma de fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude en période agitée.....	27
Figure 23: Géomorphologie schématique (échelle non respectée) de la zone d'étude. Vue en coupe devant la plage de Ta'ahiamanu.....	27
Figure 24 : Répartition géographique des échantillons soumis à l'analyse granulométrique	28
Figure 25 : Résultats caractéristiques	30
Figure 26 : Schématisation des échanges sédimentaires.....	33
Figure 27 : Localisation des secteurs à risque	40
Figure 28 : Principe de fonctionnement des épis transversaux (image : les Tipaniers-Moorea).....	46
Figure 29 : Principe de l'affouillement au pied d'un ouvrage (murs de bas de plage ou enrochement), disparition de la plage au pied des ouvrages	47
Figure 30 : Schéma d'un profil de plage en érosion actuel et après traitement.....	48
Figure 31 : Vue en plan de la zone de rechargement proposée	49
Figure 32 : Vue en coupe du rechargement de plage proposé	49

Figure 33 : Schéma de fonctionnement d'un ouvrage sous-marin type « butée de pied ».....	51
Figure 34 : Implantation de l'ouvrage sous-marin en conteneurs géotextile	53
Figure 35 : Coupe type de l'ouvrage sous-marin en conteneurs géotextiles.....	54
Figure 36 : Implantation de l'ouvrage en enrochements.....	54
Figure 37 : Coupe type de l'ouvrage sous-marin en enrochements	55
Figure 38 : Schéma de principe de revégétalisation d'un haut de plage (source : PROE)	56
Figure 39 : Implantation proposée des plantations expérimentales	58
Figure 40 : Maillage et bathymétrie du modèle.....	70
Figure 41 : Maillage et bathymétrie du modèle - Zoom	71

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1: <i>Historique des évènements</i> naturels et anthropiques ayant eu une influence sur le site d'étude	7
Tableau 2: Bathymétrie intra-lagonaire au large de la plage de Ta'ahiamanu	16
Tableau 3 : Synthèse des conditions simulées	21
Tableau 4 : Diamètre des tamis utilisés et sédiments correspondants	28
Tableau 5 : Conséquences des aménagements du littoral sur les processus hydrosédimentaires.....	38
Tableau 6 : Solutions existantes de lutte contre l'érosion applicables au site de Ta'ahiamanu – OUVRAGES EN DUR.....	43
Tableau 7 : Solutions existantes de lutte contre l'érosion applicables au site de Ta'ahiamanu – AMENAGEMENTS SOUPLES.....	44

1. RESUME DU RAPPORT

Dans le cadre du projet RESCCUE, la baie de 'Opunohu à Moorea a été sélectionnée par le Pays et la commune de Moorea-Maiao comme site pilote (allant du quai de Papetoai à l'hôtel Hilton) pour suivre l'évolution de son littoral ces 50 dernières années. L'évolution du trait de côte par analyse des photos aériennes à disposition (chapitre 3) nous indique **une régression à long terme de la surface de la plage de Ta'ahiamanu de 60%** environ (IRCP/EPHE). L'évolution des surfaces de la plage au cours du temps montre de fortes périodes érosives en alternance avec de faibles périodes d'engraissement. De plus, les photos montrent un rivage qui s'est fortement artificialisé ces dernières décennies de part et d'autre du site.

Cette évolution du trait de côte depuis plusieurs décennies ainsi que l'observation de nombreux désordres sur le terrain (encoches d'érosion, talus verticaux, arbres déracinés...) montrent que la plage de Ta'ahiamanu est soumise à **des phénomènes récurrents d'érosion** le long de son rivage. Cette érosion relativement importante se **focalise sur la moitié Sud de la plage** et a pour conséquence actuelle la disparition de la plage ainsi que la présence de zones dangereuses pour la baignade à certains endroits (chapitre 4).



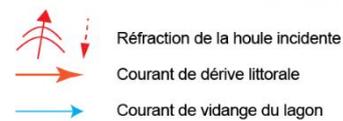
Afin de mieux comprendre les mécanismes responsables de cette érosion et de proposer des solutions pour y faire face qui soient adaptées au contexte, les processus sédimentaires et hydrodynamiques de la zone ont été étudiés en détail dans le chapitre 5 (à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire). Pour cela, des plans topographiques ainsi que des cartes bathymétriques du site ont été réalisées. Par la suite, des modèles numériques intégrant ces données sous différents forçages hydrodynamiques ont permis de caractériser l'agitation résultante dans la zone (houles résiduelles et intensités des courants). Les différentes zones de la plage ont également été soumises à une étude granulométrique.

D'un point de vue sédimentaire, la plage de Ta'ahiamanu est essentiellement composée de sables blancs détritiques et carbonatés. De plus, la zone montre des lacunes dans les apports de ces sables. Ce déficit sédimentaire est principalement dû à l'artificialisation omniprésente depuis les années 1980 de part et d'autre du site pilote qui impacte considérablement les transferts sédimentaires longitudinaux Nord-Sud. De plus, la présence de talus verticaux et l'absence de dunes en arrière-plage dans la partie érodée de la plage a pour conséquence un déséquilibre dans les transferts sédimentaires transversaux du bas vers le haut de plage, **le bilan sédimentaire apparaît donc négatif.**

D'un point de vue hydrodynamique, les résultats des modèles montrent que la partie Sud de la plage est largement plus exposée à la houle que la partie Nord avec une agitation résiduelle pouvant atteindre 0.8 m. De plus, en période agitée (saison des houles de nord, principalement de décembre à avril), à l'échelle de la plage, on constate que des courants forts longent la plage du Nord-est vers le Sud-ouest, avec un pic de vitesse atteint dans le chenal. Un courant de retour antihoraire apparaît

clairement dans toutes les conditions de houle du large au niveau de la partie Sud de la plage. **Ce courant favorise l'érosion de la plage Sud, en entraînant dans le chenal les sédiments remis en suspension par l'action conjointe de la houle et du courant lui-même. Les sédiments ainsi expulsés ne peuvent plus réintégrer la cellule sédimentaire de la plage, piégés par la fosse que constitue le chenal, et exportés vers le large par les forts courants qui s'y concentrent.** Ces pertes sédimentaires ne sont en outre pas compensées par les éventuels apports par le Nord.

Il est très probable qu'en dehors des événements de forte énergie, le bilan hydrosédimentaire de la plage soit à l'équilibre, voir en reconstruction grâce aux apports provenant du nord qui peuvent tout à fait se déposer sur les zones Sud de la plage. **Malgré un régime calme dominant au cours de l'année, quelques événements forts peuvent suffire à rendre ce bilan global négatif.**



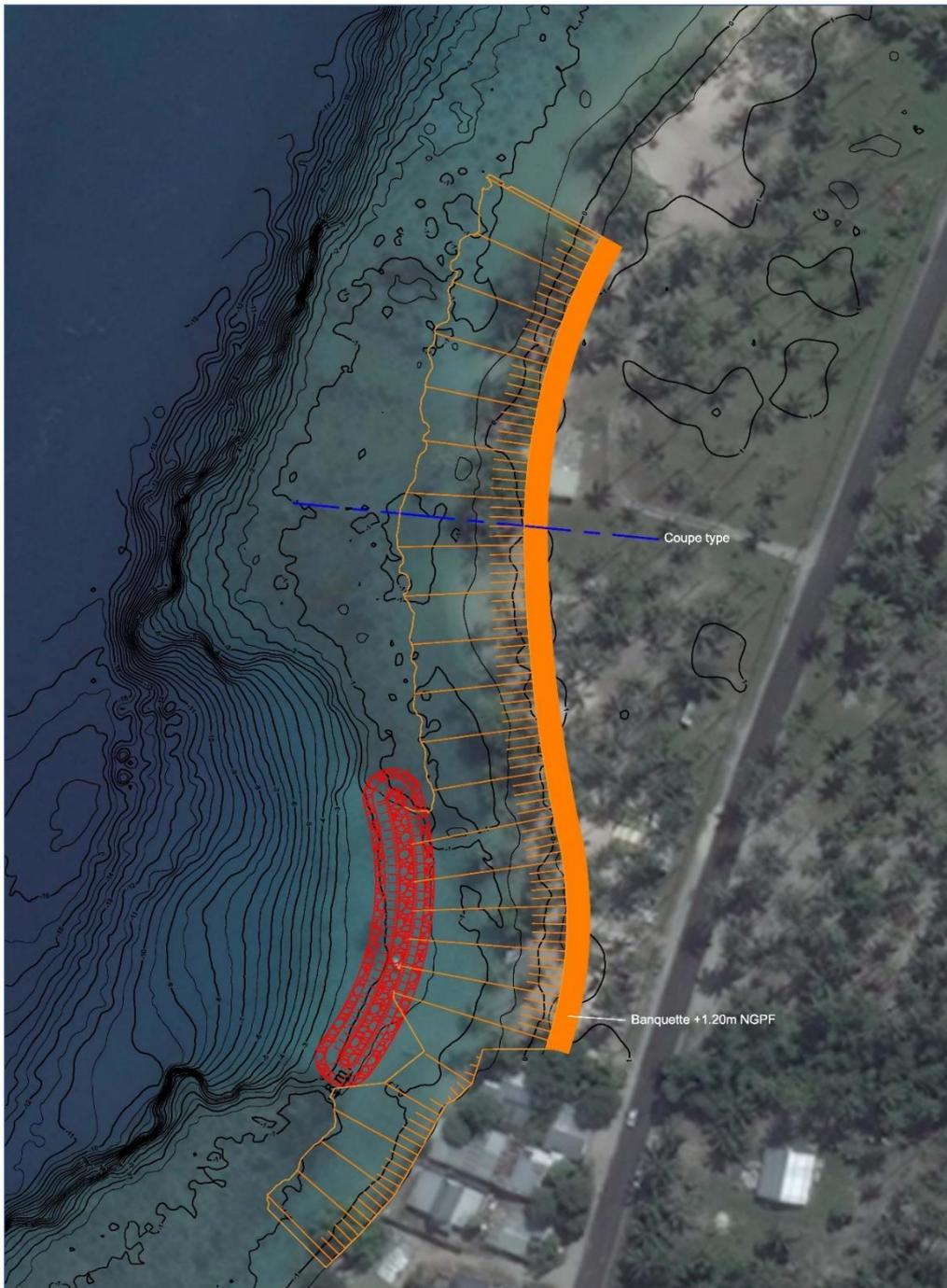
Le chapitre 6 présente l'impact des aménagements et des désordres du rivage sur ces processus hydrosédimentaires. Ces infrastructures au Sud de la plage interdisent aujourd'hui certains échanges sédimentaires longitudinaux. Les désordres eux-mêmes influencent la dynamique de déferlement des houles avec des modifications de la courbure des vagues et des intensités de courants induits qui accentuent encore plus les conséquences sur ce rivage fragile.

Sans intervention préventive, il est très probable que la plage continue progressivement à perdre de sa surface et que les désordres s'accroissent avec le temps. Pour pallier au phénomène érosif actuel, plusieurs solutions techniques sont proposées sur la base de l'état de l'art et des exemples existants par ailleurs tout en tenant compte des spécificités du site (chapitre 7). L'encadré suivant résume les actions proposées pour améliorer la résilience de la plage sur le long terme.

- **Recharger le site en sables et rééquilibrer les pentes de plage afin d'atténuer les houles résiduelles frontales à la plage. Les zones de prélèvements potentielles, principalement pressenties dans le chenal (zone de stockage des sables repris sur la plage) restent à être validées ;**
- **Limiter la perte de sédiment vers le large dans les zones à risque (partie Sud de la plage) par l'implantation d'un ouvrage sous-marin agissant comme butée de pied de la plage ;**
- **Revégétaliser le haut de plage et l'arrière plage et éviter le piétinement dans certaines zones afin de mieux fixer les sédiments.**

Les caractéristiques des actions proposées sont précisées en termes de **rôle vis-à-vis des objectifs visés, de géométrie, d'emplacement et de dimensionnement, ainsi qu'au niveau des évolutions attendues à moyen terme. Enfin une estimation du coût des travaux est fournie.**

La Polynésie française est à ce jour fortement touchée par l'érosion de ses littoraux, notamment de ses plages blanches coralliennes qui font sa renommée internationale. Ces études réalisées sur le site pilote de Ta'ahiamanu à Moorea, l'une des rares plages publiques de l'île très fréquentée par la population et les visiteurs, doivent permettre de prendre conscience de l'urgence qu'il y a des efforts à faire pour lutter intelligemment face aux problèmes d'érosion dans un contexte de forte artificialisation des rivages et de l'élévation en cours du niveau des océans.



Rechargement de la plage de Ta'ahiamanu et implantation d'un ouvrage sous-marin de bas de plage

2. PREAMBULE

Plus de 47% du rivage de l'île de Moorea est aujourd'hui anthropisé (Aubanel, Polti). La conséquence directe de l'artificialisation du littoral est une diminution de 33% à 18% des plages de sable blanc de 1993 à 2001 (Polti, 2001).

Le site retenu au sein de la baie de 'Opunohu pour traiter des problématiques d'érosion est la plage publique de Taa'hiamanu. Cette plage présente un intérêt particulier au sein de la baie et également à l'échelle de l'île de Moorea. C'est le vestige de la bande sableuse corallienne que l'on retrouvait auparavant sur une grande partie du rivage de la baie et de l'île. Pour différentes raisons principalement liées aux prélèvements dont elle a été victime et aux aménagements du trait de côte qui l'encerclent, elle subit depuis de longues années un phénomène érosif qui tend à s'accélérer sur sa partie Sud.

Outre l'importance culturelle pour la population de l'île, la plage revêt un intérêt paysager, environnemental et touristique majeur, que le Pays au travers du Service du tourisme souhaite s'attacher à mettre en valeur via certains aménagements.

La problématique de lutte contre l'érosion observée reste toutefois un préalable indispensable à traiter pour maintenir la plage dans un état compatible avec l'accueil du public.

Les objectifs du travail mis en œuvre au sein du programme RESCCUE sont de :

- 1) Réaliser un diagnostic du site
- 2) Comprendre les mécanismes qui régissent son fonctionnement
- 3) Proposer des actions les plus souples possibles permettant de réduire le phénomène érosif, tout en maintenant le site le plus naturel possible, c'est-à-dire sans aménagements durs de haut de plage
- 4) Réaliser des actions de sensibilisation et de communication auprès de la population, de la commune et des services du Pays.

3. CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE ET SA LOCALISATION GEOGRAPHIQUE

Ce chapitre synthétise les résultats de l'étude menée par l'IRCP/EPHE dans le cadre du projet RESCCUE : Evolution du littoral de la baie de 'Opunohu de Moorea de 1955 à nos jours.

3.1 CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE

Dans le cadre du projet RESCCUE, la baie de 'Opunohu à Moorea a été définie comme site pilote (allant du quai de Papetoai à l'hôtel Hilton) pour suivre l'évolution de son littoral ces 50 dernières années puis caractériser et comprendre les mouvements dans le profil de son littoral pour établir une expertise technique afin de proposer des solutions dites « douces » dans la gestion de son rivage face aux aléas et risques environnementaux, notamment les risques liés à l'érosion et la submersion marine. Pour cela, l'IRCP a dans un premier temps réalisé une analyse diachronique SIG des premières photographies aériennes depuis 1955.

3.2 RESULTATS

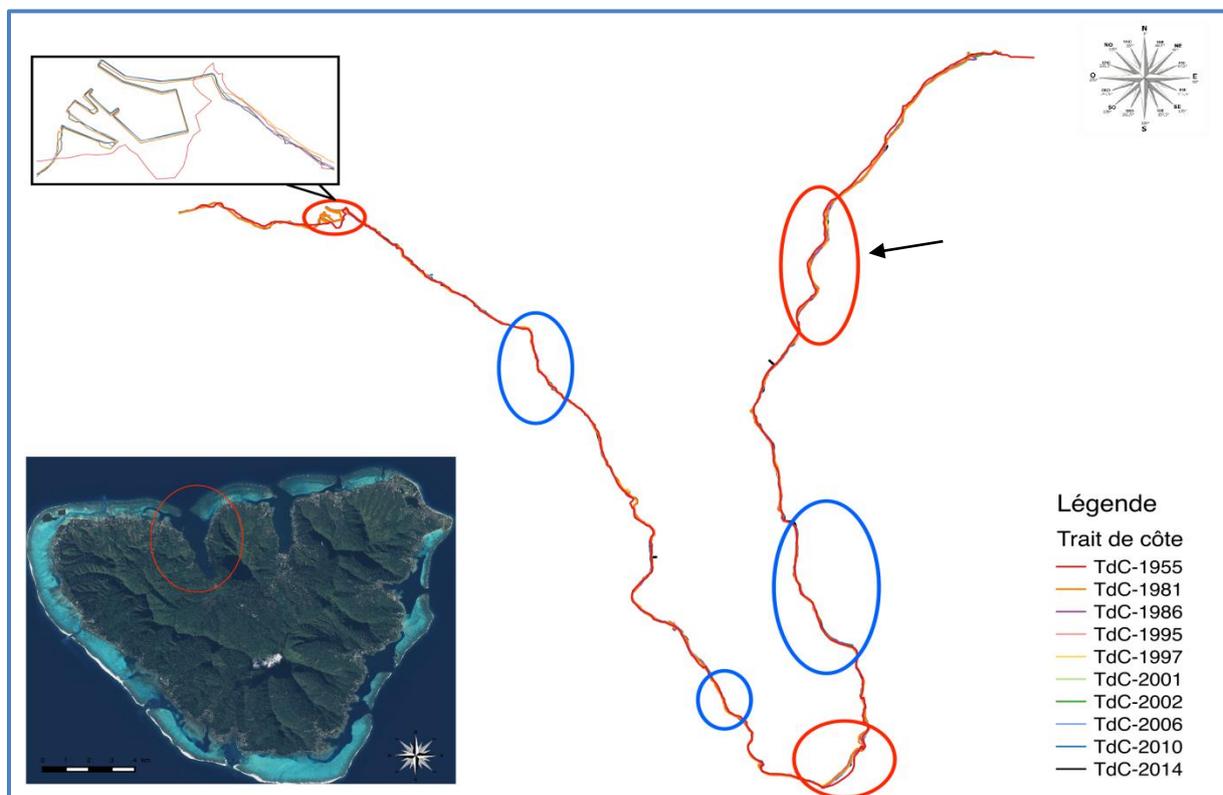


Figure 1 : Compilation des traits de côte depuis 1955 de la baie de 'Opunohu. (Cercles bleus : zone de plus grande stabilité ; cercles rouges : zone de plus fort changement géomorphologique) (IRCP-EPHE)

La baie de 'Opunohu montre de nombreux sites à forte stabilité, représentés par les cercles bleus (Figure 1), mais aussi des zones à forts changements morphologiques représentés par des cercles rouges qui indiquent trois « Hot spots » de modification du rivage :

- Le quai de Papetoai
- Le fond de baie
- La plage du site de Ta'ahiamanu

L'étude de ces « Hot spots » a montré une tendance d'engraissement du fond de la baie de 'Opunohu et à l'opposé une forte **tendance érosive de la plage de Ta'ahiamanu** entourée d'un cercle rouge (flèche, figure 1). En effet, la plage a connu une **régression d'environ 60%** de sa surface de sable blanc depuis 1955 et une **augmentation de l'anthropisation et de l'artificialisation** des rivages l'entourant (Figure 9).

Ce site très fréquenté par la population de l'île représente également une **forte attractivité touristique** de part la beauté du lieu, la forte fréquentation mais aussi par la présence au large d'une zone de mouillage pour bateaux. De plus, le service du tourisme, affectataire de la zone, a comme projet d'aménager les espaces en arrière de la plage et en arrière de la route littorale (snacks, parkings, douches...) ce qui confère au site de Ta'ahiamanu de **forts enjeux économiques et environnementaux** exposés aux aléas climatiques et notamment aux risques très forts d'érosion de son rivage.

3.3 LOCALISATION DU SITE

Le site public de Ta'ahiamanu se situe sur la côte Nord de l'île de Moorea à l'entrée Est de la baie de 'Opunohu. Le site est géographiquement situé entre les communes de Papetoai (commune associée) à l'Ouest et de Piha'ena à l'Est.



Figure 2: Localisation de Moorea (a) et zoom de la plage du site de Ta'ahiamanu (b) au NE de la baie d'Opunohu (149°50'O ; 17°30'S)

4. HISTORIQUE ET EVOLUTION DE LA PLAGES DE TA'AHIAMANU

4.1 HISTORIQUE

Tableau 1: *Historique des évènements naturels et anthropiques ayant eu une influence sur le site d'étude*

Date	Evènement	Commentaires
Années 60	<ul style="list-style-type: none"> Construction de la route littorale 	<ul style="list-style-type: none"> Proximité du rivage Extraction de matériaux pour sa construction et sa protection ➤ Possibles impacts au sein des transports sédimentaires de la zone
Années 80	<ul style="list-style-type: none"> Intensification des constructions des maisons en bord de mer Mise en place d'une digue sous-marine transversale (enrochements) Mis en place de pontons transversaux à 500 m au nord du site 	<ul style="list-style-type: none"> Apparition de nombreux murets d'enrochements au Nord et Sud de la plage ➤ Conséquences sur les transferts sédimentaires ➤ Impacts sur l'agitation au pied des ouvrages de protection
1983-2010	<ul style="list-style-type: none"> Veena et Reva en 1983 au stade de cyclone. Plus à l'ouest : Osea en 1997 et Oli en 2010 	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation du rivage, gros impacts sur la végétation du site Perte / gain d'une importante superficie de la plage selon l'évènement sans études de suivis
Ponctuellement	<ul style="list-style-type: none"> Extractions de matériel dans le lagon ou au niveau de la plage Rechargements artificiels réguliers de la plage du Hilton (provenance terrestre a priori) 	<p>Les extractions sont interdites de manière générale (Délibération 82-92 AT du 16/09/82) mais ces évènements ont lieu ponctuellement et impactent sur le stock de sédiments de la zone.</p>

4.2 EVOLUTION DU LITTORAL DE TA'AHIAMANU

Défini comme un « hotspot » de modification, le littoral de Ta'ahiamanu témoigne **d'une régression progressive de la surface de sa plage ces 50 dernières années**. En s'appuyant sur l'analyse diachronique des photos aériennes, on estime à **60% la surface de plage de sable blanc perdue depuis 1955**.

La figure suivante montre l'estimation des surfaces alternativement perdues puis gagnées de 1981 à 2014, on note alors :

- **Une période d'érosion** avec un total de surface érodée d'environ 5 000 m². Ce taux d'érosion est le plus élevé durant la période de 1986 à 1997.
- **Une période de stabilisation ou légère accrétion** de 2002 à 2010, associée à un engraissement de la plage avec un gain de surface estimé à 383 m².
- **une accrétion progressive de la partie Nord** de la plage de 1997 à aujourd'hui à hauteur de 585 m², mise en évidence sur la figure 5.

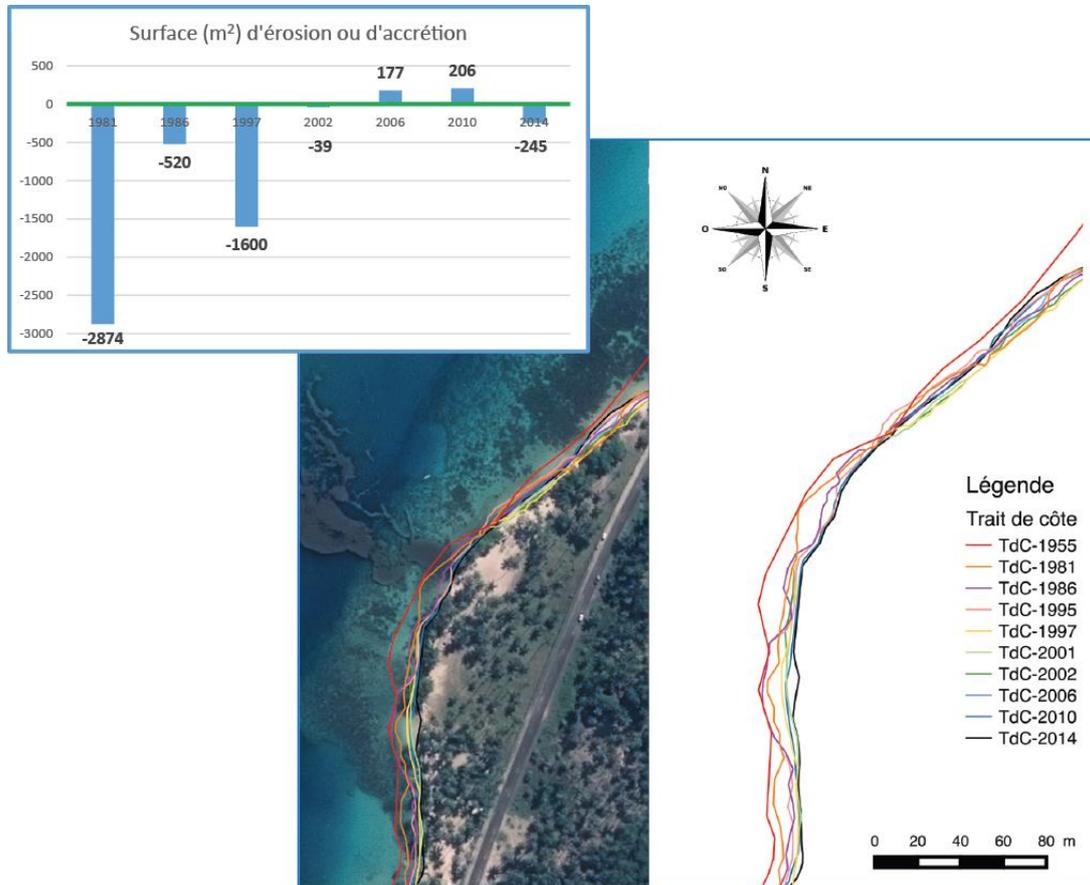


Figure 3 : Graphique des surfaces d'érosion et d'accrétion de la plage de Ta'ahiamanu entre 1955 et 2014 et évolution de la ligne de rivage (extrait rapport IRCP-EPHE)

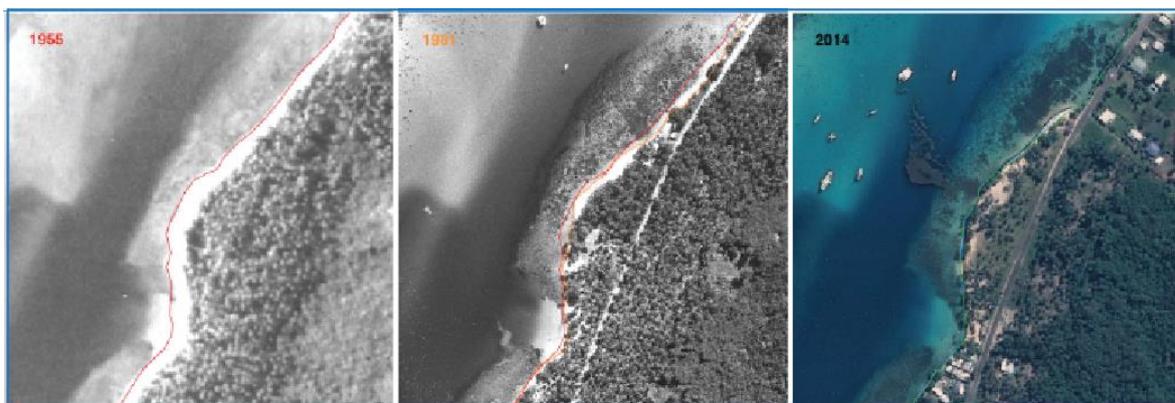


Figure 4 : Exemple de photos aériennes (1955, 1981 et 2014) montrant la régression progressive de la surface de la plage

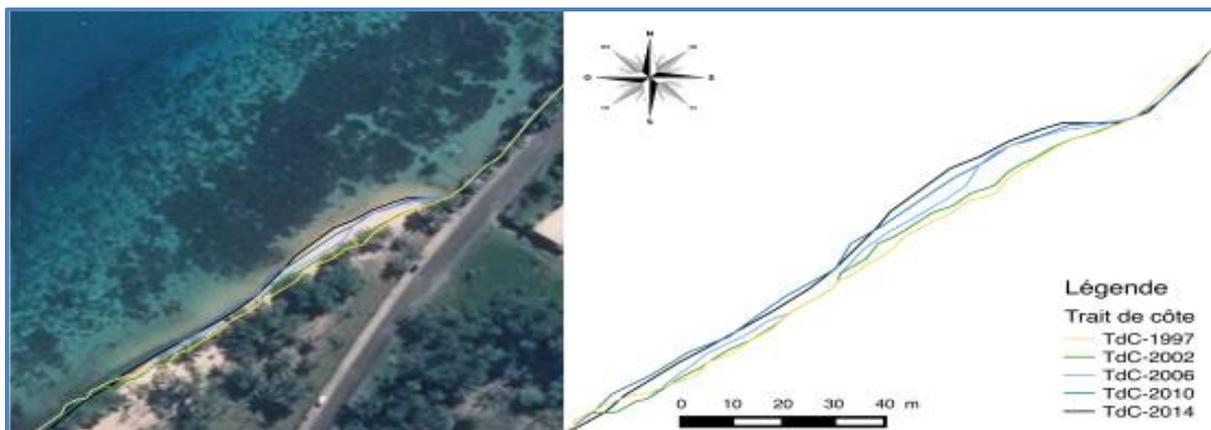


Figure 5 : Mise en évidence de la zone d'accrétion de la partie au nord de la plage de 1997 à 2014

→ L'évolution du trait de côte par analyse des photos aériennes à disposition indique :

- Une régression à long terme de la surface de la plage (60%)
- De fortes périodes érosives en alternance avec de faibles périodes d'engraissement
- Une partie nord de la plage qui évolue positivement avec une période d'engraissement ces dernières années
- Un rivage qui s'est fortement artificialisé ces dernières décennies de part et d'autre du site

4.3 INDICES ET REPARTITIONS DES DESORDRES

4.3.1 COMPARTIMENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'étude de l'évolution du trait de côte et les observations réalisées sur le terrain indiquent que la plage est soumise à **de forts changements** le long de son rivage. Afin d'anticiper les processus hydrosédimentaires qui régissent la plage et afin de repérer les indices de ces changements, il est utile de définir des zones le long de la plage pour faciliter par la suite la compréhension des mécanismes qui la régissent :

- **Zone A** : Partie nord de la plage qui apparaît stable et en légère **accrétion**. C'est la zone qui dispose de la plus large bande sableuse, aucun désordre observé.
- **Zone S** : Partie centrale de la plage qui apparaît **stable** mais présente quelques désordres. C'est aussi la zone de confort pour les baigneurs.
- **Zone E** : Tiers Sud de la plage qui présente de forts désordres et qui semble soumis à de fortes **érosions** (partie elle-même **divisée en 2 zones E1, E2** ; du nord au Sud). A certains endroits, la plage n'existe plus et les arbres en travers ne permettent plus un accès sécurisé.

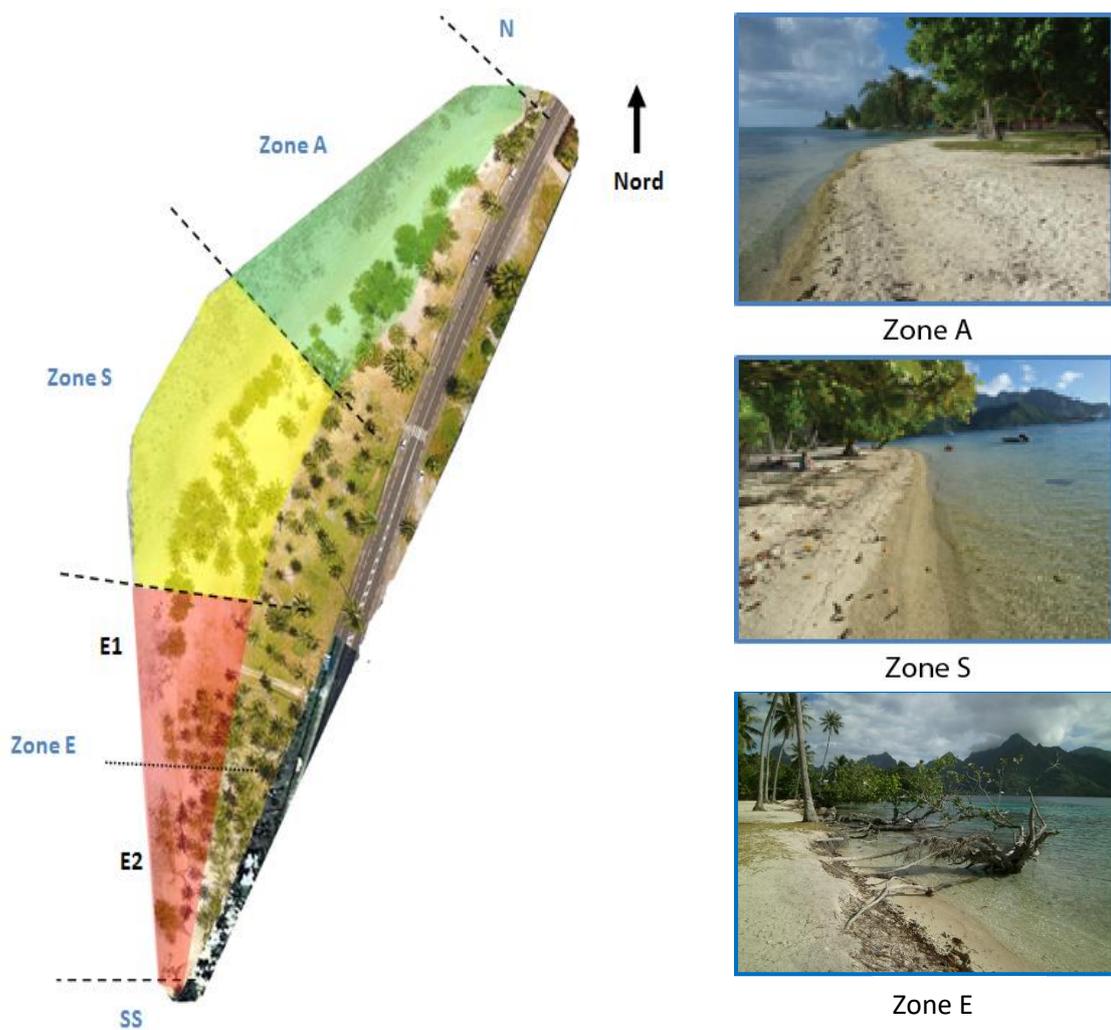


Figure 6 : Compartimentation de la zone d'étude

Note : Une zone N et une zone SS seront aussi utilisées et correspondent à la zone au-delà des limites de la plage respectivement au Nord et au Sud.

La plage est définie comme la zone comprise entre le haut du talus et l'altitude zéro de référence. L'arrière plage est définie ici comme la zone comprise entre le haut du talus et la route (surface d'environ 10km²).

La plage de Ta'ahiamanu peut être assimilée à une cellule hydrosédimentaire propre, cernée au Nord et au Sud par un littoral artificialisé (muret et enrochement), à l'Ouest par un récif frangeant et le chenal, et à l'Est par la route de ceinture. La réflexion concernant le fonctionnement du site sera donc menée à l'échelle de la plage et de ses limites physiques avec lesquelles elle interagira.

4.3.2 LOCALISATION ET CARACTERISTIQUES DES DESORDRES OBSERVES

L'observation sur le terrain montre un rivage présentant des caractéristiques bien différentes du Nord au Sud avec :

Zone	Caractéristiques du rivage	
A	<ul style="list-style-type: none"> • Belle plage de sable blanc • Pente de plage faible • Talus de haut de plage se confondant avec l'arrière plage • Végétation intacte 	Zone de confort de la plage
S	<ul style="list-style-type: none"> • Bande de plage encore présente mais réduite • Zone de baignade préférentielle (récif adjacent peu compact au large) • Nombreuses racines d'arbres (<i>purau</i>) attaquées par les vagues • Talus du haut de plage qui commence à se prononcer (environ 30 cm) 	Zone tampon de la plage
E	<ul style="list-style-type: none"> • Arbres tombés dans l'eau (a) (b) (d) • Arbres déracinés prêts à tomber (c) (h) • Racines apparentes des <i>purau</i> (hibiscus tilleul bord de mer) tout le long du rivage (h) (i) (j) (k) • Talus d'érosion à la verticale atteignant 1.20m de haut (i) (j) • Dépression dans le rivage due à une partie du beachrock cassé (f) • Morceaux de beachrock transportés en haut de plage (g) • Murets détruits, enrochements instables, sortie d'exutoire cassée et barrière brisée (e) <p><i>Note : La plage est quasi-inexistante tout le long du profil de la zone E et difficile d'accès pour la baignade, ce qui représente 40% de la longueur totale de la plage.</i></p>	<p>Zone soumise aux désordres</p> <p><i>Voir figure 7 page suivante</i></p>

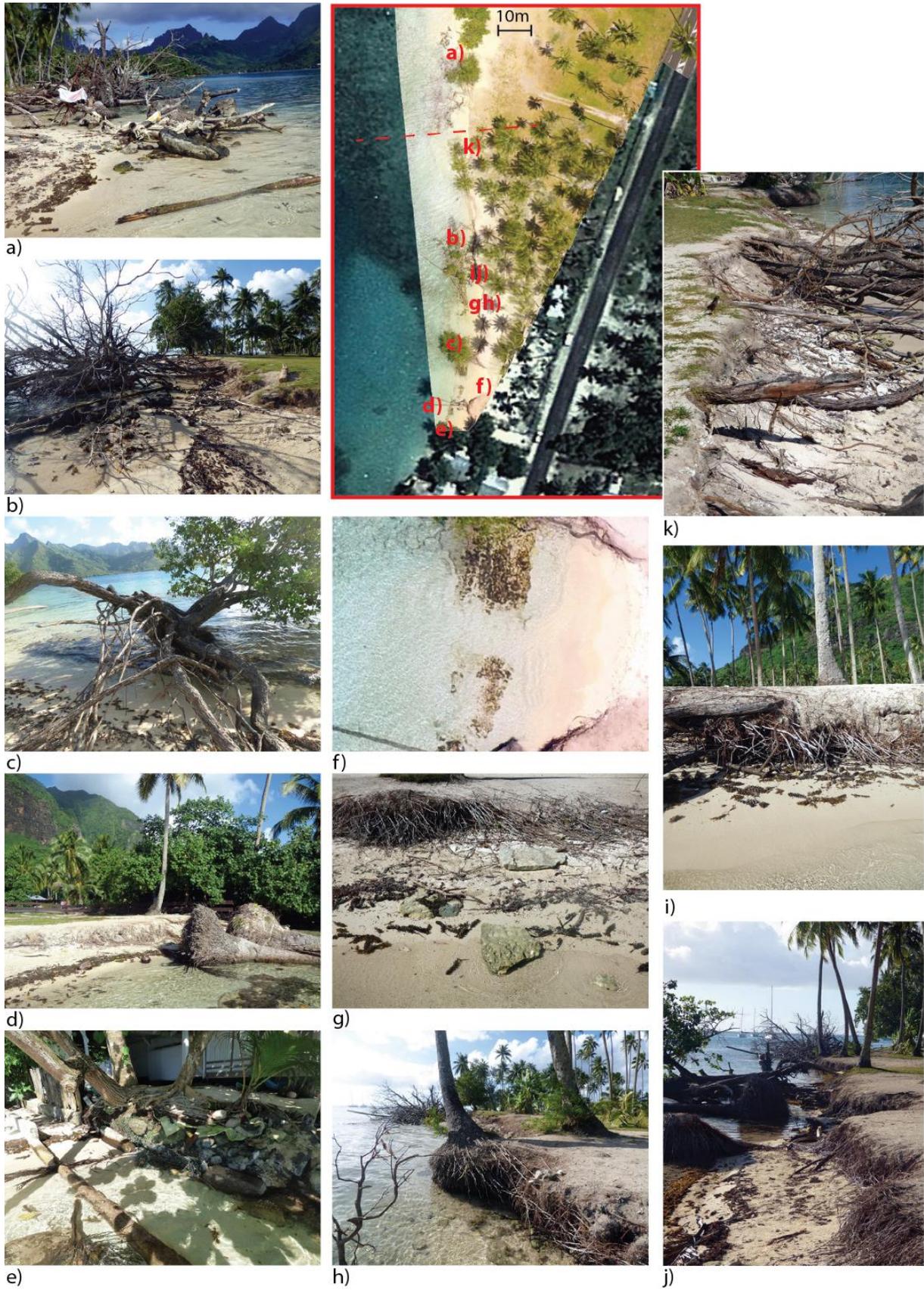


Figure 7 : Identification des désordres causés par l'érosion dans la zone E

Au niveau de la **plage sous-marine de la zone E**, on constate également de nombreux désordres :

- Destruction partielle du beachrock, morceaux éparpillés en bas de plage **(l)**
- Passage à bateaux à travers la bande de beachrock large de 3m **(f) (o)**
- Récif frangeant à découvert sur certaines zones / présence de débris d'enrochements emportés au large **(m)**
- Troncs d'arbres en travers à 1m de profondeur
- Plot en béton et nombreux morceaux cimentés se trouvant dans la zone de baignade **(n)**



l)



m)



n)



o)

Figure 8 : Identification des désordres causés par l'érosion dans la zone E au niveau de la plage sous-marine

→ L'évolution du trait de côte depuis plusieurs décennies ainsi que l'observation de nombreux désordres sur le terrain montrent que la plage de Ta'ahiamanu est soumise à des **phénomènes récurrents d'érosion** le long de son rivage.

Cette érosion relativement importante se **focalise actuellement principalement sur la moitié Sud de la plage** (définie comme la Zone E). En plus de la perte de masse en sédiments, la zone de baignade dans cette zone n'est quasi plus accessible et en tout cas ne représente pas une zone de confort pour s'y installer. Les différents désordres (racines à nues, arbres tombés, beachrock détruit, talus hauts) présentent même un **danger pour le public fréquentant le site**.

De plus, l'apparence contrastée des zones A et E indique de fortes différences au sein des processus hydrosédimentaires de la plage. Il est donc impératif d'en **comprendre les mécanismes à tous les niveaux**, afin d'adapter le site de manière cohérente et essayer, si ce n'est de retrouver 100% de plage de sable blanc, au moins de limiter les effets de son érosion et des potentielles submersions à venir.

5. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

5.1 CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES

5.1.1 ORIENTATION DU TRAIT DE COTE

Le site de Ta'ahiamanu est situé à l'entrée Est de la baie de Opunohu. La plage se situe sur une portion du littoral globalement orientée Nord-nord-est/Sud-Sud-ouest. Le littoral de la plage présente toutefois des orientations différentes dues à sa morphologie « coudée » :

- La zone E est orientée **Nord-Sud** regardant la fin du récif et la baie
- La zone S est orientée **Nord-nord-est - Sud-Sud-ouest** regardant sur le chenal
- La zone A est orientée **Nord-est –Sud-ouest** regardant l'intérieur du lagon

→ La plage est alors au total ouverte sur 45 ° qui est une caractéristique importante car son rivage est alors exposé à différentes conditions hydrodynamiques.

5.1.2 CARACTERISTIQUES DU RIVAGE

Note : Les études précédentes réalisées sur la caractérisation du rivage de Moorea ont montré d'importantes modifications dans ses propriétés (Aubanel., 1993 ; Polti., 2001 ; Vieux *et al.*, 2008). En effet, ces dernières décennies, le pourcentage de rivage artificiel de Moorea (remblais, murs verticaux, enrochements, pontons...) est passé de **33% à 47.5%** et celui des plages blanches de **33% à seulement 17%** (Polti, 2001). La plage de Ta'ahiamanu est une des dernières portions de sable blanc du littoral de l'île laissée au naturel.

La figure suivante présente la caractérisation du rivage de la plage et de ses environs selon la catégorisation utilisée par les auteurs.

- Le rivage au-delà de la partie Nord de la plage (**Zone N**) et photo **(a)** a subi de fortes modifications dans le but de protéger la route littorale. On y trouve des **enrochements** de blocs basaltiques d'une hauteur de 1 mètre, des murs verticaux mais aussi 2 pontons transversaux à une centaine de mètres au Nord faisant office d'épis transversaux.
- Le rivage de la **zone A (b)** est un littoral de **sable blanc** bioclastique sans artificialisation et propice aux plaisirs de la plage.
- Le rivage de la **zone E (c)** est un littoral de sable blanc sans artificialisation mais présentant de nombreux désordres identifiés auparavant.
- Le rivage au-delà de la partie Sud de la plage (**zone SS**) et photo **(d)** est une succession de remblais et **murets d'enrochements en mauvais état** édifiés par les riverains pour protéger leurs habitations des inondations et de l'érosion dues aux surcotes.

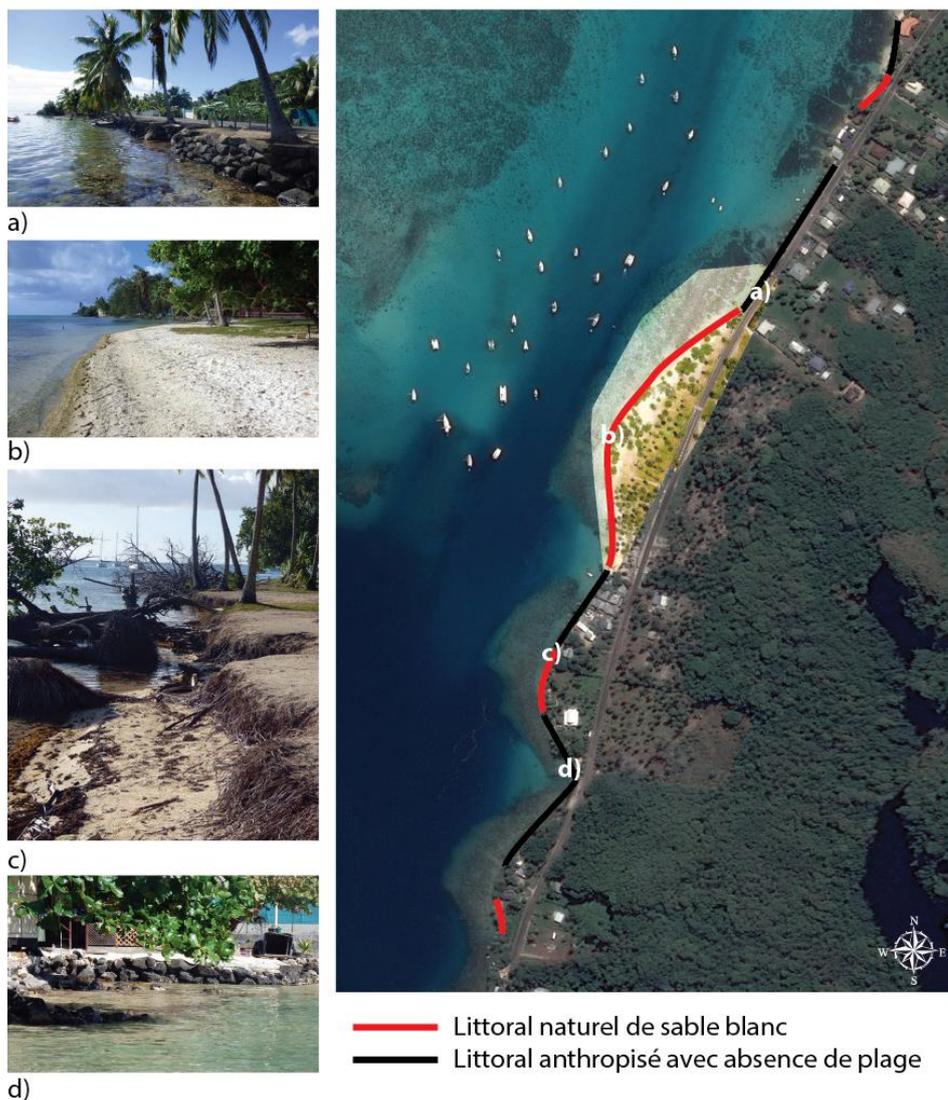


Figure 9 : Caractérisation de la ligne de rivage de Ta'ahiamanu et ses environs (Benet 2010)

5.2 GEOMORPHOLOGIE

5.2.1 BATHYMETRIE

A l'extérieur du lagon : du fait de son caractère d'île haute volcanique, les isobathes au large du récif barrière atteignent rapidement les 1000m (à seulement 4km de la côte) et sont parallèles aux platiers récifaux. L'entrée de la baie de 'Opunohu se fait par la passe de Tareu à 1km du site, qui atteint une profondeur de 75m (IRCP/ EPHE).

Dans le lagon : la morphologie au large de la plage est assez complexe. De l'extérieur vers l'intérieur, le **platier récifal** (largeur entre 400 et 600m) est séparé du chenal par sa **dépression d'arrière récif** (env. 150m de large). Le **chenal naturel** de sortie de lagon (un peu moins d'une centaine de mètres de large) est lui séparé de la plage par le **récif frangeant** (large de 30 à 50m) et sa dépression post-récifale très étroite et peu profonde adjacente au rivage.



Figure 10 : Les unités géomorphologiques du site

Au niveau de la bathymétrie :

Tableau 2: Bathymétrie intra-lagonaire au large de la plage de Ta'ahiamanu

	Distance à la plage	Bathymétrie	Commentaires
Sur le platier récifal	>300m jusqu'à la pente externe	Entre 1 et 2m	Profondeur régulière, platier quasi-horizontale
Dans la dépression d'arrière récif (DAR)	<ul style="list-style-type: none"> De 130 à 300m au Sud De 200 à 300m au Nord 	Entre 2 et 4m	Zone de mouillage préférentielle des bateaux. Pente faible <5%
Dans le chenal	<ul style="list-style-type: none"> De 50 à 130m au Sud De 110 à 200m au Nord 	<ul style="list-style-type: none"> Entre 3 et 16m en face de la zone E Entre 3 et 7m en face de la zone A 	<ul style="list-style-type: none"> Chenal deux fois plus profond en face de la zone E qu'en face de la partie nord. Pente très forte de 25% au Sud Pente moyenne de 10% au nord
Sur le récif frangeant	<ul style="list-style-type: none"> Presque inexistante à l'extrémité Sud De 0 à 50m au Sud De 10 à 100m au nord 	Entre 1 et 3 m	<ul style="list-style-type: none"> Récif frangeant adjacent à la côte quasi-horizontale Se termine à l'extrémité Sud de la plage
DAR du récif frangeant ou plage sous-marine	<ul style="list-style-type: none"> Inexistante au Sud de la plage De 0 à 10 m au nord 	Entre 0 et 1 m de profondeur	<ul style="list-style-type: none"> Quasi absence de la DAR¹ à l'extrémité Sud Pente faible de 5% en zone A et S (zone ++ de baignade)

¹ DAR : Dépression d'arrière récif

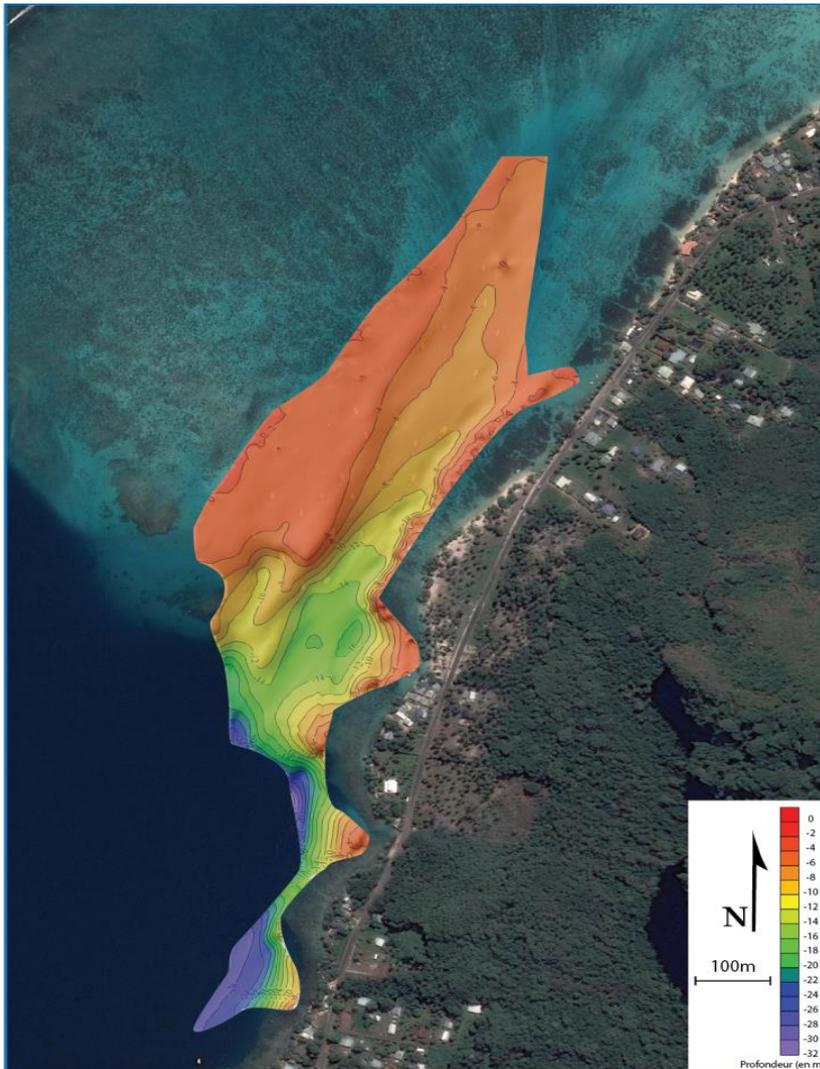


Figure 11 : Bathymétrie de la zone d'étude au niveau du lagon (source : Créocéan)

→ Points importants :

- Présence d'une très **forte pente sous-marine** à l'**extrémité de la zone E** combinée à la terminaison Sud-ouest du récif frangeant.
- Le chenal naturel atteint une profondeur d'eau deux fois supérieure à sa sortie Ouest qu'à son entrée à l'Est. → Impact prévisible sur les **intensités de courants** et la **nature des sédiments** déposés en fond de chenal.
- Terminaison Ouest du récif barrière (H=1m) plongeant brusquement à la limite Est de la passe de Tareu → Influence sur la propagation des houles incidentes dans la passe puis sur leur réfraction à l'entrée du lagon.
- Les pentes sous-marines des zones E (> 25 %) et A (< 10%) sont très différentes
→ Impact prévisible sur les processus hydrosédimentaires.

5.2.2 TOPOGRAPHIE

Deux plans topographiques détaillés ont été réalisés le 18 avril 2016 dans le cadre du projet RESCCUE :

- Un plan topographique du site de Ta'ahiamanu à l'échelle 1 : 250 depuis la route littorale jusqu'à la pente interne du chenal ;
- Un plan topographique du site à l'échelle 1 : 1 000 depuis la route littorale jusqu'à la partie externe de la dépression post-récifale des platiers récifaux.

Note : Toutes les caractéristiques physiques naturelles et anthropiques qui pourraient avoir un impact sur la dynamique locale y sont identifiées (arbres, souches, talus, route, murets, plaques EDT...).

Le site de Ta'ahiamanu est au niveau de la route long de 310m avec une altitude très basse de +1m NGPF² à son extrémité Sud-ouest et de +1.40m NGPF à son extrémité Nord-est. Le parc (ou arrière plage) défini entre la route et la plage est quasi **horizontal** avec des variations altimétriques comprises entre **+0.5m et +1.52m NGPF**. **La pente est <3%** sur tout le site avec la présence de quelques dépressions dans le terrain jouant autour de l'altitude de +1m NGPF.

La plage :

Elle est définie comme la zone comprise entre le haut du talus et l'altitude zéro de référence. Du fait de sa forme « coudée » et de son profil longitudinal convexe, la longueur totale de plage de sable blanc est d'environ 360m. La topographie du haut de plage est variable avec des altitudes faibles aux deux extrémités +0.5m et un talus culminant au maximum à +1.30m NGBF dans la zone E.

- **Zone A** : Profil régulier, le talus se confond avec l'arrière plage, **la pente de plage est très faible < 10 %**
- **Zone E** : **Profils extrêmement concaves**, variés voir verticaux. Dans certains endroits la plage n'existe plus avec des **talus verticaux supérieurs à 1 m**.

L'arrière plage : Pente très faible < 3%, point culminant à +1.52m NGPF.

→ Le site d'étude présente une topographie quasi-**plane aux alentours de +1m NGPF** avec de faibles variations de pentes et d'altitude entre la plage et la route. L'absence de dunes sédimentaires couplée à l'absence de talus à certains endroits fait de ce parc une zone qui semble fortement soumise aux aléas hydrodynamiques et **vulnérable aux surcotes marines importantes**.

5.3 CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

L'analyse statistique des houles et du vent a été réalisée à partir de la base de données mondiale d'états de mer du modèle mondial IOWAGA (Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Applications), développée par l'Ifremer (résolutions spatiale 0.25°x0.25°, pas de temps de 3h, couvrant une période de 24 ans (1990-2013)). Le point d'extraction des données se situe par 17°S et 150°W.

5.3.1 LES VENTS

Moorea est soumise au régime d'alizés auquel est soumis la Polynésie française. On observe clairement la **prédominance du secteur Est, caractéristique du régime d'alizés**.

² Nivellement Général de Polynésie Française (NGPF) : système de référence altimétrique de Polynésie française

Il faut noter que le site de Ta'ahiamanu est situé au pied des falaises du Mont Rotui, lui conférant une relative protection dans la zone dans certaines conditions de vent.

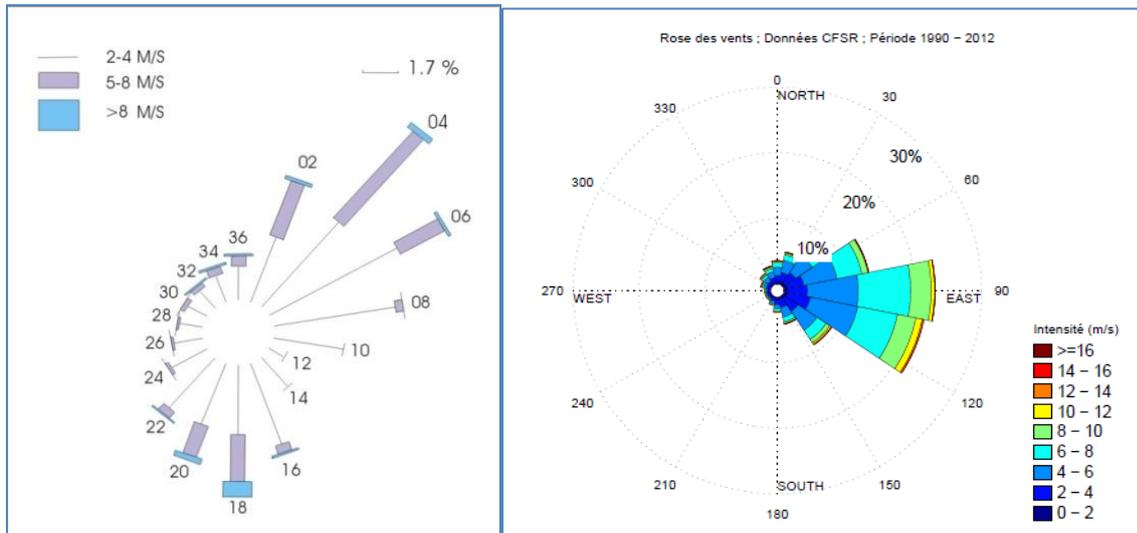


Figure 12 : Provenance et intensité des vents à Tahiti Faa'a (Météo France) à gauche et Rose des vents au point IOWAGA (à droite)

5.3.2 LES HOULES

Une rose des houles au point IOWAGA est présentée ci-après :

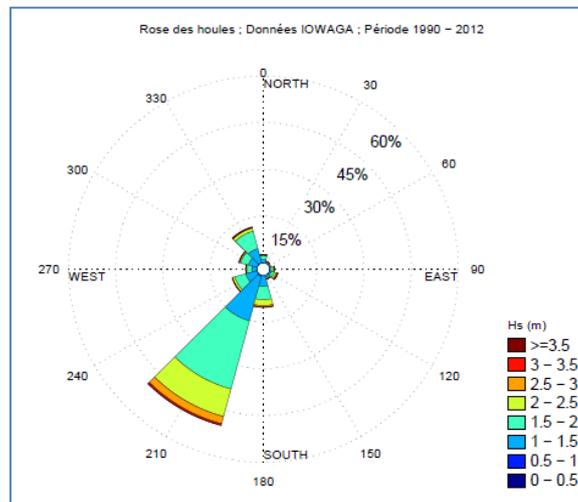


Figure 13 : Rose des houles au point IOWAGA

On note que le secteur Ouest-Sud-ouest à Sud-ouest est largement dominant. Le site de Ta'ahiamanu est bien protégé de ces houles australes mais est exposé aux houles de secteur Nord-ouest à Nord-est qui apparaissent principalement entre novembre et avril. Un exemple d'analyse des cas extrêmes dans le secteur 330-360° confirme l'existence d'évènements de fortes intensités de direction Nord-nord-ouest :

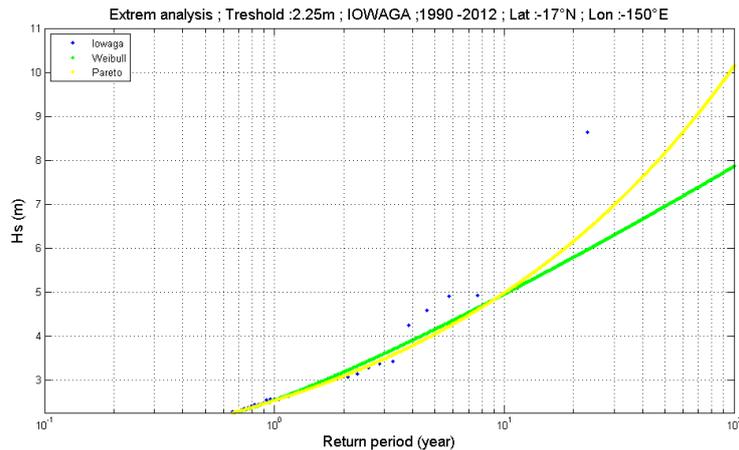


Figure 14 : Analyse statistique des houles extrêmes au point IOWAGA (méthode POT)

Une synthèse des valeurs de projet calculées dans les secteurs sur lesquels la plage de Ta’ahiamanu est potentiellement ouverte est présentée ci-après :

Durée de retour	1 an	10 ans
Secteur directionnel	hs(m)	hs(m)
300-330°N	2.7	5.5
330-360°N	2.5	5
0-30°N	1.9	3.4
tous secteurs confondus	3.6	5.9

5.3.3 AGITATION DANS LE LAGON

5.3.3.1 Modélisation hydrodynamique

Afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire de la plage de Ta’ahiamanu ainsi que les processus conduisant à son érosion constatée sur la zone E, une modélisation couplée vagues/courants a été mise en place sur une zone élargie couvrant toute la partie Nord de Moorea.

Les éléments attendus doivent permettre de proposer un schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique et hydrosédimentaire de la plage, qui, en complément des études déjà produites dans le cadre du projet RESCUE, aidera au choix et au dimensionnement de solutions de protection.

La méthodologie utilisée pour la construction du modèle numérique est présentée en annexe 3.

Conditions simulées

Un panel de combinaisons niveau d’eau / direction et période de retour des vagues et de la mer de vent a été simulé afin de couvrir la gamme des types d’agitation et de courants induits susceptibles d’entraîner l’érosion de la plage de Ta’ahiamanu.

Différents tests de sensibilité ont été réalisés, pour plus de lisibilité, seuls les cas les plus pertinents sont présentés dans ce rapport.

Tableau 3 : Synthèse des conditions simulées

Cas	Houle		Surcote
	Dp	Hs	
1	345°	2.5 m (1 an)	0 m
2	345°	2.5 m (1 an)	+ 1 m
3	345°	5 m (10 ans)	+ 1 m
4	315°	5.5 m (10 ans)	+ 1 m
5	15°	3.4 (10 ans)	+ 1 m
6	Vent 60°	12 m/s	+ 1 m

Cas n°1 : Houle annuelle de Nord-nord-ouest

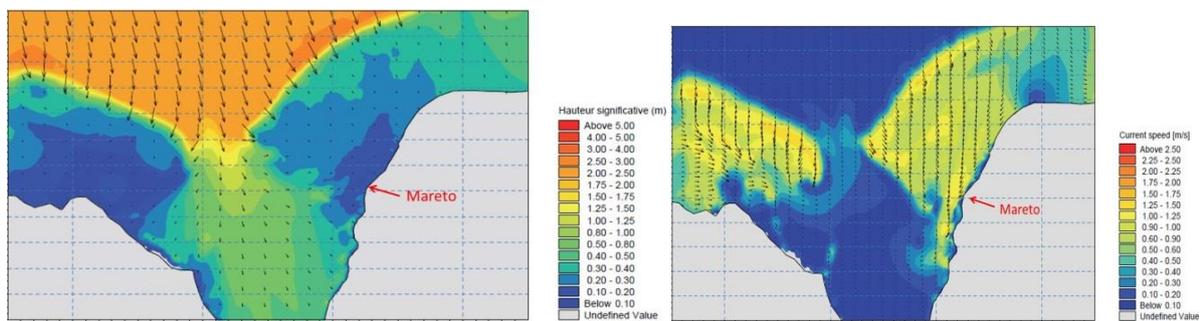


Figure 15 : Cas n° 1 SW : Hauteur significative et direction des vagues (à gauche) / Cas n° 1 HD : Vitesse et direction des courants induits par les vagues (à droite)

On observe une forte atténuation de la houle par déferlement sur le récif, avec des $H_s^3 < 0.2m$ dans le lagon au niveau de la plage pour 2.5m au large. La large passe à l'entrée de la baie de 'Opunohu laisse la houle se propager et se réfracter de part et d'autre de la baie avec des H_s qui atteignent 0.5 à 0.8m à la côte. On observe des courants très intenses au niveau de la barrière (1.25 à 1.5m/s) liés au déferlement des vagues, et au niveau du lagon (~ 1m/s) liés à la vidange de l'ensachage du lagon.

Globalement les courants sont orientés du lagon vers le centre de la baie de 'Opunohu, au droit de la passe. Puis, au niveau de la passe ils convergent et ressortent par la passe, vers le large.

Notons que les résultats du modèle et le schéma de circulation décrit ci-dessus sont tout à fait cohérents avec les mesures de courants réalisées par l'IRCP-EPHE. Le modèle peut donc être considéré comme fiable.

³ Hauteur significative : hauteur moyenne du tiers des plus grandes vagues d'un ensemble de vagues (lié à un épisode météo-océanographique).

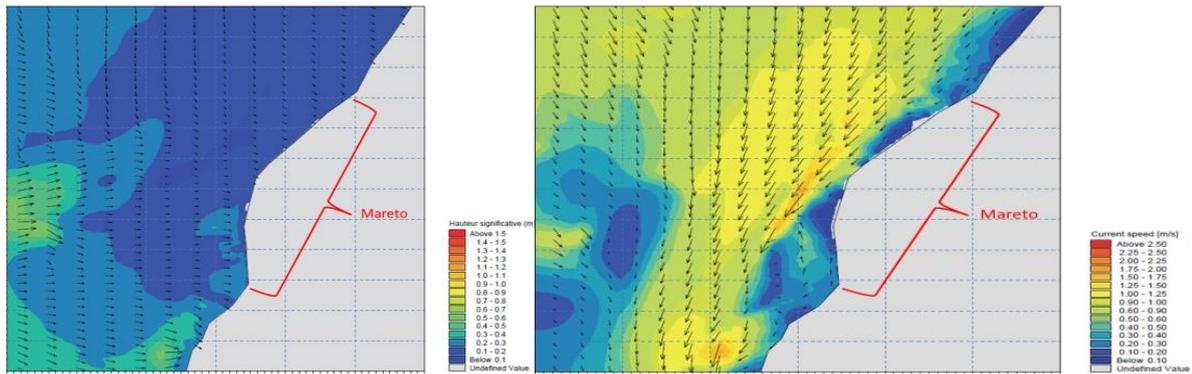


Figure 16 : Zoom : Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite)

La houle étant fortement atténuée sur le récif, les Hs résiduelles au niveau de la plage sont très faibles, < 0.2m sur la partie Nord de la plage et < 0.3m sur la partie Sud. Notons néanmoins que l'agitation est sensiblement plus forte sur la partie Sud de la plage (soumise au problème d'érosion) en raison de la propagation de la houle par la passe à l'entrée de la baie de 'Opunohu, qui réfracte ensuite de part et d'autre de la baie pour arriver avec une direction frontale (Ouest à Ouest-nord-ouest) au niveau de la plage de Ta'ahiamanu.

➔ Ceci confirme les premières hypothèses qui suggéraient une plus grande exposition à la houle de la partie Sud de la plage (Notamment de la zone E).

On observe, conformément aux données mesurées par l'IRCP, des courants sortants très intenses dans le chenal devant la plage (jusqu'à 1.5m/s). La dépression bathymétrique du chenal crée un effet entonnoir et concentre les courants de vidange liés à l'ensachage du lagon. Globalement, les courants sont orientés vers le Sud-ouest (baie de 'Opunohu), et longent la plage avec cette même direction.

➔ En revanche, un phénomène très localisé pourrait être à l'origine de l'érosion dans la zone E : un courant de retour orienté vers le Nord apparait et forme une gyre anti-horaire avec le courant principal du chenal.

Cas n°3 : Houle décennale de Nord-ouest avec surcote de 1m

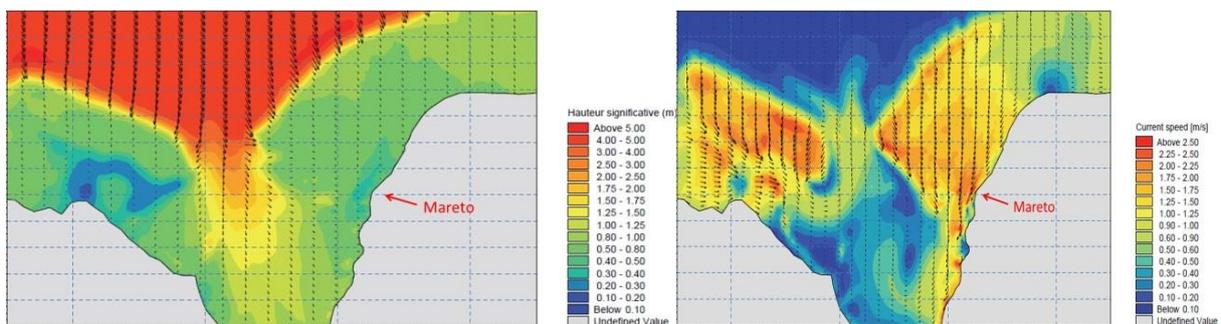


Figure 17 : Cas n°3 Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / Cas 3 HD : Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite)

Les observations sont encore relativement similaires au cas précédent, malgré l'orientation Nord-ouest de la houle : forte atténuation sur le récif, propagation facilitée au travers de la passe.

Les Hs résiduels de la houle au niveau de la plage sont légèrement supérieurs. A la différence du cas n°1, la surcote qui permet une meilleure propagation de la houle sur le récif et le lagon, rend la partie Nord de la plage plus exposée que la partie Sud, y compris pour une houle de direction Nord-nord-ouest au large.

➔ L'apport d'eau supplémentaire par déferlement et l'ensachage associé entraînent une forte augmentation des courants (> 2m/s dans le lagon) ainsi qu'une augmentation dans l'intensité des courants induits par le déferlement des vagues dans la zone E. Le schéma de circulation reste lui identique.

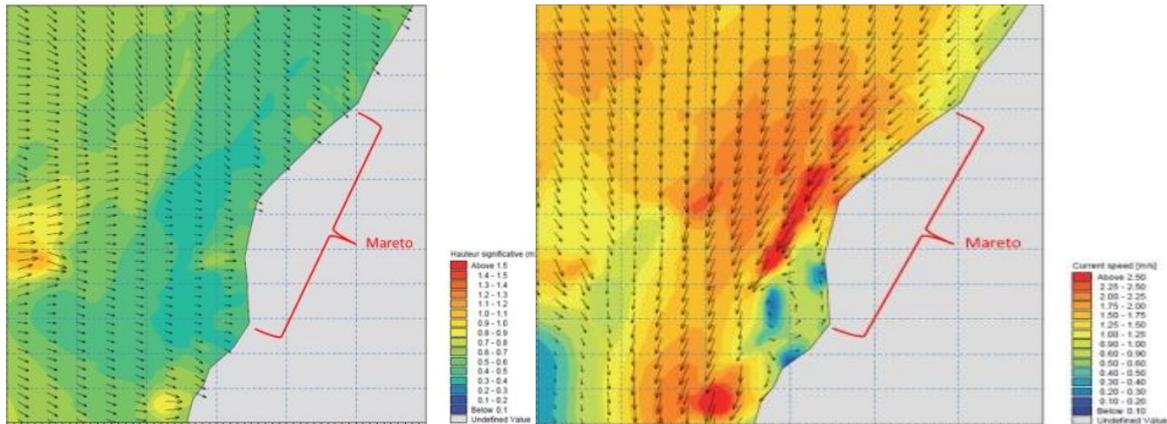


Figure 18 : Zoom Cas 3 : Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite)

Cas n° 6 : Mer de vent 12m/s d'Est-nord-est + surcote 1m

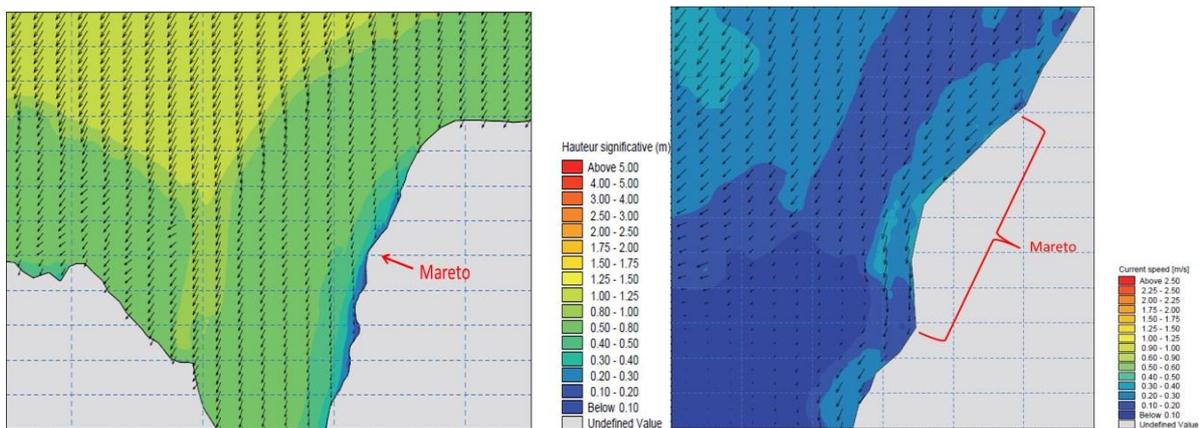


Figure 19 : Cas 6 : Hauteur significative et direction des vagues (gauche) / zoom HD : Vitesse et direction des courants induits par les vagues (droite)

Dans le cas d'une mer de vent levée par un régime d'alizés, les résultats sont très différents de ceux observés pour une houle du large. La houle levée dans le lagon est de l'ordre de 0.8m et a une direction Nord-est. Les courants sont globalement orientés vers l'Ouest (0.3 – 0.4m/s), et les effets spécifiques liés à l'ensachage que l'on pouvait constater dans les autres cas ne sont plus observés.

- Les courants longent la plage du Nord-est vers le Sud-ouest. La partie Sud est soumise à des courants plus faibles et décroissants, susceptibles de favoriser le dépôt du sédiment.

5.3.4 NIVEAUX D'EAU

MAREES

Le régime de marée à Tahiti (Moorea) comporte deux pleines mers par 24 heures ayant toujours lieu, l'une de 00H00 à 02H00 et l'autre de 12H00 à 14H00. Le niveau moyen des marées pour le secteur de Moorea (Papetoai) est de 0,42 m CM avec des extrêmes de 0,27 à 0,64 m CM. Les niveaux de marée caractéristiques proches de 'Opunohu, tels qu'indiqués dans la version 2013 des Références altimétriques maritimes du SHOM, sont compilés dans le tableau suivant (indiqués en Cote Marine) :

Plus Haute Mer Astronomique	Pleine Mer Vives Eaux	Niveau Moyen	Basse Mer Vives Eaux	Plus Basse Mer Astronomique
+0.64 m CM	+0.60 m CM	+0.42 m CM	+0.35 m CM	+0.27 m CM

SURCOTES

Le terme surcote désigne la différence positive entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule. Une surcote a principalement une origine météorologique : elle est générée lors de passage de dépression. Elle peut avoir également d'autres origines : vagues, seiches, tsunamis...

Les surcotes engendrées par les différents phénomènes génèrent une élévation du niveau d'eau, or les niveaux d'eau jouent un rôle sur la dissipation de l'énergie des vagues incidentes et nécessitent d'être prises en considération. En effet, un niveau d'eau plus élevé a tendance à faciliter la propagation des vagues jusqu'au site de projet en atténuant les effets bathymétriques (frottement, réfraction, déferlement). Ainsi la majeure partie de l'énergie des vagues est dissipée au front externe des récifs à marée basse, alors que pendant les hautes mers, les profondeurs d'eau générées sur les surfaces récifales permettent la propagation d'une partie plus ou moins importante de l'énergie des vagues à travers les récifs en fonction des caractéristiques du marnage et des vagues incidentes.

◆ *Surcote liée à la houle*

Cette surcote est générée par la houle après déferlement directement au rivage dans les zones non protégées par un récif ou par surverse au-dessus du récif en ce qui concerne les lagons. Le déferlement de la houle sur le récif corallien peut apporter un volume d'eau important dans le lagon. La montée des eaux dans le lagon est ainsi connue sous le terme « d'ensachage ». Ce phénomène d'ensachage du lagon, qui se produit lorsque la houle est forte, induit des forts courants de vidange sortant par les passes. (Source : Les risques naturels en Polynésie, BRGM).

D'après le PPR de Moorea, la valeur de référence pour la surcote marine, obtenue pour une houle d'amplitude 12m est de +2m. Le niveau d'aléa « surcote marine » pour la plage de Ta'ahiamanu est fort sur la bande côtière (zone de déferlement de la houle cyclonique ou des tsunamis, $h > 1\text{m}$) puis faible à moyen sur le reste du site (zones d'inondation en cas de surcote marine : cyclones et tsunamis, h de 0 à 0.5m). Excepté pour la zone Sud de la plage (zone la plus en érosion) pour laquelle

le niveau de risque est considéré de moyen à fort (zone d'inondation en cas de surcote marine : cyclone ou tsunami, h de 0.5 à 1m). (Source PPR de Moorea, BRGM).

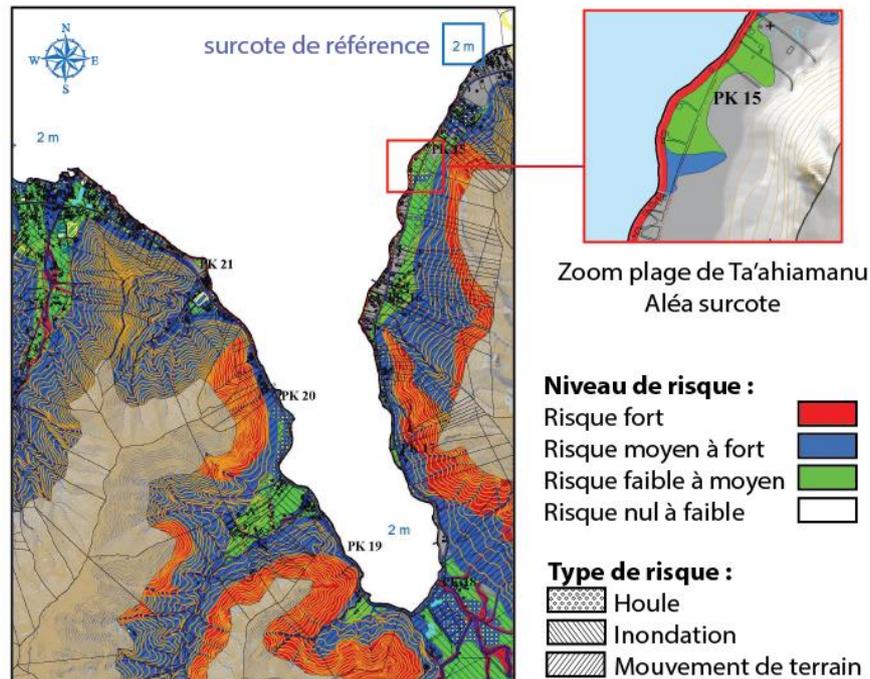


Figure 20 : Aléa surcote marine sur la zone d'étude (PPR de Moorea, BRGM)

◆ Surcote atmosphérique

La surcote atmosphérique est principalement liée aux cyclones et aux dépressions tropicales. L'élévation du niveau d'eau est générée à la fois par les courants induits par les vents qui poussent vers la côte les masses d'eau qui s'accumulent dans les zones de hauts-fonds et par la chute de pression atmosphérique. Les variations de la pression atmosphérique entraînent des levées d'eau à grande échelle. Ainsi une dépression atmosphérique de 1hPa entraîne une surélévation de 1cm pour le niveau marin. La surcote atmosphérique résulte donc d'un effet combiné des faibles pressions au sein du système, du déplacement des masses d'air et de la morphologie côtière. En théorie, les valeurs attendues au rivage sont de l'ordre de +0.1 à +0.3m sur Tahiti. (Source : Les risques naturels en Polynésie, BRGM)

ELEVATION DU NIVEAU MARIN

Le niveau moyen de la mer mesuré au marégraphe de Papeete entre 1975 et 2009 est de +2.51mm/an +/-0.94mm (NOAA). Il s'agit du niveau marin relatif intégrant la subsidence de l'île, estimée pour Tahiti à -0.5mm/an, ce qui est à peine significatif (Falco *et al.*, 2011). Cependant aucune valeur de subsidence n'est disponible pour Moorea. (source : <http://www.spc.int/images/climate-change/RESCCUE/publications/polynesie/Vuln%C3%A9rabilite-sites-pilotes-Gambier-et-Moorea-aux-effets-du-cc.pdf>).

5.3.5 SYNTHESE DE L'HYDRODYNAMISME AFFECTANT LE SITE DE TA'AHIAMANU

En résumé, les conditions d'agitation qui conditionnent l'hydrodynamisme de la plage peuvent-être classées selon deux états :

- **Un régime calme**, permanent durant l'hiver austral, qui est conditionné par la marée et les alizés. La marée microtidale conditionne essentiellement la circulation au niveau du chenal qui permet l'échange entre le lagon et l'entrée de la baie de 'Opunohu. Les transports de masse d'eau à travers le récif au large de la plage sont induits par le déferlement et la propagation de la houle. Les courants y sont faibles et suivent une direction générale Nord-Sud, courant liés à la vidange du lagon. La faible intensité de ces courants favorise le dépôt des sédiments durant cette période.
- **Un régime agité**, ponctuel durant l'été austral dont la circulation est contrôlée par des houles de Nord <3m mais très énergétiques par leur longue période. Comme le montrent les différents modèles préalables, le déferlement de ces houles pénètre dans le lagon par-dessus le récif barrière responsable d'ensachages importants qui conditionnent alors les circulations d'eau dans le lagon. Les courants sont alors plus forts et capables de mobiliser les sédiments.

La morphologie du site a pour conséquence un phénomène de **réfraction des houles le long du récif** qui viennent se terminer sur les façades Est de la plage. Lors de ce déferlement, un courant littoral est induit opposé aux directions normales. Une autre partie de l'énergie est réfléchi sur le bas de plage et les murs artificiels créant un ressac vers le large. Des événements ponctuels comme les grosses houles et forts vents de cyclones sont à l'origine de très fortes agitations désordonnées et de phénomènes de surcote importantes.

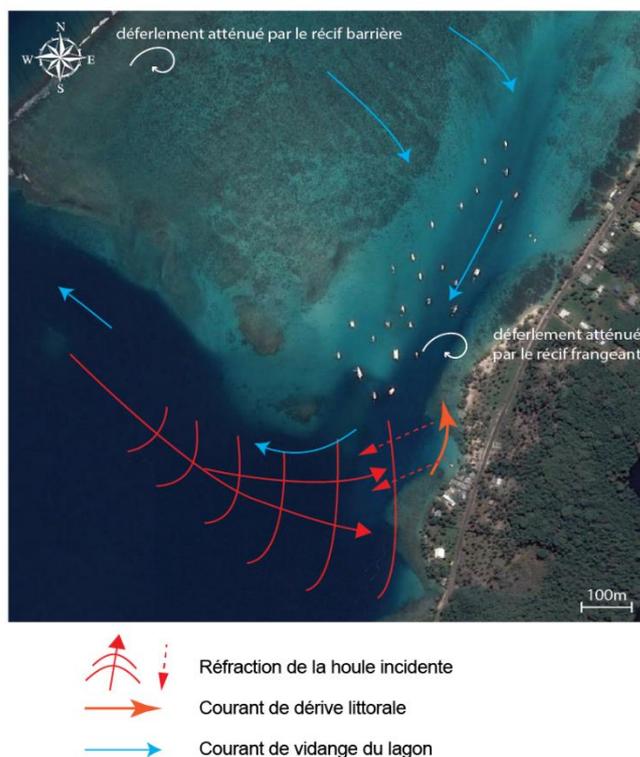


Figure 21 : Schéma de fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude en période agitée

5.4 SEDIMENTOLOGIE

5.4.1 NATURE ET REPARTITION DES UNITES SEDIMENTAIRES

5.4.1.1 Dans le lagon

La géomorphologie au large du site est assez complexe mais typique des environnements lagunaires. Comme le montre la figure suivante, on trouve de l'extérieur vers l'intérieur une succession d'unités morpho-sédimentaires :

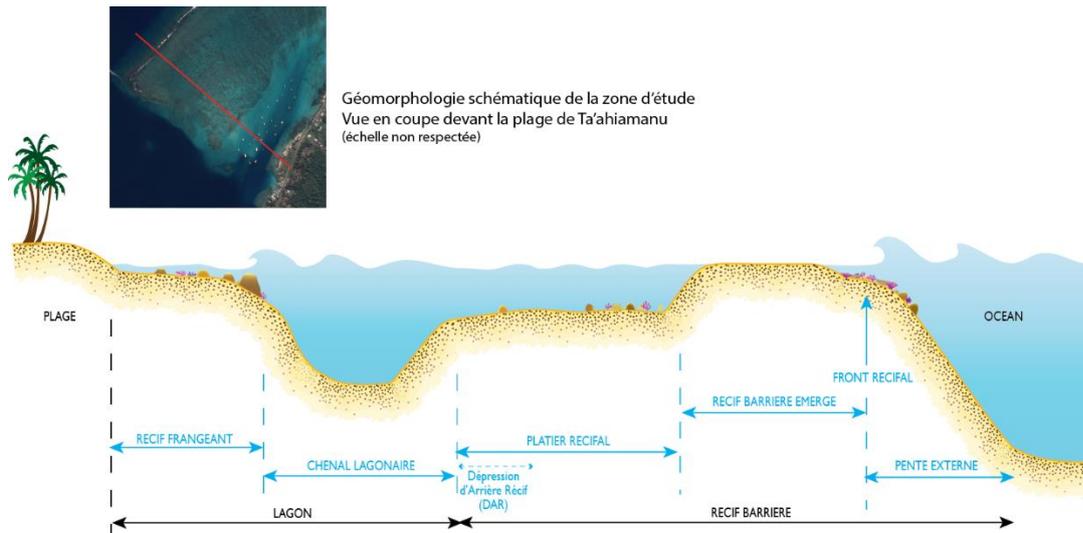


Figure 22: Géomorphologie schématique (échelle non respectée) de la zone d'étude. Vue en coupe devant la plage de Ta'ahiamanu.

- **Front récifal et pente externe** : Partie antérieure toujours immergée du récif ouverte sur le large. Elle est composée de constructions coralliennes et de dépôts sédimentaires à dominance bioclastique.
- **Le récif barrière émergé** : Zone de déferlement de la houle et d'entrée d'eau dans le complexe récifal. La profondeur d'eau est assez faible et la zone est constituée d'éléments coralliens transversaux compacts.
- **Le platier récifal affleurant** : Zone peu profonde à éléments coralliens bio-détritiques dispersés. La profondeur est assez faible et ne dépasse pas les 2m d'eau. La zone externe de cet ensemble (**dépression d'arrière récif : DAR**) renferme l'essentiel des dépôts sédimentaires qui sont constitués en majeure partie d'épandages bio-détritiques et d'accumulations sableuses (Cordier, 2007).
- **Le chenal lagunaire** : Chenal naturel de vidange du lagon dont la nature du fond représente un stock évident de sable (zone de dépôt et d'accumulation des sables provenant majoritairement de la DAR du récif barrière)
- **Le récif frangeant** : La partie interne comprend des éléments coralliens bio-détritiques, la profondeur est comprise entre 1 et 2m. La partie externe du récif frangeant accolée à la plage comprend les formations sédimentaires littorales, dépourvues de structures bio-construites et très peu profondes. Elles sont constituées de sables bioclastiques associés à une proportion importante d'éléments bio-détritiques grossiers.

5.4.1.2 Sur la plage : granulométrie de l'unité physiographique de la plage

Rappel :

La taille des particules est la propriété la plus fondamentale des sédiments qui les soumet aux phénomènes d'érosion, de transport et de dépôt (Blott & Pye, 2001). L'analyse des paramètres granulométriques fournit des informations importantes sur la provenance, l'historique du déplacement et les conditions de dépôts des particules sédimentaires.

Afin de mieux appréhender les processus sédimentaires du site d'étude, une étude granulométrique a été réalisée. **Trois échantillonnages** ont été réalisés le long des profils de **quatre transects** répartis le long de la plage, soit un total de **12 prélèvements** soumis à l'étude.

Note : Les prélèvements ont été effectués au mois de juin 2016 au sein de la période hydrodynamique calme, la composition sédimentaire peut légèrement varier selon les saisons et les régimes de houle.

Sur chacun des transects (**A, S, E1 et E2**), un prélèvement a été réalisé **en arrière plage (1)**, puis en **zone de déferlement des vagues (2)** et enfin dans la couche sédimentaire constituant la **DAR du récif frangeant (3)** autour des 1m de profondeur comme indiqué sur la figure suivante.

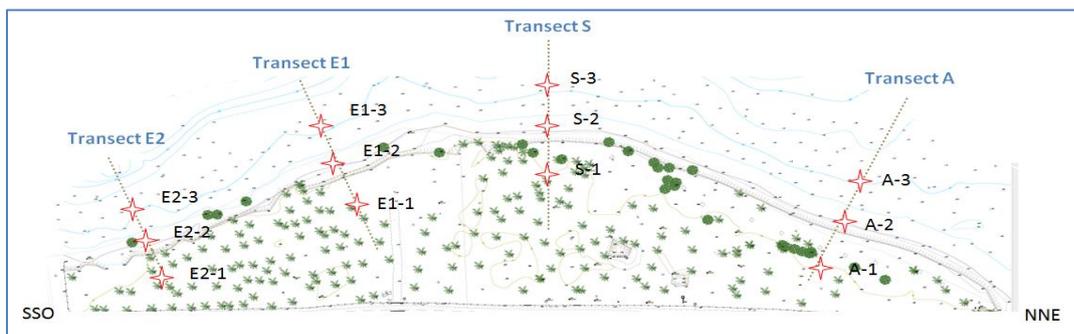


Figure 23 : Répartition géographique des échantillons soumis à l'analyse granulométrique

La **granulométrie** est la distribution de la taille des grains d'un échantillon. La fraction grossière des échantillons a été soumise à une analyse par tamisage de 40 microns à > 5mm (tableau suivant) allant des silts aux débris coralliens.

Tableau 4 : Diamètre des tamis utilisés et sédiments correspondants

Diamètre (mm)	Sédiments	
	> 5	Moyens
2	Petits	
0.5	Grossiers	Sables
0,250	Moyens	
0.125	Fins	
0,060	Très fins	
		Silts

Un indice de qualité du classement des grains à été calculé, c'est l'indice d'hétérométrie $h = \frac{d_{75} - d_{25}}{2}$

Indice d'hétérométrie	> 0.5	0.5 à 0.2	< 0.2
Qualité du classement	Mauvais	Moyen	Bon

Résultats :

Pour chaque échantillon, les histogrammes de répartition des différentes classes granulométriques ainsi que les courbes de pourcentage cumulés des différentes fractions sont présentés en annexe 2. Dans les tableaux sont indiqués les valeurs de la médiane, des quartiles Q25 et Q75 et l'indice d'hétérométrie.

Le matériel sédimentaire qui constitue la plage est essentiellement composé de **sédiments bioclastiques** formés de débris de squelettes et coquilles calcaires dont l'origine carbonatée est liée à la présence du récif frangeant accolé au rivage et au récif barrière au large (Cordier, 2007).

Il existe un granoclassement le long du profil de plage. Les sables fins sont situés majoritairement en haut de plage **(1)**, les sables moyens et les débris coralliens occupent le bas de plage **(2)** (zone de déferlement des vagues) notamment dans la partie nord de la plage (zone A et S), les sables les plus grossiers sont présents dans la DAR du récif frangeant **(3)**. Ce granoclassement est corrélé avec les précédentes études sédimentaires des plages coralliennes (Cordier, 2007).

On note tout de même des spécificités pour les zones E1 et E2, zones soumises aux phénomènes érosifs :

- **Pour le transect E1** on observe une certaine homogénéité le long du profil avec la présence de sables moyens, le granoclassement n'existe plus.
- **Pour le transect E2**, le granoclassement est inversé, on trouve des sables moyens et grossiers en haut de plage alors qu'on trouve des sables fins dans la DAR. Ce sédiment fin peut avoir comme origine la présence de l'exutoire ou un manque de production de sables grossiers dans cette zone.
- Les débris coralliens sont en majorité présents en bas de plage, ils ont été transportés et déposés par les vagues de déferlement lors de fortes agitation. On note l'absence de ces débris dans les zones E1 et E2

La présence dispersée de quelques débris centimétriques en arrière plage est plus à imputer à une action mécanique anthropique qu'à des processus naturels, même s'ils ont pu être charriés lors de grosses houles.

La plage de Ta'ahiamanu est majoritairement composée de sables blancs détritiques et carbonatés. Ces sables sont d'autant plus fins qu'ils sont hauts le long du profil de plage : une majorité de sables fins et d'apports terrigènes en arrière-plage, une majorité de sables moyens et de débris coralliens en bas de plage et des sables assez grossiers au niveau de la plage sous-marine. De plus, on note que ce granoclassement est inversé dans la zone E2, où les sables du haut de plage sont mélangés (des fins aux grossiers) et les sables sous-marins tendent vers les sables fins. Ces sédiments fins sont alors plus facilement mobilisés et transportés que ceux des autres zones, ce qui peut-être un des marqueurs du déséquilibre sédimentaire à ce niveau de la plage.

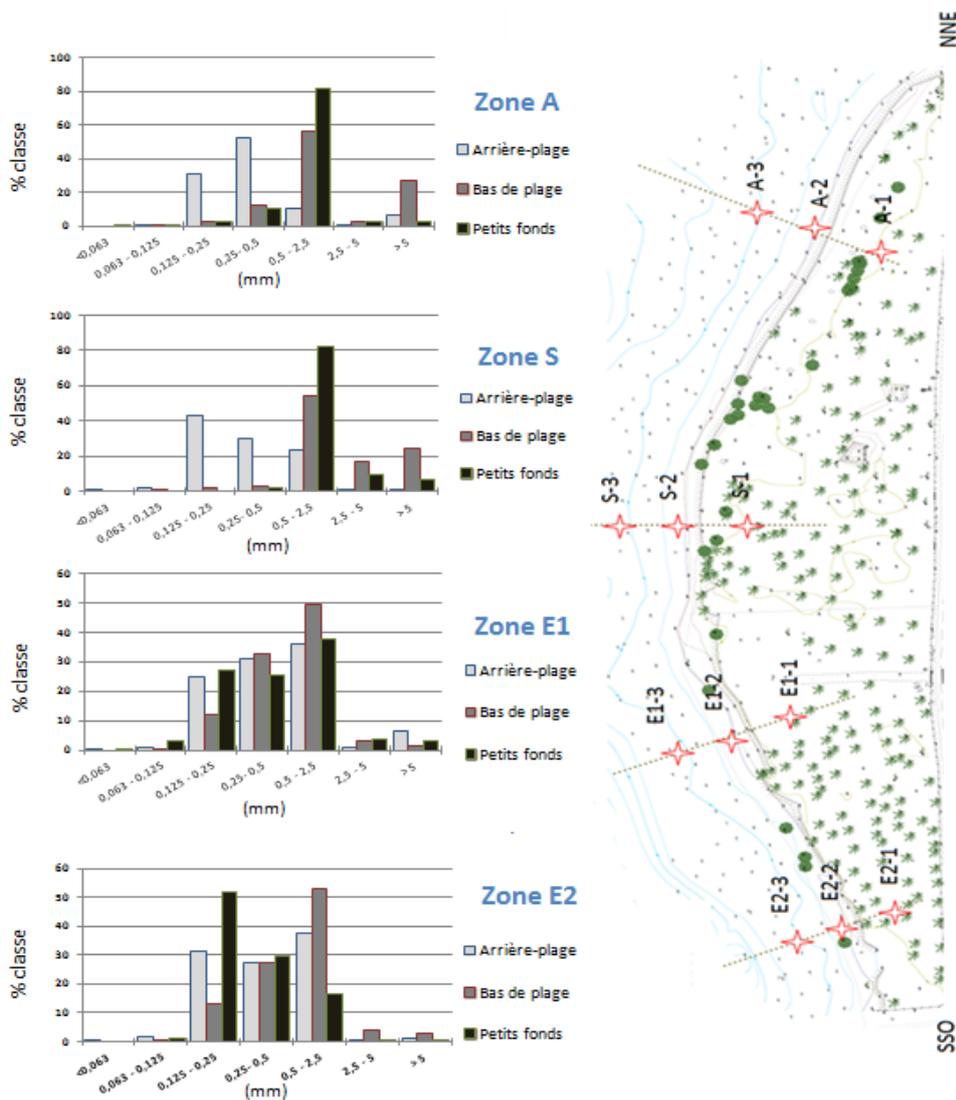


Figure 24 : Résultats caractéristiques

5.5 PROCESSUS SEDIMENTAIRES

Les plages sont définies comme des zones de dépôt et de transfert de sédiments meubles. Les sédiments de la plage de Ta'ahiamanu sont essentiellement composés de bioclastes de nature carbonatés (sable blanc $< 2\text{mm}$) et de débris coralliens $> 2\text{mm}$. Les flux sédimentaires qui régissent la dynamique sédimentaire sont étroitement liés aux conditions de houles et à l'agitation au sein du lagon précédemment détaillées. **Les variations annuelles (engraissement et érosion) des profils de plages répondent aux variations de l'énergie de la houle et des taux de transferts sédimentaires entre la plage et l'environnement voisin.**

5.5.1 ORIGINES ET STOCKS DES SEDIMENTS DE LA PLAGE

Note : les stocks et les flux sédimentaires détaillés par la suite ne peuvent être quantifiés dans le détail sans études préalables (suivis de profils dans le temps) mais l'état des connaissances permet de mettre en évidence des tendances.

L'alimentation en sédiments de la plage a différentes origines, principalement biologique mais aussi en plus faible quantité continentale.

5.5.1.1 Sédiments d'origine biologique

Les platiers récifaux du large : Le large platier corallien agit comme une usine de production de sables. Les sables sont la conséquence de l'érosion mécanique du récif sous l'effet directe de la houle. Ces sables sont ensuite disponibles pour le transport dont une partie permet d'alimenter la dépression d'arrière récif (DAR) dans un premier temps, puis redistribués à la plage si l'agitation locale le permet.

Le récif frangeant : Avec une superficie estimée de 20 km², le récif frangeant adjacent à la plage constitue la principale source active. Il produit moins de stock que les platiers au large mais sa présence le long du rivage permet d'alimenter directement la plage.

Organismes bio-érodeurs : Les espèces de Microforeurs, macroforeurs et certains brouteurs répartis au sein du lagon produisent du sédiment en érodant le récif calcaire (Production faible comparée à l'apport des récifs).

5.5.1.2 Origines continentales

Ils constituent les apports terrigènes que l'on retrouve notamment dans le stock d'arrière plage. Dans le cas de la plage de Ta'ahiamanu, ces apports sont faibles à côté des apports biologiques d'où la couleur blanche de la plage (cf. granulométrie).

Les rivières : La rivière 'Opunohu qui se jette en fond de baie n'a qu'une très faible influence pour la plage de Ta'ahiamnu. Les principaux matériaux déversés forment une accumulation sédimentaire en fond de baie à plus de 2.5km de la plage. La profondeur de la baie ne permet pas au sédiment d'être remobilisé jusqu'à la plage.

Les exutoires : Un exutoire pluvial ferme la partie Sud de la plage (visible sur le plan topographique en annexe 1). Lors de fortes pluies seulement, les apports terrigènes sont alors déversés au Sud du site. Cela est confirmé par les analyses granulométriques qui montrent du sédiment fin d'origine terrigène sur les prélèvements E2 et E3.

L'érosion des falaises rocheuses : La présence des falaises abruptes (900m) du Mont Rotui à seulement 200m en arrière de la plage est à l'origine d'apports terrigènes qui paraissent constituer la principale source de matériel d'origine continentale en arrière plage.

5.5.1.3 Stocks de sédiment mis à disposition

La plage est alimentée en sédiment par les processus hydrodynamiques qui mettent en mouvement les matériaux à disposition créant des **transferts sédimentaires entre les différentes zones d'accumulation**. Les dépressions d'arrière récif (DAR) ou chenaux d'embarcation sont considérées aujourd'hui comme les principaux lieux de stockages des sables coralliens des environnements lagunaires (Cordier, 2007). Il s'agit d'une **zone de dépôt transitoire** entre les unités morphologiques récifales et les plages.

Dans le cas de la plage de Ta'ahiamanu, on distingue cinq principales zones d'accumulation :

- **La DAR du récif barrière** : elle est large d'une centaine de mètres et parallèle au rivage avec une profondeur qui varie entre 2 et 4m. Lieu d'une forte accumulation sédimentaire résultante de l'érosion des platiers récifaux, elle constitue un stock sableux meuble d'une épaisseur de 1 à 2m. En dessous, on y trouve une unité constituée de fragments grossiers de coraux partiellement cimentés.
- **La DAR du récif frangeant** : Elle sépare le récif frangeant de la ligne de rivage. Elle est principalement constituée d'épandages biodétritiques et d'accumulation sableuse. Elle est aussi le lieu de développement de certaines espèces d'herbiers. **C'est la principale source de sable blanc à disposition pour la plage.** Elle varie entre 3 et 8m de large et 1m de profondeur en moyenne le long de la partie nord de la plage (A1, S) alors qu'elle est très peu large en zone E1 (1 à 2m) et pratiquement inexistante au niveau de la zone E2. Cette répartition montre une **réelle inégalité Nord-Sud du stock de sédiment mis à disposition pour la plage.**
- **Le chenal** : Situé entre les deux unités récifales à environ 70m du rivage de la plage, les pentes et le fond du chenal représentent un stock évident en sables mais ce stock est très difficilement remobilisable pour la plage en raison de sa profondeur.
- **La plage** : La plage en elle-même constitue un stock d'accumulation sédimentaire. La faible épaisseur de sédiment le long de son profil montre que ce stock est limité.
- **Plages adjacentes** : Du fait du caractère anthropique du littoral entourant la plage, il n'existe pas vraiment de stock à part au niveau de la plage de l'Hôtel Hilton souvent rechargée en sédiment. La présence de DAR au nord du site présente des caractéristiques de zone d'accumulation (plage sous-marine).
- **Arrière plage** : Il constitue une zone d'accumulation mis en mouvement par les vents transversaux et les événements de submersion marine de la plage. Ce stock est à la fois détritique et terrigène. Son épaisseur varie le long de la plage mais semble constituer une zone stock relativement faible car le substrat dur sous-jacent est rapidement atteint.

→ Les platiers coralliens au large de la plage et le récif frangeant accolé au rivage constituent la principale origine des sables et des débris coralliens. Ces matériaux sont ensuite stockés principalement dans les DAR de ces unités qui constituent avec la plage, les principales sources de sédiment mis à disposition pour les flux sédimentaires. Les apports terrigènes sont eux principalement stockés dans la zone d'arrière plage.

La présence du chenal fait office « d'obstacle » entre les stocks de la DAR du récif barrière et la plage

La principale source de sédiments disponible paraît être la zone d'accumulation étroite entre le récif frangeant et la plage.

5.5.2 DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

5.5.2.1 Déplacements sédimentaires

Le transport sédimentaire littoral se fait par voie maritime sous **l'effet de la houle, des courants induits par l'agitation locale et sous forme éolienne** sous l'effet du vent. Il résulte des déplacements alternatifs des sédiments suivant les deux directions propres au littoral :

- **La direction longitudinale** (*long-shore*) localement parallèle au trait de côte
- **La direction transversale** (*cross-shore*) localement perpendiculaire au trait de côte.

Les déplacements sédimentaires sont étroitement liés aux caractéristiques énergétiques des conditions environnementales (vent, houle, courant...). Ils sont donc saisonniers, et peuvent s'effectuer avec des fluctuations importantes d'une année à l'autre ou ponctuellement lors du passage d'un cyclone.

*Note : Les études réalisées précédemment dans les environnements lagunaires (Cordier, 2007) et le témoignage de certains riverains de la commune de Papetoai ont montré que **les échanges sédimentaires durant les périodes calmes étaient faibles par rapport aux périodes agitées**. Pour la suite de l'analyse hydrosédimentaire du site, nous nous focaliserons sur les tendances en période de fortes conditions énergétiques.*

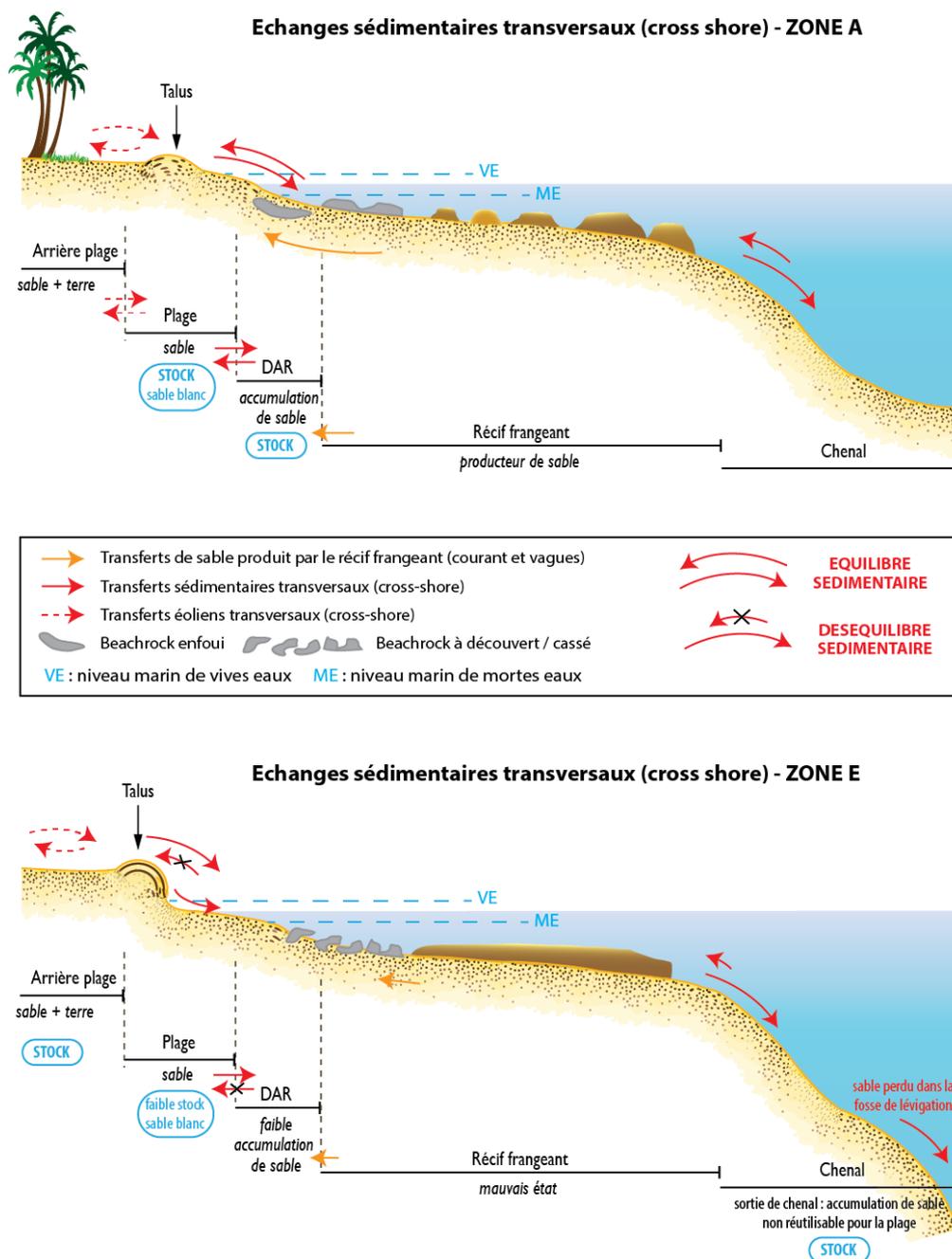


Figure 25 : Schématisation des échanges sédimentaires

◆ **Mouvements sédimentaires sous l'action des houles**

Si l'incidence des trains de houle arrivant à la côte est normale au rivage (cas n°1 de la modélisation), le transport s'effectue dans le profil avec :

- Un transfert de matériaux du bas de plage vers le haut de plage en périodes de conditions de mer faible ;
- Un transfert de matériaux du haut de plage vers le bas de plage en période de fortes conditions de mer.

En période calme, la plage est en « **rééquilibrage naturel** », les sédiments présents dans la DAR du récif frangeant (ou bas de plage sous-marine) sont mobilisés et transportés sur la partie haute de la plage en fonction du stock disponible. ⇒ Engraissement progressif de la plage

En période agitée, l'énergie induite par la houle a un rôle opposé. Les sédiments du haut de plage sont alors charriés et mis en suspension par le « run-up » de la vague (lame d'eau déroulant vers la plage) et emportés au large par son « run-down » (lame d'eau se retirant après déferlement) par réflexion des vagues sur le rivage en **suivant la ligne de plus grande pente**.

Plus l'intensité des vagues est forte, plus le sédiment est mobilisé et plus il sera transporté au large.

De même, plus la pente de la plage et de la plage sous-marine est forte, plus ce transport sera important. Le sédiment peut alors être « perdu » dans la fosse de lévigation en sortie de chenal, notamment au large des zones E.

Dans le cas de la plage de Ta'ahiamanu, les transports de sédiments transversaux de la plage semblent différents selon la partie de la plage :

Pour les zones A et S :

- Pente de plage faible (5%)
- Pente de plage sous-marine moyenne (10%)
- L'orientation de leur rivage et la présence du récif au large les protège contre les agents hydrodynamiques de la houle (cas n°1)

→ Morphologie favorable aux mouvements **du bas vers le haut de la plage** (accrétion)

Pour les zones E1, E2

- Plage quasi-verticale (talus à 90°)
- Pente bathymétrique forte de 25%
- Absence du récif frangeant à certains endroits

→ Transit cross-shore vers la plage très limité

Transit vers le large très fort dû à la présence de pentes sous-marines fortes et d'un Hs résiduel entre 0.2 et 0.8m selon les conditions de houle.

→ Les transferts vers le large sont alors supérieurs aux transferts vers la côte. Il y a **déséquilibre dans le bilan sédimentaire**

En ce qui concerne les mouvements induits par les houles normales, on note que les déplacements transversaux sont inégaux selon la partie de la plage.

De plus, la modélisation de l'agitation montre que l'énergie des vagues est fortement supérieure sur les rivages des zones E1 et E2 (Hs entre 0.2 et 0.8 m). Ces zones semblent subir d'importantes pertes sédimentaires (lieux des désordres observés et lieu de fortes érosions).

◆ *Sous l'action de houles obliques et courants induits*

Lorsque les houles ont une **incidence** oblique à la plage (cas n°4), un courant induit appelé **jet de rive** se crée. Dans ces conditions, le transport sédimentaire s'effectue de deux manières :

- Les vagues déferlant sur la plage entraînent dans un premier temps les sédiments vers le haut de plage, puis en se retirant entraînent ces sédiments au large suivant la ligne de plus grande pente. On a donc aussi un transport parallèle au rivage appelé **transport par jet de rive**.
- **Les courants induits** par le déferlement des vagues, peuvent selon leur intensité, **transporter parallèlement à la côte** les sédiments mis en suspension par les vagues. La modélisation indique que ces courants induits se déplacent du Sud vers le Nord, transférant le sable dans les cellules sédimentaires au Nord.

◆ *Mouvements sédimentaires sous l'action des courants de marée*

Pour que le sable soit mis en mouvement par les courants, la contrainte de cisaillement exercée par les courants sur le fond doit être supérieure à la valeur critique d'entraînement des matériaux. Les sables fins sont plus facilement mobilisables que les sables grossiers.

- En période calme et lors des marées basses, l'énergie des houles au large est fortement atténuée et les courants sont très faibles (l'eau y est claire).
→ Ces conditions favorisent le dépôt des sédiments.
- En période calme et lors des marées hautes et descendantes, l'énergie des houles au large est moins atténuée car l'ensachage est plus important.
→ Les courants à la côte sont plus forts et peuvent alors déplacer le sédiment.

◆ *Sous l'action des vents*

Le transfert sédimentaire causé par l'intensité des vents est appelé **transport éolien**. Il se fait de manière perpendiculaire à la plage avec des échanges entre l'arrière plage et la plage.

- **En période dominante**, les vents d'alizés (E) déplacent les sédiments de l'arrière plage vers la plage puis vers le large. Si celui-ci se dépose loin du rivage, en assez grande profondeur, il a toutes les chances d'être définitivement perdu dans les grands fonds. Par contre, s'il se dépose dans l'eau à proximité de la côte, il sera, en grande partie, ramené sur la côte par la houle.
- **En période d'évènements extrêmes**, les vents peuvent souffler du Nord vers le Sud et déplacent les sédiments vers la côte et l'arrière plage (rechargement de l'arrière plage).
- Ponctuellement, lorsque le **vent souffle parallèlement à la plage**, ou avec une certaine obliquité, le sable est déplacé, au moins partiellement, le long du trait de côte. Ce transit

sédimentaire vient alors s'ajouter à celui engendré par les courants dus aux houles résiduelles.

◆ *Sous l'action de la population*

La forte fréquentation de la population cause des mouvements de sédiments qui peuvent être importants dans certaines zones notamment dans la **zone E** où le piétinement est responsable d'un transport de masses de sable du haut du talus au bas de plage (Chutes de blocs de sable).

→ Masses remobilisées et emportées au large par l'agitation qui peuvent également être perdues.

5.5.2.2 Bilan sédimentaire

Note : Le bilan sédimentaire est défini comme le rapport entre les apports et les pertes de sédiments au sein d'une même cellule littorale (ici la plage de Ta'ahiamanu). S'il est positif, on parle d'accrétion ou d'engraissement de la plage, s'il est négatif, on parle d'érosion.

L'évolution du trait de côte de Ta'ahiamanu qui a connu une régression de 60% de la surface de sa plage et la présence de forts désordres liés à l'érosion sur le site, montre clairement **un bilan sédimentaire négatif**.

Les possibles causes sont multiples :

- **Faiblesse du stock de sédiments** mis à disposition dans la dynamique de la plage.
- **La faible quantité de sédiment en zone d'accumulation** (DAR) disponible pour les échanges sédimentaires.
- **L'absence de dunes sableuses**, le stock est insuffisant en arrière plage.
- **Pertes importantes de sables emportés au large** et en profondeur dans la fosse de lévigation. Ce sable peut-être **définitivement perdu** car non remobilisable vu la profondeur de son dépôt.
- **L'interruption du transit longitudinal de matériaux** due à la présence de murs verticaux de remblais au Nord et au Sud du site.
- **Extractions** ponctuelles de matériaux dans le lagon, notamment lié à la construction de la route de ceinture et probablement d'autres aménagements (bâtiments, remblais, etc...).
- **Piétinements du talus** par la population causant des **effondrements vers le bas de plage**. Ces masses sont alors à leur tour transportées au large par les houles.
- La dégradation des récifs adjacents qui sont alors moins producteurs.
- **Manque de transferts éoliens cross-shore** dû à la présence du pied du Mont Rotui et de la route littorale.

Tous ces facteurs montrent un manque général d'apport en sédiment pour la zone d'étude. Les apports ne semblent plus suffisants pour compenser les pertes lors de gros forçages hydrodynamiques. Les stocks semblent insuffisants pour un rééquilibrage total de la plage en période calme.

→ Le budget sédimentaire semble déficitaire notamment dans les parties E1 et E2 de la plage.

5.5.3 SYNTHESE ET COMMENTAIRES : LE FONCTIONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE DE LA ZONE D'ETUDE

L'ensemble des données recueillies permettent de tirer un certain nombre d'informations et de constats sur le fonctionnement hydrodynamique de la plage de Ta'ahiamanu :

✓ **En période agitée :**

- La houle subit une forte atténuation par déferlement sur le récif, avec un effet de seuil rapidement atteint.
- Avec de la surcote, cette atténuation est moins marquée, l'agitation dans le lagon est légèrement plus forte.
- La plage est relativement abritée des vagues, qui dépassent rarement 0.5 à 0.8 m. La partie Sud (zones E1 et E2) est plus exposée pour certaines conditions (sans surcote) et la partie Nord pour d'autres (avec surcote).
- Après réfraction, la direction des vagues est relativement frontale sur la plage, ce qui laisse supposer que des mouvements sédimentaires dans le profil (cross-shore) se produisent avec une érosion du haut de plage vers le bas de plage. D'autre part, la présence de débris de beachrock et récifs adjacents dans ces zones modifie la courbure des vagues qui en résultent plus énergétiques.
- A l'échelle de la plage, on constate que des courants forts longent la plage du Nord-est vers le Sud-ouest, avec un pic de vitesse atteint dans le chenal. Un courant de retour anti-horaire apparaît clairement dans toutes les conditions de houle du large au niveau des zones E1 et E2 de la plage.

- Ce courant est susceptible d'être **une des principales raisons de l'érosion de la plage Sud** : les sédiments remis en suspension par l'action conjointe de la houle et du courant lui-même, peuvent être transportés du haut de plage vers le chenal (forte pente sous-marine). **Les sédiments ainsi expulsés ne peuvent plus réintégrer la cellule sédimentaire de la plage, piégés par la fosse que constitue le chenal, et exportés vers le large par les forts courants qui s'y concentrent. Ces pertes sédimentaires ne sont pas compensées par les éventuels apports par le Nord, le bilan net est donc négatif.**

✓ **En période calme :**

Il est très probable qu'en dehors des événements de forte énergie, le bilan hydrosédimentaire de la plage soit à l'équilibre, voire en reconstruction grâce aux apports provenant des zones A et S qui peuvent tout à fait se déposer sur les zones E de la plage, bien protégée de la mer de vent liées aux conditions d'alizés.

- Même si le régime calme est dominant au cours de l'année, quelques événements forts dans l'année peuvent suffire à rendre ce bilan global négatif. D'autre part, l'artificialisation du rivage entourant la plage semble diminuer voir interrompre les apports sédimentaires longitudinaux. Le manque de stock dans certaines zones d'accumulation et la présence des pentes du chenal semblent eux responsables d'une insuffisance sédimentaire dans les apports transversaux, notamment dans les zones E1 et E2, lieux des désordres.
- Le bilan sédimentaire est alors négatif et explique la régression continue de la bande de plage au fur et à mesure des années.

Afin de retrouver un fonctionnement hydrosédimentaire en équilibre, il est important de prêter attention à ces mécanismes et d'étudier les solutions existantes pour lutter face à ce déséquilibre :

- **Recharger le site en sables ;**
- **Rééquilibrer les pentes de plage afin d'atténuer les houles résiduelles frontales à la plage ;**
- **Limiter la perte de sédiment vers le large dans les zones à risque (E1 et E2) ;**
- **Revégétaliser l'arrière plage et éviter le piétinement dans certaines zones afin de mieux fixer les sédiments du haut et de l'arrière de plage.**

Pour répondre à cela, plusieurs actions sont présentées par la suite. Certaines de ces actions dites « douces » et « naturelles » seront envisagées dans le but de retrouver une belle bande de plage tout le long du rivage de la plage de Ta'ahiamanu. Sans intervention préventive, il est très probable que la plage continue progressivement à perdre de sa surface et que les désordres s'accroissent avec le temps. En effet, il n'existe plus de stock mobilisable au Sud de la plage, le terrain d'arrière est attaqué et ne peut plus se défendre naturellement, engendrant une érosion importante et irréversible, faute de matériaux mobilisables.

5.5.4 IMPACT DES AMENAGEMENTS DU LITTORAL DE TA'AHIAMANU SUR LES PROCESSUS HYDROSEDIMENTAIRES

L'analyse de l'évolution du littoral de la zone d'étude exposée au chapitre 4 permet de mettre en évidence l'impact des aménagements d'origine anthropique sur les processus sédimentaires. Ils sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Conséquences des aménagements du littoral sur les processus hydrosédimentaires

Ouvrages / Evènements	Conséquences sur les processus hydrosédimentaires
Construction de la route	<ul style="list-style-type: none"> • Barrière entre l'arrière plage et la zone d'arrière route responsable d'un arrêt partiel des échanges sédimentaires entre les deux cellules • Stabilisation de certaines parties du littoral
Construction des habitations Protection des habitations avec des murets verticaux ou des enrochements	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution voire interruption des transits longitudinaux • La plage ne connecte plus avec ses cellules sédimentaires adjacentes (transport transversal uniquement) • Réflexion de la houle au pied des édifices • Augmentation de la cambrure de la vague <ul style="list-style-type: none"> → Impact sur les courants induits par les vagues → Impact sur l'écologie → Perte définitive de stock
Extractions de matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des stocks dans les DAR du lagon <ul style="list-style-type: none"> → Impact sur l'intensité des courants
Creusement du chenal pour accès des bateaux dans le lagon	<ul style="list-style-type: none"> • Modifie les durées et intensités des courants <ul style="list-style-type: none"> → Impact sur les transferts sédimentaire de la DAR externe

5.5.5 AGENTS NATURELS ET ANTHROPIQUES RESPONSABLES DES DESORDRES DE LA PLAGE

Désordres	Facteurs / Causes	Conséquences
<p>Erosion forte de la bordure du littoral des zones E</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Houles résiduelles en période agitée - Manque de stock sédimentaire en arrière plage et dans la DAR adjacente - Présence d'enrochements plus au Sud 	<p>Diminution de la protection naturelle du trait de côte contre l'action des houles</p> <ul style="list-style-type: none"> → Réflexion des vagues accentuée ayant pour conséquence un transport de sable vers le large et en profondeur qui risque d'être définitivement perdu dans la fosse de lévigation → Sollicitation des sédiments du haut de plage pour combler les dépressions → Destruction du végétal, chutes d'arbres dans l'eau et racines mis à nu.
<p>Arbres transversaux tombés en bas de plage</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Racines attaquées par l'agitation - Chute sous l'action des vents 	<p>Baignade impossible dans ces zones de la plage</p> <p>Les arbres mis en travers agissent comme « épis » naturels bloquant le transit sédimentaire longitudinal</p> <ul style="list-style-type: none"> → Légère accrétion en amont et érosion en aval
<p>Présence de beachrock émergé et du récif adjacent détruit</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Houles exceptionnelles de N - Murets de renforcements présents au Sud de la zone 	<p>Le stock de sable dans cette partie de la plage est quasi-inexistant</p> <p>Modifie la courbure des vagues en augmentant son énergie de déferlement (effet « slab »)</p> <p>Baignade compliquée / dangereux pour les enfants</p>
<p>Ancienne digue sous-marine (Zone E2)</p> 	<p>Mise en place d'une digue sous-marine transversale composée de blocs basaltiques afin d'essayer de retenir le sable en zone E2</p>	<p>Ancienne digue transversale au rivage (épi sous-marin) en très mauvais état</p> <ul style="list-style-type: none"> → Dénature les fonds sous-marins → Impact sur les transferts sédimentaires longitudinaux → Conséquences écologiques néfastes
<p>Dépression dans le profil de plage</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie du Beachrock volontairement arrachée pour le passage des bateaux de l'école de voile - La houle résiduelle n'est plus atténuée et attaque directement la plage 	<p>Forte érosion</p> <p>Destruction du talus</p> <p>Fragilisation du beachrock adjacent</p>

Les désordres sont causés principalement par la houle et ses caractéristiques. Les infrastructures au Sud de la plage interdisent aujourd’hui certains échanges sédimentaires longitudinaux. Ces désordres eux-mêmes influencent la dynamique de déferlement des houles avec des modifications de la courbure des vagues qui accentuent encore plus les conséquences de ces désordres.

6. ENJEUX ALEAS ET RISQUES DU SITE

ENJEUX	ALEAS	RISQUES
Résilience de cette portion du littoral Forte fréquentation par la population Attrait touristique (dont plaisanciers) Zones de baignade Route / Parking Ecologie de l’arrière plage Futurs aménagements de l’arrière plage Adaptation aux risques liés au changement climatique	Cyclones Fortes houles incidentes Forts courants de dérive Surcote du lagon	Erosion de la plage qui tend à s’accélérer dans sa partie Sud Submersion marine Déracinement des arbres Affouillements Impact à terme sur habitations riveraines Attaque mécanique de la route/ futur parking Impact environnemental



Figure 26 : Localisation des secteurs à risque

La partie Sud de la plage est particulièrement à risque au regard des enjeux et aléas cités ci-dessous. Les propositions d’action se concentreront donc tout particulièrement sur cette zone.

7. PRECONISATIONS D’OUVRAGES POUR LUTTER CONTRE LES PHENOMENES EROSIFS

7.1 BIBLIOGRAPHIE

Certains travaux sur la gestion du trait de côte ont été réalisés et proposent des solutions face aux phénomènes d’érosion et de submersion. Ces travaux sont tout de même très limités pour la Polynésie, et peu d’entre eux ont fait l’objet de suivis dans le temps à ce jour (certaines techniques sont assez récentes).

◆ **Pour la PF :**

- « *Projet ARAI 3* » réalisé par le BRGM (2014).
Ce rapport propose une synthèse et une analyse de l'efficacité et des impacts environnementaux des ouvrages, des aménagements et des stratégies alternatives de gestion du risque de submersion marine en Polynésie française et dans le monde. Les ouvrages et aménagements existants en Polynésie française ont été recensés et classés en fonction de leur dimensionnement et de leur position sur le profil de côte (petits-fonds, bas de plage, haut de plage et arrière-plage). **Il a été mis en évidence qu'il n'existe quasiment pas d'ouvrage spécifiquement édifié et dimensionné pour lutter efficacement contre la submersion marine.** En fonction de leurs positions sur le profil, ils peuvent avoir des effets néfastes et variés sur les processus sédimentaires et contribuent souvent à dégrader le littoral ainsi que les écosystèmes du lagon.
- « *Livret pédagogique de protection du littoral contre l'érosion en milieu récifal* » (Ministère polynésien de l'environnement, DIREN, 1995)

◆ **Ailleurs dans le monde :**

- « *Rapport sur les recherches de solutions de protection du littoral d'un nouveau type* » (Centre d'études techniques Maritimes et Fluviales, 1994)
Suite à ce rapport, Le CETMEF a lancé en 2009 une large bibliographie pour recenser les études nationales et locales traitant du recensement, du diagnostic et du suivi des ouvrages.
- Thèse de doctorat « *Fonctionnement et efficacité des ouvrages statiques de protection des littoraux sableux* » (Lachaud.Y, 1992)
- Hawaii Coastal erosion website. <http://www.soest.hawaii.edu/coasts/erosion/>
Techniques et exemples des aménagements du littoral hawaïen face aux problèmes d'érosion.
- « *Adaptating to coastal climate change* » - A guide book for developpment planners. USAID (2009)
- Livret pédagogique « *Gestion de l'érosion du littoral de Mayotte* » (BRGM, 2008)
- Guide « *Gestion de l'érosion du littoral de La Réunion* » (BRGM)
- Thèse de doctorat « *Le littoral martiniquais : milieux dynamiques et gestion des risques* » (Saffache, P., 1998)
Etudes sur différentes parties du littoral en érosion et leurs aménagements.
- « *Inventaire et analyses des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral Corse* » (BRGM, 2014)
Ce rapport présente l'ensemble des solutions existantes et applicables au littoral Corse, avantages et limites.
- « *Coastal erosion management manual* »ARC 2000. Auckland regional council (2000)
Manuel des solutions dures et des solutions douces employées sur les littoraux néo-zélandais (techniques et exemples de situations)
- « *Guide de réhabilitation écologique du littoral. Des populations en lien avec la nature* » SPREP, 2015.

Concernant l'impact des ouvrages en bas de plage :

- « *Fonctionnement et efficacité des ouvrages statiques de protection des littoraux sableux* » Thèse de doctorat, LALAUT Y. (1992)
- « *Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion* » Comité français des géosynthétiques. Ch. Littoral (Edition 2003)
- « *Document stratégique pour l'implantation des récifs artificiels* » Ministère français (2012)
- Exemple : « *Analyse d'un ouvrage de bas de plage : le brise-lame de Saint-Anne à Salins de Giraud : un exemple unique en France* » Briand O. (non daté)
- Exemple de la plage de l'îlot Amédée (Nouméa, Nouvelle-Calédonie). « *Analyse de l'érosion du site et conceptualisation d'une défense de génie civil côtier. Contrôle dynamique de l'évolution correctrice post-aménagement* » (Allenbach M ; non daté)

Concernant le rechargement artificiel de plage :

- « *Beach nourishment projects, practises and objectives – a european overview* », *Coastal Engineering*, vol. 47, n° 2, p. 81-111. Lechuga (A.), Spanhoff (R.), 2002
- « *A summary of European experience with shore nourishment* », *Coastal Engineering*, vol. 47, n° 2, p. 237-264. Hamm (L.), Capobianco (M.), Dette (H. H.), Lechuga (A.), Spanhoff (R.), Stive (M. J. F.), 2002

→ Synthèse des techniques de rechargement artificiel de plages utilisées sur les littoraux européens, exemples et applications.

- « *Beach Nourishment: A Review of the Biological and Physical Impacts* » ASMFC Habitat Management Series #7 (2002)
Etude des impacts biologiques et physiques d'un rechargement de plage.
- Exemple : « *Suivi morpho-sédimentaire de la plage de Sainte Anne du Portzic (Communes de Brest et Plouzané) dans le cadre des opérations de réhabilitation* » Rapport d'expertise scientifique, GEOMER-LETG UMR 6554 CNRS, IUEM/BMO, 23 p. Fichaut (B.), Suanez (S.), Prigent (M.), 2008.

Le principe des solutions dites « douces » ou « souples » a émergé en réaction aux effets contraires suite à l'implantation d'ouvrages de défense. Il s'agit non plus de se défendre de la mer mais de « composer avec » les phénomènes et processus naturels qui interviennent dans l'évolution du littoral.

La démarche n'est plus d'envisager une « lutte » contre l'érosion mais « une gestion » continue du littoral intégrant la dynamique naturelle. Les méthodes « douces » ont une durée de vie plus limitée mais sont généralement réversibles. La démarche environnementale concerne également le choix des matériaux afin qu'ils s'intègrent au mieux dans le milieu naturel. Mais on rappelle que ces méthodes ne sont pas dénuées d'impacts sur le milieu, en particulier durant la phase de travaux.

Toutes les techniques qui pourraient être appliquées ont été étudiées et ont permis d'établir le tableau ci-dessous résumant les solutions existantes dans la limite et l'applicabilité du site de Ta'ahiamanu.

Tableau 6 : Solutions existantes de lutte contre l'érosion applicables au site de Ta'ahiamanu – OUVRAGES EN DUR

Localisation cross-shore	TYPE	EFFETS	AVANTAGES	LIMITES	Commentaires
Haut de plage	Murs de remblais Enrochements verticaux	<ul style="list-style-type: none"> • Fixe le trait de côte • Permet de gagner du terrain 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection contre les submersions marines • Gain de terrain de l'arrière plage et sécurité des enjeux (parc) 	<ul style="list-style-type: none"> • Détérioré le paysage • Erosion au pied des murs • Interruption des transferts sédimentaires cross-shore • Régression progressive de la plage 	<p><i>Très utilisé en PF pour la fixation du trait de côte mais effets négatifs sur les plages de sable</i> <i>Coût important</i></p>
Bas de plage	Epis transversaux	<ul style="list-style-type: none"> • Réduit fortement l'érosion en amont de l'ouvrage • Engraissement à l'amont de l'ouvrage • Accentuation de l'érosion en aval de l'ouvrage • Effets visuels négatifs 	<ul style="list-style-type: none"> • Ralenti l'érosion d'une côte sableuse par piégeage du sédiment • Réduit la quantité de sable à recharger 	<ul style="list-style-type: none"> • Forte érosion en aval de l'ouvrage • Risques de rupture lors de gros forçages hydrodynamiques • Suppression des échanges longitudinaux • Irréversibilité 	<p><i>Ex aux Tipaniers (Moorea)</i> <i>Coûteux</i> <i>Effets négatifs plus loin sur le littoral</i></p>
Petits fonds	Ouvrage brise lames	Ouvrages longitudinaux immergés ou émergés qui absorbent une partie de la houle et protègent de la surcote marine	<ul style="list-style-type: none"> • Absorbe l'énergie de la houle • Lutte contre les phénomènes d'érosion 	<ul style="list-style-type: none"> • Impact potentiellement négatif sur les écosystèmes (recouvrement fonds...) • Impacts visuels (si émergés) 	<p><i>Coût important</i> <i>Entretien régulier</i></p>

Tableau 7 : Solutions existantes de lutte contre l'érosion applicables au site de Ta'ahiamanu – AMENAGEMENTS SOUPLES

Localisation cross-shore	TYPE	EFFETS	AVANTAGES	LIMITES	Commentaires
Arrière plage	Végétalisation⁴	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle la mobilité du stock de sable de l'arrière plage 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection durable du stock • Préserve le caractère naturel de la plage • Ralenti la vitesse du vent au sol • Facile à coupler avec d'autres méthodes 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne supprime pas directement l'effet érosif du bas de plage • Limité par la présence d'ouvrages anthropiques (maisons, route) • Nécessite un chemin d'accès (canalisation du passage) 	<i>A coupler avec d'autres méthodes</i> <i>Peu coûteux</i> <i>Pédagogique</i> <i>Répliquable facilement</i>
	Rideaux brise-vent	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode ancestrale • Consiste à disposer des filets en fibre de coco ou synthétiques pour favoriser le dépôt de sable 	<ul style="list-style-type: none"> • Limite l'érosion éolienne • Favorise le dépôt de sédiment • Facile à coupler avec d'autres méthodes 	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de matériaux synthétiques (polluant) • Peut souffrir lors des tempêtes 	<i>Peu coûteux</i>
	Canalisation de la fréquentation	Création d'un ou plusieurs chemins d'accès entre le parking et la plage	<ul style="list-style-type: none"> • Limite le piétinement sur le couvert végétal • Diminue l'érosion du haut de talus 	<ul style="list-style-type: none"> • Interdit l'accès de certaines parties de l'arrière-plage 	<i>Peu coûteux mais entretien et suivi nécessaire</i>
Plage / Haut	Rechargement artificiel en sables	Permet de compenser le déséquilibre de la plage par réapprovisionnement en sable	<ul style="list-style-type: none"> • Elargissement de la plage • Rôle protecteur des submersions marines • Stock de sable à disposition pour les échanges sédimentaires • Aucun impact sur le littoral avoisinant • Ne perturbe pas l'hydrodynamisme sédimentaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification et suivi à long terme (rechargements à prévoir) • Ne supprime pas l'effet érosif • Besoin d'une source de sédiments proche 	<i>Méthode amplement utilisée dans les sites touristiques</i> <i>Opération à répéter périodiquement</i>

⁴ Les types de solutions les plus pertinentes pour le site de projet sont en rouge

de plage	Reprofilage	<ul style="list-style-type: none"> • Accélère le retour à la pente d'équilibre • Dissipe mieux l'énergie des vagues 	<ul style="list-style-type: none"> • Facile à mettre en œuvre • Coûts faibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Doit être associé à d'autres solutions 	
Plage / Haut de plage (suite)	Nettoyage raisonné	Laisser la laisse de mer naturelle, les débris coralliens et autres bio-déchets de taille moyenne (cm à dm) dans la zone de déferlement	<ul style="list-style-type: none"> • Favorise la fixation du sédiment Atténue l'effet érosif 	<ul style="list-style-type: none"> • Doit être fait à la main • Haut de plage moins attrayante 	<i>Peu coûteux</i>
Petits fonds et bas de plage	Conteneurs géotextiles	<ul style="list-style-type: none"> • Rôle de retenu des sables lors de leur transport vers le large • Possible diminution de l'énergie des vagues 	<ul style="list-style-type: none"> • Ouvrage continue et « étanche » • Mise en œuvre relativement simple • Technique très répandue • Substrat peu favorable pour le développement de la faune marine (pas de cavités, pas de fixation des coraux) 	<ul style="list-style-type: none"> • Stock de sédiments pour les remplir • Exposé au vandalisme • Risque d'enfouissement • Réversibilité limitée • Effet récif limité (substrat peu favorable aux coraux) 	<i>Retours d'expérience variés, positifs ou non selon les sites et les problématiques Similaire à une solution « dure »</i>
	Ouvrages en enrochements naturels	<ul style="list-style-type: none"> • Rôle de retenu des sables lors de leur transport vers le large • Possible diminution de l'énergie des vagues 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre maîtrisée • Disponibilité des blocs basaltiques • Bonne étanchéité • Substrat et ouvrages utilisables par la faune marine (abris, support pour coraux...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d'enfouissement • Mouvements possibles des blocs en cas de très fortes houles (cyclone notamment) → entretien nécessaire • Mise en œuvre coûteuse sur site non accessible depuis le rivage 	<i>Reste une solution « dure »</i>
	Récifs artificiels en éléments artificiels (béton)	<ul style="list-style-type: none"> • Rôle écologique (objet principal) • Rôle possible de retenu des sables et de limitation de l'agitation 	<ul style="list-style-type: none"> • Support de développement de la faune marine • Rôles secondaires possibles notamment retenue des sables 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité faisant débat • Suivi et entretien régulier • Mise en œuvre coûteuse sur site non accessible depuis le rivage • Coûts important (fabrication en béton) 	<i>Peu compatible avec l'effet recherché sur Ta'ahiamanu (butée de pied de la plage)</i>
	Pieux hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> • Mis en place longitudinalement et transversalement sur la plage et/ou dans l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Atténue l'énergie des vagues sans bloquer le transport sédimentaire • Pieux en bois écologiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Obstacle pour baigneurs et promeneurs • Peu adapté à une plage touristique 	<i>Coûts assez faibles</i>

7.2 PROPOSITIONS D'AMENAGEMENTS APPLICABLES A TA'AHIAMANU

7.2.1 CONTRE-CHOIX

Le but étant de trouver des méthodes dites « souples » et intégrées dans l'environnement du site, certaines techniques fréquemment utilisées en Polynésie ne sont pas conseillées ici.

◆ *Epis transversaux*

C'est l'une des techniques les plus couramment utilisée. Des épis formés par des blocs sont installés en vue de réduire l'érosion des plages. Dans les zones où ils sont placés, ils contribuent à stabiliser et engraisser la plage et l'avant plage permettant ainsi de garder un profil plus équilibré et une pente plus faible favorisant la dissipation de l'énergie des vagues lors des tempêtes.

Mais les effets néfastes induits par les épis sont bien connus, notamment **le report des problèmes d'érosion sur les segments côtiers voisins qui reçoivent moins d'apport de sédiment par la dérive littorale**. Ces segments se retrouvent ainsi avec un budget sédimentaire déficitaire provoquant leur érosion. La figure suivante schématise le processus (d'après Paskoff 1985, MEEDDM 2010).

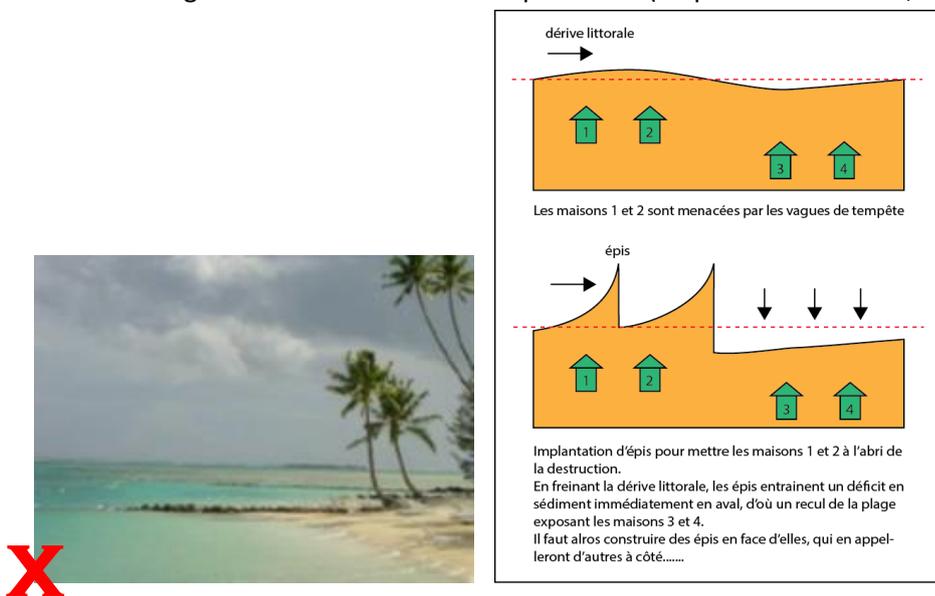


Figure 27 : Principe de fonctionnement des épis transversaux (image : les Tipaniers-Moorea)

◆ *Aménagements de haut de plage*

Les aménagements présents en haut de plage sont très utilisés en Polynésie française et très variés dans leurs formes et leur mode de construction. Ils visent en général à stabiliser le trait de côte, à valoriser un terrain notamment en le nivelant et en le remblayant, et à délimiter une propriété.

Les murs et enrochements qui y sont présents perturbent la dynamique hydro-sédimentaire cross-shore en empêchant les transferts sédimentaires entre le bas de plage, la plage et le haut de plage. La présence d'ouvrages notamment verticaux, en haut de plage occasionne, lors des tempêtes, le déferlement brutal des vagues sur l'ouvrage avec une très forte énergie et une forte réflexion. Ce déferlement brutal contribue à mobiliser les sédiments présents sur la plage qui sont alors emportés lors du reflux en bas de plage ou en avant plage provoquant une érosion rapide.

De plus, dans le cas de l'occurrence d'un évènement fort à extrême, la destruction au moins partielle de ces ouvrages n'est pas à exclure surexposant alors l'enjeu à l'aléa. Ce type d'aménagement contribue donc fortement à diminuer la résilience du littoral face aux processus d'érosion et indirectement à favoriser les constructions d'enjeux dans des zones d'aléas.

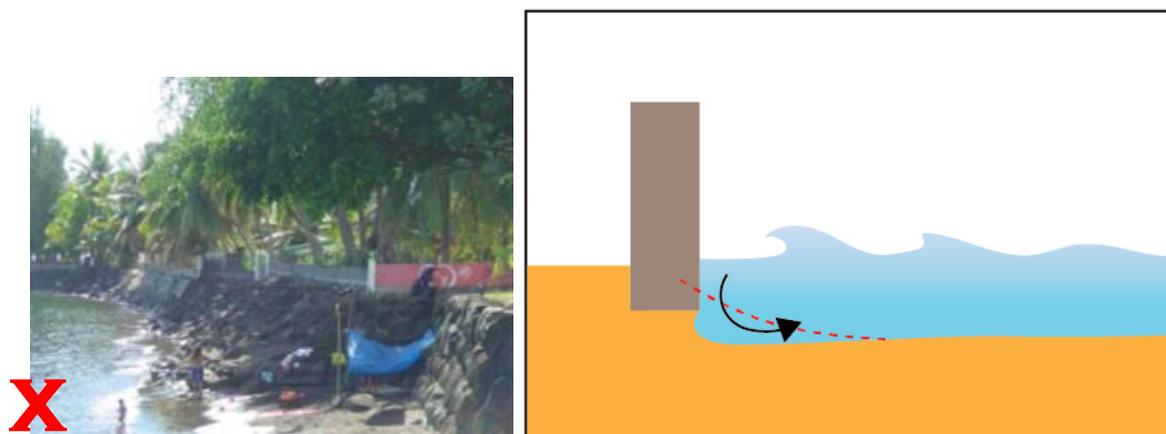


Figure 28 : Principe de l'affouillement au pied d'un ouvrage (murs de bas de plage ou enrochement), disparition de la plage au pied des ouvrages

7.2.2 ACTION 1 : RECHARGEMENT DE PLAGE

7.2.2.1 Objectif

Le rechargement artificiel en sédiments d'une plage constitue la méthode douce la plus utilisée (Rogers, 2000 ; Hamm et al, 2002 ; Cohen et Anthony, 2005) car elle permet entre autre, d'augmenter l'attractivité balnéaire des plages, un des objectifs dans le cas du site de Ta'ahiamanu.

Le rechargement a pour but de compenser le budget sédimentaire déficitaire sans perturber le jeu naturel des processus hydrosédimentaires de la zone. L'alimentation de la plage doit se faire à partir d'un sable de composition et de granulométrie identique ou idéalement légèrement supérieure à celui de la cellule sédimentaire⁵.

Le rechargement n'a donc pas pour objectif de stopper définitivement l'érosion mais d'en limiter les effets sur une période de temps donnée en lien avec le volume mis en place et la survenance d'évènements météo-océanographiques significatifs (très fortes houles, cyclones).

La plage de Ta'ahiamanu est globalement déficitaire, en raison de l'absence de transit sédimentaire, lié à la disparition totale de sables de part et d'autres du site. Seul un apport artificiel permettra de retrouver une réelle plage sur le site, notamment sa partie Sud.

Le rechargement permet également de reprofiler la plage c'est-à-dire de réduire la verticalité de la pente et donc d'atténuer l'agressivité de la mer. Le reprofilage est souvent accompagné d'une végétalisation et/ou d'un boisement du talus et de l'arrière plage.

⁵ La cellule sédimentaire correspond à la zone à l'intérieure de laquelle le sédiment circule avec peu ou pas d'échanges avec l'extérieur

Il est important **de procéder au boisement du talus** afin de stabiliser le haut de plage. Le choix des espèces végétales est primordial car il faut que la plantation contribue à l'ancrage des terrains superficiels et qu'elle soit adaptée au milieu littoral (résistance aux vents et au sel).

La figure 31 montre le profil de plage actuel puis le profil attendu après les opérations de rechargement / reprofilage et de végétalisation du haut de plage des zones en érosion (E1 et E2).

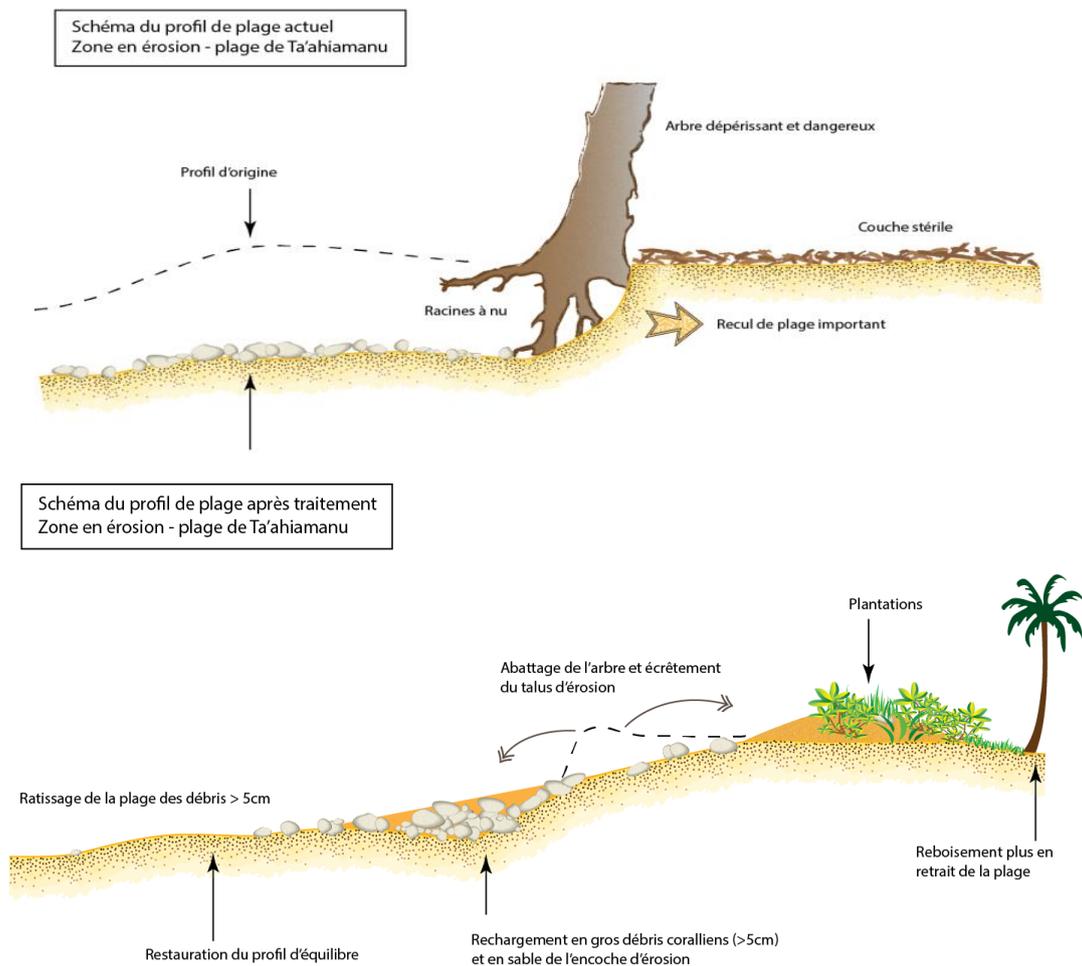


Figure 29 : Schéma d'un profil de plage en érosion actuel et après traitement

7.2.2.2 Caractéristiques du rechargement

La zone à rechargée s'étend du milieu de plage (zone S) jusqu'au Sud de la plage (zone E) et également devant les maisons bordant le Sud du site. En effet, pour être efficace, le rechargement doit concerner une zone suffisamment large afin de limiter les déperditions de sables par la dérive littorale.

Les figures ci-dessous présentent l'implantation du rechargement proposé. A noter que l'ouvrage représenté en rouge concerne l'action 2 décrite ci-après.

Un volume théorique d'apport de **5 300 m³** a été considéré pour recharger le secteur en érosion de la plage en reconstituant un solarium de haute plage et une plage sous-marine sableuse relativement large. Ce volume tient compte des recommandations du CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales) qui conseille de retenir 10% de perte lors du rechargement.

Il nous paraît primordial, si l'on souhaite conserver une berme de haute-plage et maintenir le profil de plage après rechargement de chercher à mettre en place une pente suffisamment faible pour être naturellement stable. Cette pente reste toutefois dépendante de la morphologie des fonds et de la présence de récif devant le site.

Les sables seront régalingés au moment des travaux de telle sorte qu'une banquette de haut de plage soit constituée à une altimétrie de +1.20mCM sur une largeur de 3 à 6,5 m selon la profondeur des encoches d'érosion au niveau de l'arrière plage et une pente (entre cette berme et le niveau de plage actuel) de l'ordre de 8.5%.

Le rechargement prévu sera réalisé idéalement avec un sable légèrement plus grossier que celui actuellement en place en haut de plage pour être plus efficace dans la lutte contre l'érosion constatée.

Préalablement au rechargement en sable, il sera impératif de réaliser des travaux d'abattage et d'extraction d'arbres, d'écêtements du talus en érosion et de comblements des encoches d'érosion avec des débris coralliens décimétriques et du sable.

7.2.2.3 Principe technique du rechargement

Les solutions techniques envisageables sont les suivantes :

- Dragage de sables dans le lagon :

Les stocks de sable corallien susceptibles d'être utilisés au rechargement de la plage de Ta'ahiamanu sont principalement ceux présents dans le lagon, et notamment au niveau du chenal lagonaire.

Cette solution se justifie par la présence dans le chenal de sables issus de l'érosion de la plage. Il s'agit donc de reprendre une partie de ces sables pour les remettre en place sur la plage. La méthodologie qui pourrait être mise en œuvre est la suivante :

- Pompage des sables en place dans le chenal (sables en partie issus de la plage après leur érosion) puis refoulement sur la plage
- Reprise des sables par une pelle mécanique sur la plage pour profilage de la plage
- Fourniture de sables terrestres originaires de Moorea
 - Transport des sables par camion jusqu'au site de Ta'ahiamanu
 - Mise en place et profilage de la plage par pelle mécanique

Cette solution se heurte à l'absence de carrières pour la fourniture des sables terrestres et ce sur tout le territoire de Polynésie française. Sauf ouverture d'une zone d'extraction, cette solution ne pourra pas être mise en œuvre. La solution de fourniture de sable corallien terrestre est donc hautement improbable.

7.2.2.1 Limites de cette solution

L'opération de rechargement seule ne permettra pas d'annuler les phénomènes érosifs qui affectent le site. La plage nouvellement créée pourra se défendre naturellement de certaines attaques liées à l'agitation mais les sables auront tendances à être repris et transportés petit à petit dans le chenal comme cela a été décrit dans le diagnostic du site.

Afin de limiter ce transport des sables vers le chenal, nous préconisons, en plus des opérations de rechargement et de revégétalisation, la mise en place d'une structure de bas de plage destinée à stopper une partie des sables avant leur chute dans le chenal. C'est la solution 2 présentée ci-dessous.

7.2.3 ACTION 2 : OUVRAGE SOUS-MARIN DE PIED DE PLAGE

7.2.3.1 Objectifs

Cette action est complémentaire et indissociable de l'action 1 – rechargement de plage. Elle consiste en l'implantation d'un ouvrage sous-marin destiné à maintenir autant que possible les sables à proximité de la plage et limiter ainsi leur transport vers le chenal profond.

Cet ouvrage agira comme une barrière ou une butée de pied de la future plage rechargée et permettra de piéger une partie des sables issus de l'érosion de la plage. Cela ajoute un stock important en sable réutilisable pour le « rééquilibrage naturel » de la plage. De plus, lorsque cela sera nécessaire, après un évènement exceptionnel type cyclone par exemple engendrant une forte érosion ponctuelle, un reprofilage de la plage pourra ainsi être effectué en utilisant les sables piégés devant l'ouvrage.

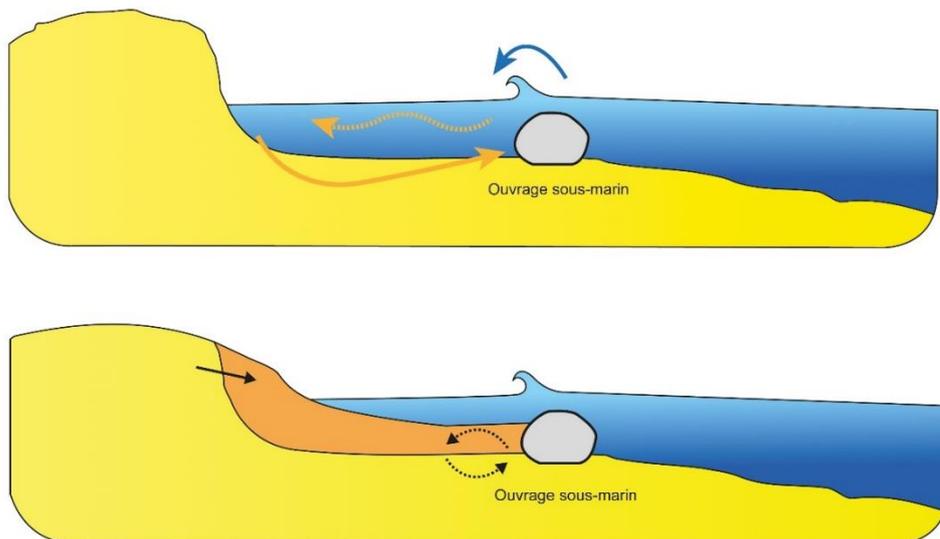


Figure 32 : Schéma de fonctionnement d'un ouvrage sous-marin type « butée de pied »

Ce type d'ouvrage atténue et absorbe une partie des houles incidentes, limite l'exportation des sédiments au-delà de sa position et respecte l'équilibre dynamique en autorisant les oscillations minimales du profil.

7.2.3.2 Solutions techniques envisageables

Cet ouvrage longitudinal sous-marin peut être de différents types, présentant chacun des avantages et des inconvénients. Nous présenterons ici les solutions envisageables au regard du site et du contexte polynésien.

Dans tous les cas, cet ouvrage sera déployé longitudinalement à la plage dans sa partie Sud exempte de récifs frangeant. Son arase supérieure sera située en subsurface à environ 0 m CM, de manière à être continuellement immergé pour limiter son impact visuel sur le site.

- **Ouvrage sous-marin en géotextile**

Il s'agit de conteneurs en géotextile remplis avec du sable. Le sable utilisé doit être similaire à celui présent sur le site au cas où le conteneur vienne à se déchirer. La solution de mise en œuvre la plus simple est un remplissage par pompage des sables dans le conteneur préalablement mis en place sur le site de pose. Les sables peuvent être pompés :

- directement depuis le gisement sous-marin proche situé dans le chenal lagonaire (site d'emprunt)
- depuis la plage après qu'ils aient été déposés par camion (provenance terrestre des sables).

L'ouvrage est posé sur un géotextile anti-affouillement lui-même ancré de part et d'autre par des petits conteneurs enfouis dans le substrat sableux.

- Solution techniquement envisageable sur le site de Ta'ahiamanu, impliquant toutefois une quantité de sables supplémentaire à draguer pour remplir les conteneurs géotextiles (environ 400 m³ de matériaux similaires à ceux en place sur la plage).

- **Ouvrage sous-marin en géotextile recouvert de blocs basaltiques**

Un noyau constitué d'un conteneur en géotextile rempli de sable sera recouvert de blocs naturels basaltiques. Les avantages principaux de cette solution sont les suivants :

- un besoin moindre en sable, le géotextile servant de noyau étant de taille réduite
- les blocs constituent une protection du géotextile diminuant les risques de vandalisme ou d'usure prématuré (hélice de bateau etc..)
- l'effet récif artificiel des blocs basaltiques et la possibilité d'y transplanter des coraux.

Les blocs basaltiques sont mis en œuvre depuis la plage à l'aide d'une pelle à fût capable de travailler dans la profondeur d'eau requise pour la pose de l'ouvrage.

- Solution non retenue en raison de la hauteur d'eau trop réduite sur la zone d'implantation (environ 2 m CM) qui implique un très faible diamètre du conteneur géotextile, réduisant nettement l'intérêt de la solution.

- **Ouvrage sous-marin en géotextile recouvert de matelas en gabion**

Dans ce cas de figure, l'ouvrage en géotextile reste de taille significative et est recouvert d'un matelas en gabion de 20 à 30 cm d'épaisseur. On retrouve dans cette solution des avantages similaires à la solution précédente. L'usure prématurée des gabions et les difficultés de réparation rendent cette solution moins attrayante.

- Bien que techniquement envisageable, nous ne proposons pas de retenir cette solution en raison de l'incertitude sur la durée de vie des gabions et les risques d'éparpillement des blocs les composant. Le retour d'expérience de ce type d'ouvrage est relativement faible.

- **Ouvrage sous-marin constitué de blocs basaltiques seuls**

L'ouvrage sera réalisé uniquement avec des blocs basaltiques. Cette solution a l'avantage de ne pas requérir de sable. La mise en œuvre pourra se faire depuis une barge ou éventuellement depuis la plage à l'aide d'un engin adapté et d'une rampe d'accès permettant de palier aux profondeurs de la zone.

- Solution techniquement envisageable sur le site de Ta'ahiamanu. La fourniture de blocs basaltiques sera relativement aisée auprès des producteurs locaux et les travaux de mise en œuvre sont maîtrisés par plusieurs entreprises locales.

7.2.3.3 Caractéristiques des solutions retenues

- **Ouvrage sous-marin en géotextile**

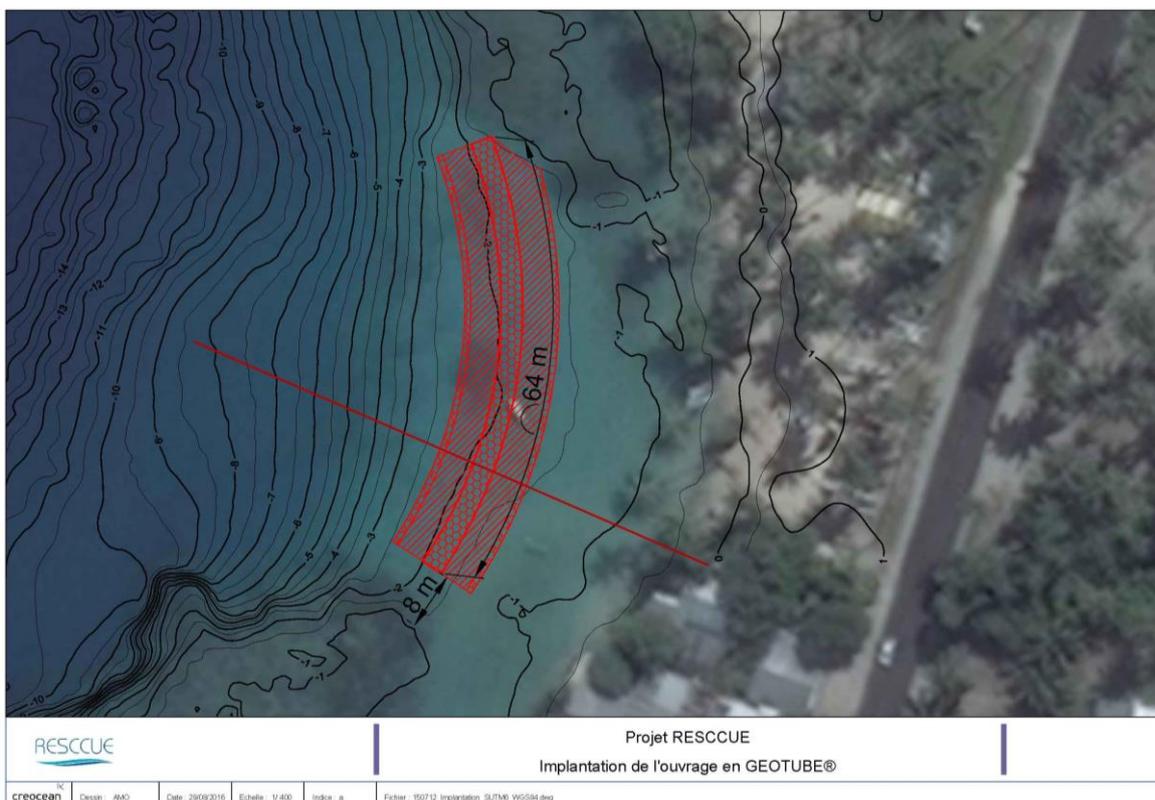


Figure 33 : Implantation de l'ouvrage sous-marin en conteneurs géotextile

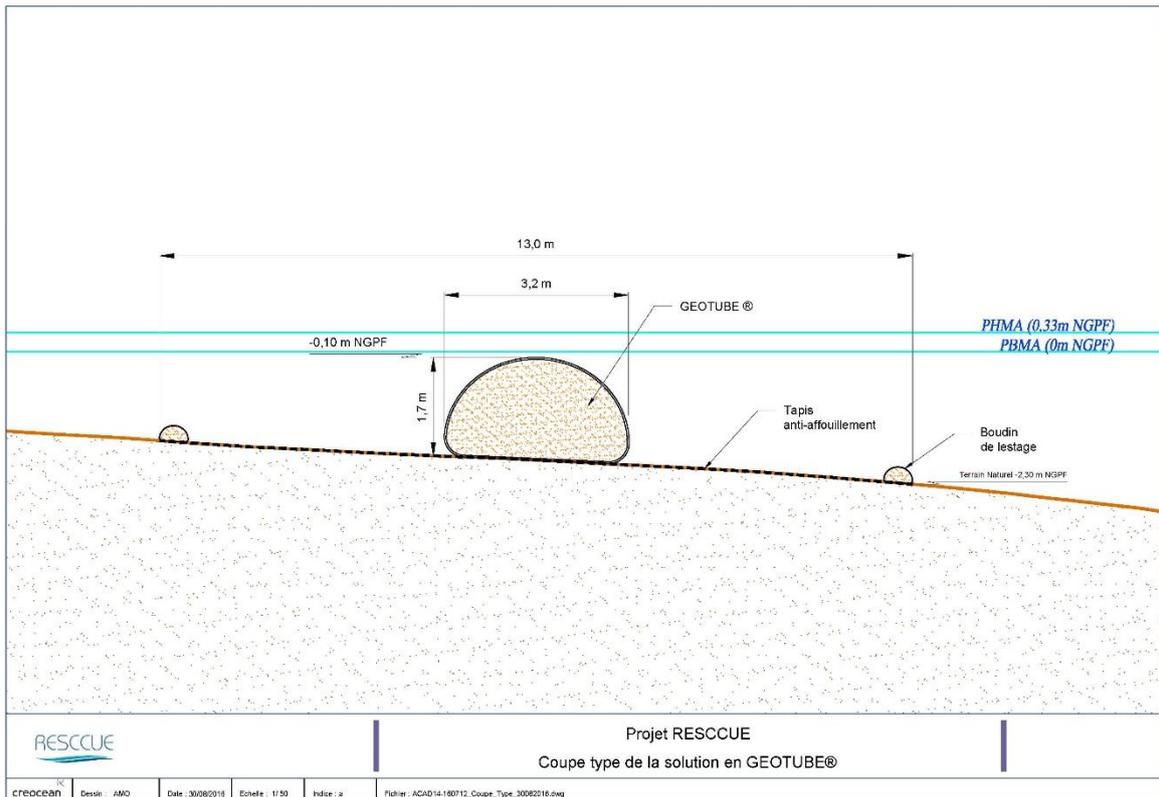


Figure 34 : Coupe type de l'ouvrage sous-marin en conteneurs géotextiles

- **Ouvrage sous-marin constitué de blocs basaltiques seuls**

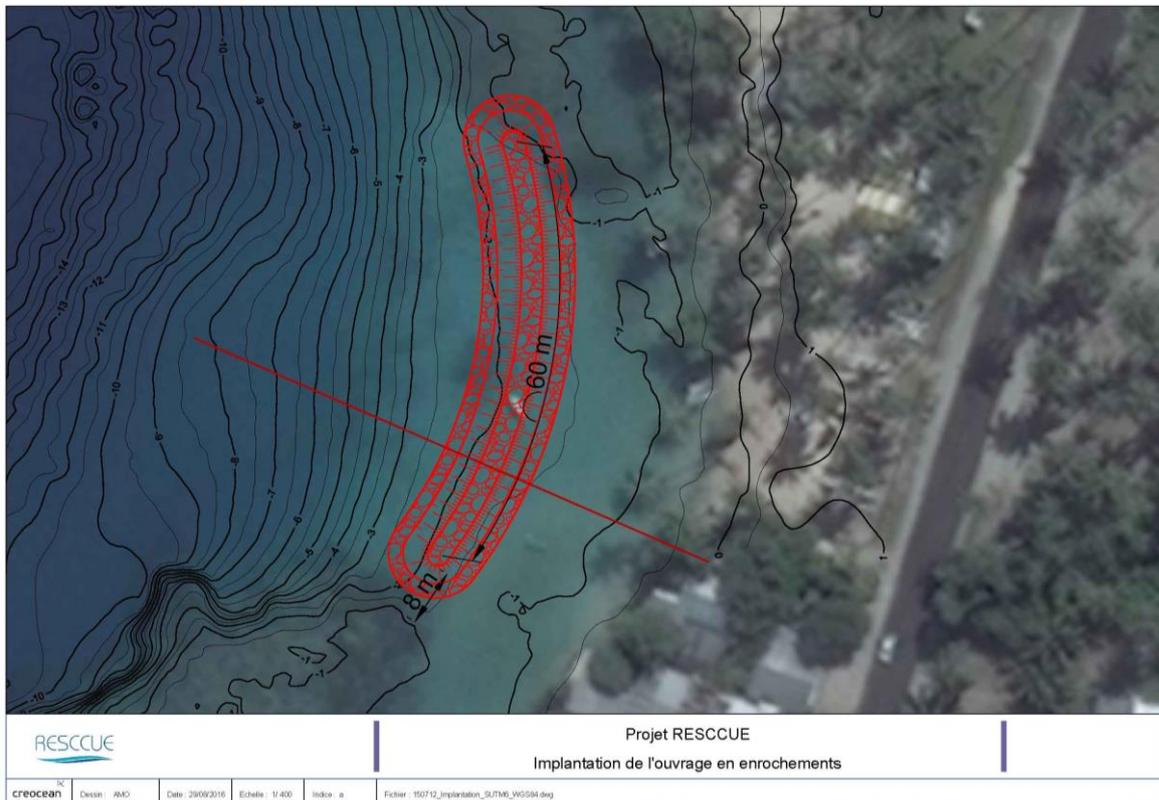


Figure 35 : Implantation de l'ouvrage en enrochements

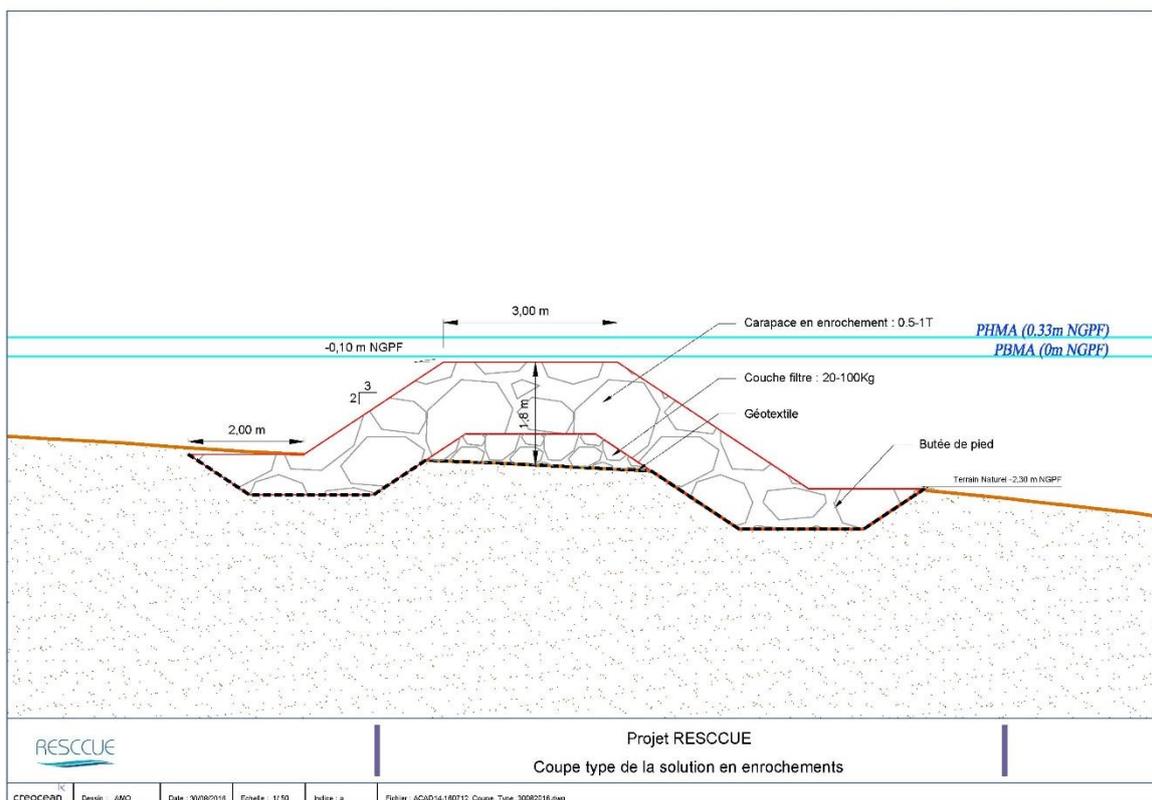


Figure 36 : Coupe type de l'ouvrage sous-marin en enrochements

7.2.4 ACTION 3 : VEGETALISATION DU HAUT DE PLAGE

C'est une action à privilégier en raison de son rôle positif sur le contrôle de la mobilité du stock de sable de l'arrière plage et la préservation du caractère naturel de la plage. De plus, les plantes tendent à ralentir la vitesse du vent au sol, limitant l'érosion éolienne. Cette action est complémentaire à l'action 1 de rechargement. En effet, en l'état actuel de la plage et notamment de sa partie Sud en érosion, cette action serait totalement inefficace (sauf pour la parti Nord).

Les actions concrètes proposées pour ce volet consistent notamment à proposer et implanter des espèces adaptées comme les arbustes naupata (*Scaevola taccada*), 'o'uru (*Suriana maritima*) sur le haut de plage (limiter l'érosion), au pied des arbres de place (limiter le piétinement et protéger les racines) mais également sur l'arrière-plage (aménagement paysager, canalisation des flux...), comme des arbres de place (espèces littorales locales connues pour leurs intérêts patrimoniaux et paysagers).

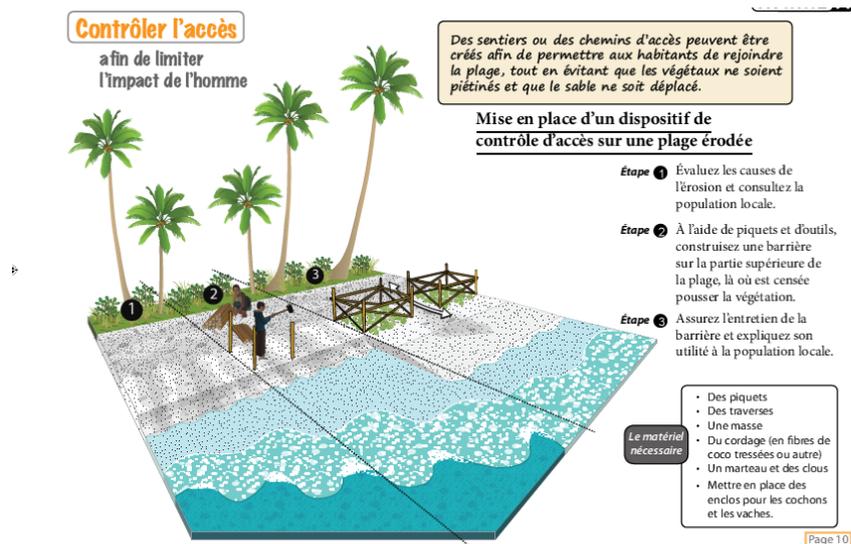


Figure 37 : Schéma de principe de revégétalisation d'un haut de plage (source : PROE)

Dans le cadre des actions préconisées pour lutter contre l'érosion de la plage de Ta'ahiamanu, nous préconisons une action de végétalisation de la plage et de l'arrière plage. Cette végétalisation par des espèces adaptées permettra de limiter les phénomènes d'érosion. Par ailleurs, elle se place dans un contexte où :

- la zone enherbée (par la graminée introduite *Stenotaphrum secundatum*, très résistante au piétinement) sera conservée coté route,
- à plus grande proximité du littoral, les actions de revégétalisation (arbustes) auront lieu tout en conservant à la fois des accès aux visiteurs mais également des zones où s'installer,
- au plus proche de la mer, hormis quelques accès, l'ensemble du haut de plage devrait être revégétalisé (arbustes et/ou lianes) par des bandes parallèles au rivage.

Dans un premier temps nous proposons de réaliser une **expérimentation sur le site de Ta'ahiamanu** afin de :

- Tester le niveau d'acclimatation des espèces envisagées sur le site,
- Déterminer la répartition la plus adaptée des espèces envisagées depuis le haut de plage jusqu'à l'arrière plage.

7.2.4.1 Espèces retenues pour l'expérimentation

Il s'agit de plantes indigènes largement répandues sur les littoraux des îles et atolls de Polynésie française. Elles sont ainsi particulièrement adaptées aux conditions écologiques du site de Ta'ahiamanu.

***Suriana maritima* ('o'uru)**

Zone d'implantation : haut de plage et arrière plage

Caractéristiques principales :

Arbuste présent sur de nombreux rivages tropicaux, présents notamment aux Tuamotu et sur les plages de sables coralliens.

Il affectionne les sables coralliens et se régénère souvent abondamment sur les zones décapées par la houle. Il est également employé pour végétaliser les hôtels situés sur les motu dans l'archipel de la Société ou aux Tuamotu.

Ses nombreuses racines et sa densité en peuplement pur en font un arbuste à recommander afin de limiter l'érosion et de fixer les zones sableuses littorales en substrat calcaire.



***Ipomoea pes-caprae* (pohue)**

Zone d'implantation : haut de plage et arrière plage

Caractéristiques principales :

Liane rampante de haut de plage. Forme de grands tapis denses permettant de stabiliser les sols et lutter contre l'érosion, notamment sur les hauts de plages de sable noir régulièrement léchés par les vagues.

En Polynésie française, cette liane est surtout présente sur les littoraux des îles hautes sur sable noir bien qu'elle soit aussi trouvée sur sable calcaire dans certains cas ou dans d'autres îles du Pacifique.



***Scaevola taccada* ('apata)**



Zone d'implantation : haut de plage et arrière plage

Caractéristiques principales :

Arbuste buissonnant pouvant atteindre 2 m de haut. Espèce des milieux riches en sel, sur sable ou sur cailloutis.

Deux variétés botaniques indigènes sont connues en Polynésie française : var. *taccada* au port plus dressé et

var. *tuamotuensis* au port plus prostré et lianescent.

Cette dernière est probablement à privilégier car la plus adaptée aux conditions difficiles et la plus rase (masquant moins le paysage).



***Heliotropium*
(tohonu)**

foertherianum

Zone d'implantation : arrière plage

Caractéristiques principales :

Arbuste à petit arbre commun sur les sables littoraux et particulièrement adapté aux conditions desséchantes des littoraux polynésiens.

Cette espèce est généralement plus en retrait du littoral que les 3 espèces précédentes.



7.2.4.2 Localisation des zones d'expérimentation proposées

Deux zones test principales ont été définies pour les plantations en arbustes. Il s'agit de deux rectangles (un premier **-R1-** de 5 m de large et 30 m de long, soit 150 m² ; un second **-R2-** de 6 m de large sur 15 m de long, soit 90 m²), perpendiculaires à la plage, qui seront plantés en *Suriana*, *Heliotropium* et *Scaevola*. Ces zones se distinguent par rapport à la dynamique de la plage avec une accrétion et une moins grande fréquentation au Nord-Est et une stabilité et une plus grande fréquentation au Sud-Ouest.

Par ailleurs, une bande de 3 m de large sur 10 m de long **-R3-** (30 m²) pourra également être délimitée en haut de plage parallèlement au rivage pour un essai consacré à la liane *Ipomoea pes-caprae* indépendamment des arbustes précédents.



Figure 38 : Implantation proposée des plantations expérimentales

7.2.4.3 Densités de plantation

Les densités de plantation devront être assez élevées pour tenir compte de la mortalité à la plantation (fréquentation, conditions écologiques desséchantes, houle possible...) mais également afin de couvrir rapidement la zone.

Relativement aux arbustes, un écartement de 1 m entre les pieds de *Heliotropium foertherianum* ou ceux de *Scaevola taccada* apparaissent pertinents car ce sont des plantes qui s'étalent rapidement

sans trop prendre de hauteur (densité de 1 pied au m²). Par contre, les densités de *Suriana maritima* au port plus érigé devront être plus importantes avec un pied tous les 66 cm (1/3 de mètre, soit une densité de 2,3 pieds au m²).

Pour la liane *Ipomoea pes-caprae*, en peuplement pur, un positionnement des boutures tous les 50 cm est à rechercher, soit une densité de 4 pieds au m². Autant que possible, les lignes de plantation devront être en quinconce afin d'occuper au mieux l'espace.

7.2.4.4 Organisation proposée pour la mise en œuvre de l'expérimentation

- **Fourniture des plantules**

Provenances :

Il est relativement aisé d'obtenir des plantules de *Suriana*, *Heliotropium* et *Scaevola* plutôt que les produire à partir de graines, en les prélevant sur les atolls des Tuamotu. En effet, il n'est pas réellement envisageable d'obtenir un grand nombre de plantules sur Moorea, bien que ces espèces y soient présentes, en raison de la rareté des zones favorables subsistantes aujourd'hui (secondarisation du littoral, urbanisation, plantes concurrentes). L'atoll de Rangiroa pourrait être privilégié en raison de sa grande taille (nombreuses zones littorales avec de la régénération des 3 espèces cibles précédentes) et de la présence d'un aéroport très régulièrement fréquenté.

Par ailleurs, la liane *Ipomoea pes-caprae* pourrait être mobilisée à partir de boutures prélevées sur des populations naturelles se développant à Tahiti (plage Lafayette, plage Taharuu...) ou Moorea.

Synthèse des quantités :

Les quantités de plants nécessaires sont récapitulées dans le tableau suivant :

Plantes	Parcelle R1 150 m ²	Parcelle R2 90 m ²	Parcelle R3 30 m ²	Total 270 m ²
<i>Suriana maritima</i>	184	120	0	304
<i>Scaevola taccada</i>	136	60	0	196
<i>Heliotropium foertherianum</i>	46	24	0	70
<i>Ipomoea pes-caprae</i>	0	0	120	120
Total	366	204	120	690

- **Repiquage des plantules ou des boutures**

Les pochons de repiquage à privilégier doivent être relativement longs (pour maximiser le développement racinaire) pour une largeur limitée (pour diminuer le volume de terre nécessaire). Nous proposons 10 cm de diamètre pour 20 cm de hauteur, soit un volume de 1570 cm³.

Ainsi, afin de produire 690 plants, il faudra 1.1 m³ de substrat de nature terre sableuse. Ce substrat pourrait idéalement être récupéré sur le site de Ta'ahiamanu côté montagne, afin d'être au plus proche des conditions du futur site d'implantation.

Une fois récupéré le substrat pourrait être acheminé vers la pépinière du SDR pour la mise en pochon des plantules et boutures (ces dernières éventuellement avec une hormone de bouturage).

- **Elevage en pépinière** : Phase d'élevage en pépinière durant probablement au moins 3 mois avec arrosage adapté.
- **Plantation sur le site de Ta'ahiamanu** : Une fois les plantules et boutures prêtes, elles pourront être plantées sur les 3 parcelles d'expérimentation de Ta'ahiamanu, avec mise en place de clôtures grillagées autour des massifs afin de limiter le piétinement et le passage de chiens.

7.2.5 ACTIONS COMPLEMENTAIRES

7.2.5.1 Action pédagogique

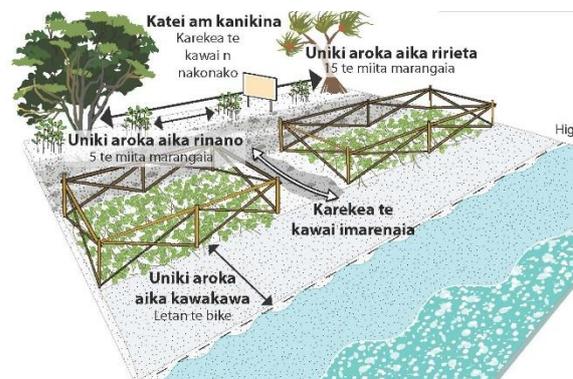
Un panneau pédagogique pourra être installé sur le site permettant d'expliquer le principe de tous les aménagements par des schémas et textes courts :

- Présentation du site, détail et objectifs des aménagements (gestion de la fréquentation, provenance du sable de rechargement, rôle de l'ouvrage sous-marin, etc...).
- Par exemple le fonctionnement d'un récif artificiel, les impacts positifs sur la biodiversité, etc...
- De même pour les plantations (nature, objectif de la plante...)



7.2.5.2 Canalisation de la fréquentation du site

Les mesures de végétalisation devront s'accompagner d'une canalisation de la fréquentation. Un ou plusieurs chemins d'accès seront définis selon les futurs aménagements réalisés et l'implantation des espèces végétales. Ce chemin peut-être uniquement une bande de sable / herbe délimitée ou non par des pieux verticaux comme l'exemple de la figure suivante.



7.2.5.3 Nettoyage raisonné de la plage

Le nettoyage de la plage ne constitue pas à proprement parler une technique de gestion de l'érosion mais une mise en pratique raisonnée peut permettre d'en limiter les effets. La mer dépose naturellement toute sorte de déchets dont les macros déchets issus de l'activité humaine (verres, plastiques...) mais aussi des débris naturels (algues, débris coralliens, coquillages, bois flottés...). Cette laisse de mer contribue à l'équilibre de la plage et permet de piéger les sédiments et d'amortir les vagues.

Il est donc conseillé lors des nettoyages de seulement ramasser les déchets plastiques et les gros encombrants et d'y laisser la laisse de mer naturelle et les bio-déchets centimétriques présents. Cette technique est efficace et très peu coûteuse (faible superficie de la plage).

7.2.5.4 Utilisation raisonnée de la plage

Au-delà de la fréquentation classique de la plage, il est envisagé l'installation de prestataires de services type loueur de jet-ski. Ce type d'activité impose le transfert des jet-ski dans l'eau de manière quotidienne. Hors le passage de véhicule sur la plage est susceptible de dégrader la plage et de fait sa résistance face aux houles et tempêtes.

Nous conseillons donc vivement l'utilisation d'équipements destinés à limiter l'impact de ces activités sur la plage, comme par exemple les plaques de roulage qui sont faciles à installer.

Exemple d'équipements destinés à faciliter le roulage sur le sable tout en limitant l'impact sur la plage



Rouler sur le sable, accéder aux plages



7.3 SYNTHESE DES COUTS DES SOLUTIONS ENVISAGEES

7.3.1 TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE ET D'AMENAGEMENTS D'UN OUVRAGE SOUS-MARIN (ACTIONS 1 ET 2)

Les estimations financières ci-dessous ont été réalisées en tenant compte :

- des prix actuels pratiqués par les entreprises locales tant pour la fourniture des matériaux que de leur mise en œuvre
- de prélèvements de sable à proximité immédiate du site de Ta'ahiamanu (chenal lagonaire), limitant ainsi le transport de ces matériaux au seul refoulement par conduite des sables aspirés hydrauliquement
- **Rechargement de plage et ouvrage sous-marin en enrochements**

N° de prix	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire en XPF	Montant HT en XPF
1 Travaux préparatoires					
1	1 Etudes et plans d'exécution	Forf.	1	3 000 000	3 000 000
1	2 Installation de chantier, Amenée repli	Forf.	1	5 000 000	5 000 000
				<i>Sous-total</i>	<i>8 000 000</i>
2 Ouvrage sous-marin en enrochements					
					61
2	1 Terrassement de la butée de pied en déblai	m ³	400	2 500	1 000 000
2	2 Fourniture et mise en place du géotextile	m ²	1 230	1 500	1 845 000
2	3 Fourniture et mise en œuvre d'enrochements 20-100Kg	T	240	6 000	1 440 000
2	4 Fourniture et mise en œuvre d'enrochements 500-1000Kg	T	2 010	6 000	12 060 000
				<i>Sous-total</i>	<i>15 345 000</i>
3 Travaux de rechargement en sable					
3	1 Fourniture et refoulement hydraulique du sable en haut de plage	m ³	5 300	3 500	18 550 000
3	2 Repise et réglage des sédiments selon les profils types	m ³	5 300	2 000	10 600 000
				<i>Sous-total</i>	<i>29 150 000</i>

TOTAL H.T.	52 495 000
TVA	4 462 075
TOTAL T.T.C.	56 957 075

- **Rechargement de plage et ouvrage sous-marin en conteneurs géotextile**

N° de prix	Désignation	Unité	Quantité	Prix unitaire en XPF	Montant HT en XPF
1 Travaux préparatoires					
1	1 Etudes et plans d'exécution	Forf.	1	3 000 000	3 000 000
1	2 Installation de chantier, Amenée repli	Forf.	1	5 000 000	5 000 000
				<i>Sous-total</i>	<i>8 000 000</i>
2 Brise-lames en GEOTUBE					
					65
2	1 Fourniture de sable pour le remplissage des GEOTUBES	m ³	430	3 000	1 290 000
2	2 Fourniture et mise en place du géotextile anti-affouillement	m ²	980	3 500	3 430 000
2	3 Fourniture et mise en œuvre de GEOTUBE de Ø0,5m	ml	150	3 500	523 250
2	4 Fourniture et mise en œuvre de GEOTUBE de Ø2,5m	ml	75	12 000	897 000
				<i>Sous-total</i>	<i>4 850 250</i>
3 Travaux de rechargement en sable					
3	1 Fourniture et refoulement hydraulique du sable en haut de plage	m ³	5 300	3 000	15 900 000
3	2 Repise et réglage des sédiments selon les profils types	m ³	5 300	2 000	10 600 000
				<i>Sous-total</i>	<i>26 500 000</i>

TOTAL H.T.	39 350 250
TVA	3 344 771
TOTAL T.T.C.	42 695 021

Note 1 : Les prix présentés impliquent le dragage de sable à proximité immédiate de la plage de Ta'ahiamanu, c'est-à-dire en sortie de chenal lagonaire dans des fonds de 15 à 25 m environ.

Note 2 : Une étude préalable des épaisseurs et de la nature des sables en place sur la zone de prélèvement devra être menée préalablement afin de valider la solution des opérations de dragage et définir précisément la zone de dragage envisageable. Ces informations seront indispensables à l'élaboration du DCE travaux. Nous préconisons la réalisation de carottages sur l'emprise de la zone pressentie, afin d'une part de vérifier les hauteurs de matériaux meubles et d'autre part de collecter ces matériaux pour analyse granulométrique. Le coût estimé de cette mission de sondages géotechniques est d'environ 2 MF CFP HT.

Note 3 : compte-tenu de la nature et des coûts des travaux, il est fortement recommandé au Maître d'Ouvrage de s'adjoindre les services d'un Maître d'œuvre via un contrat de maîtrise d'œuvre afin de

l'assister dans la passation des marchés de travaux et le suivi de ceux-ci. Le montant des prestations de maîtrise d'œuvre est estimé entre 3 et 4 MF CFP HT.

7.3.2 EXPERIMENTATION DE REVEGETALISATION (ACTION 3)

Note : les prix des ouvrages ci-dessus n'intègrent pas la revégétalisation de haut de plage et d'arrière plage. Dans un premier temps nous préconisons la réalisation d'une expérimentation de manière à vérifier l'adaptation des espèces possibles sur le site.

L'estimation du coût de cette expérimentation doit être complétée avec l'appui de partenaires tels que le SDR ou des associations locales susceptibles d'apporter leur concours.

7.4 PLANNING

Un planning prévisionnel peut être proposé. Ce planning est fortement dépendant :

- De l'acceptabilité de prélèvements des sables dans le lagon
- De la phase d'instruction de l'étude d'impact environnemental qui sera potentiellement nécessaire. Les prélèvements de sable destinés au rechargement seront vraisemblablement assimilés à une extraction, une étude d'impact sur l'environnement sera donc requise.

	Tâches	mois 1	mois 2	mois 3	mois 4	mois 5	mois 6	mois 7	mois 8	mois 9	mois 10
1	Etudes complémentaires sur site de dragage pressentie										
2	Choix du site d'emprunt										
3	EIE - Autorisations administratives										
4	Conception niveau PRO - DCE										
5	Appel d'offre travaux et choix de l'entreprise										
6	Réalisation des travaux (<i>hors saison des houles de nord soit entre mai et novembre</i>)										

8. BIBLIOGRAPHIE

Aubanel, A. et al. (1999). 'Modifications of the shore line in the Society islands (French Polynesia)'. *Ocean & coastal management*, 42(5), p.419–438. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096456919900023X>.

Benet, A. (2010). 'Evolution des zones côtières en milieu insulaire et impact du changement climatique global : perspectives 2100'. Université de la Polynésie Française.

Blott, SJ & Pye, K. (2001) 'A grain size distribution statistics package for the analysis of unconsolidated sediments'. *Earth Surface, Processes and Landforms*. Volume 26, Issue 11. Pages 1237-1248.

Cordier, E. (2007). 'Dynamique hydrosédimentaire du récif frangeant de l'Hermitage / la Saline (La Réunion) : processus physiques et flux sédimentaires'. *Thèse de Doctorat*. Université de La Réunion.

De La Torre, Y (2014). 'Inventaire et analyse des solutions douces de gestion de l'érosion côtière et applicabilité au littoral Corse'. *Rapport BRGM/RP-63034-FR*.

Garcin M. (2013). Projet ARAI 3 : 'Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens- incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux'. *Rapport BRGM/RP-61656-FR*, 65 p., 45 fig., tab.

IRCP/EPHE. (2016) : 'Evolution du littoral de la baie de 'Opunohu de Moorea de 1955 à nos jours'.

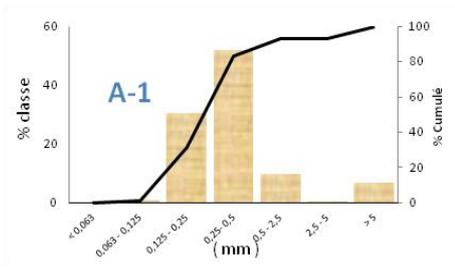
Lenhardt, X. (1991). 'Hydrodynamique des lagons d'atoll et d'île haute en Polynésie française'. Paris : ORSTOM, 132p. (Etudes et Thèses). ISBN 2-7099-1042-X.

POLTI, S. (2001). 'Caractérisation de la ligne de rivage et du domaine maritime de l'île de Moorea', Polynésie française, Moorea (Polynésie française), *rapport antenne EPHE/Museum,CRIOBE*, 2001 RA 97, 26 p.

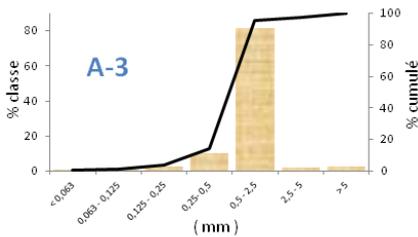
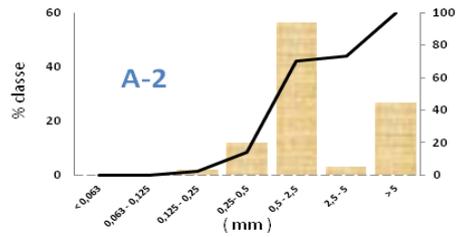
Vieux, C. et al. (2008). 'Les modifications de la ligne de rivage dans les îles de la Société (Polynésie française): un indicateur des pressions anthropiques en zone côtière'. *Le Journal de la Société des Océanistes*, (126-127), p.59–66.

9. ANNEXES

9.1 RESULTATS DE LA GRANULOMETRIE

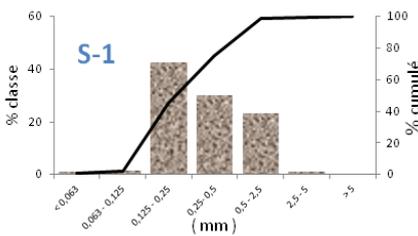


Paramètres	(mm)
Médiane	0.2
1 ^{er} quartile d25	0.15
3 ^e quartile d75	0.33
Hétérométrie	
$h = \frac{d75-d25}{2}$	



(mm)
0.90
0.40
3.80
1.7

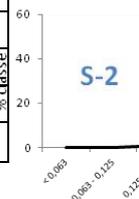
(mm)
0.50
0.40
1
0.3



(mm)
0.21
0.15
0.35
0.1

S-1 Sables fins à moyens bien classés

(mm)
1.50
0.45
3.72
1.7

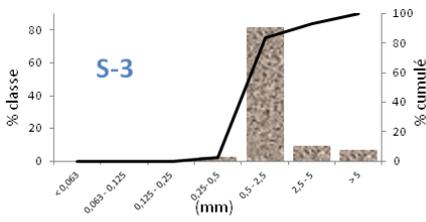


S-2 Sables grossiers, présence de débris coralliens, mal classés

(mm)
0.52

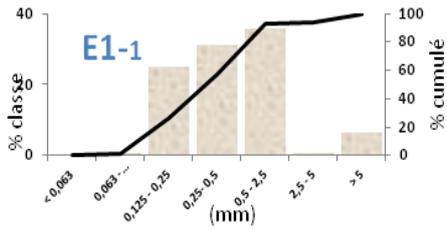
S-3 Sables grossiers moyennement classés

0.43
1.1
0.33



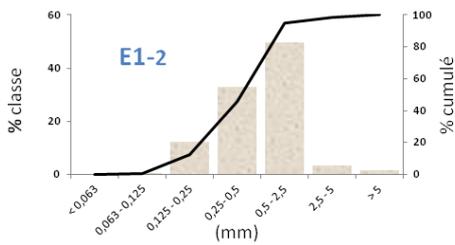
(mm)
0.30
0.19
0.5
0.15

E1-1 Sables moy



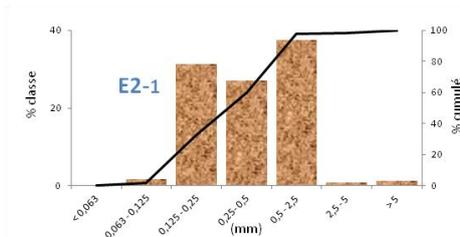
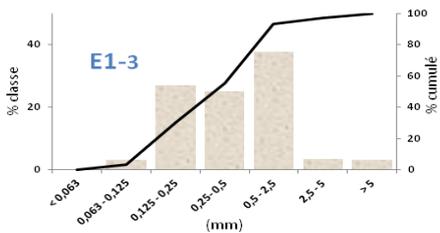
(mm)
0.38
0.21
0.70
2.5

E1-2 Sables moy
mal classés



(mm)
0.30
0.15
0.50
0.18

E1-3 Sables moy
moyen et grossier.

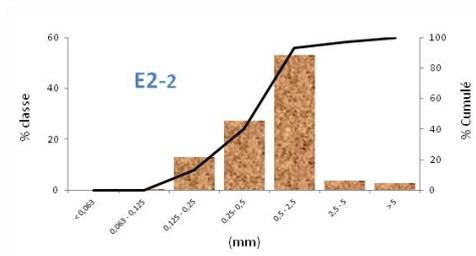


(mm)
0.28
0.14
0.47
0.16

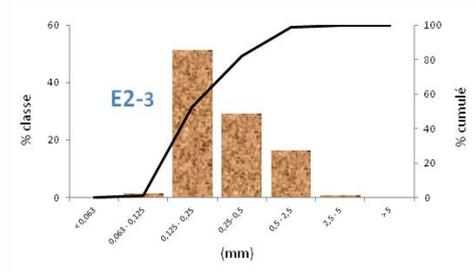
E2-1 Sables moy
également des fins

(mm)
0.28

E2-2 Sables moy



0.20
0.53
0.16



9.2 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE

Construction du modèle numérique

Logiciels utilisés :

◆ Courantologie

Les simulations ont été effectuées à l'aide du module HD FM (module hydrodynamique avec maillage en éléments finis) du logiciel MIKE-3D, mis au point par DHI (Danish Hydraulic Institute). Ce code résout, par une méthode éléments finis sur des maillages triangulaires, les équations tridimensionnelles de l'hydraulique (avec l'hypothèse de pression hydrostatique et surface évolutive au cours du temps) et de transport-diffusion de grandeurs intrinsèques pour les écoulements tridimensionnels à surface libre de type fluvial ou maritime.

Les résultats principaux sont en chaque point de maillage du domaine, et à différentes profondeurs, les composantes verticales et horizontales de la vitesse et la concentration des grandeurs transportées. Sur le maillage en surface, un autre résultat principal est la hauteur d'eau.

Le code de calcul est capable de prendre en compte de nombreux phénomènes. Pour la présente étude, les phénomènes suivants seront pris en compte :

- Frottement sur le fond,
- Influence de la force de Coriolis,
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- Sources et puits de fluide et de quantité de mouvement à l'intérieur du domaine,
- Modèles de turbulence simples ou complexes (e.g. K-Epsilon) avec prise en compte des effets liés à la force d'Archimède (flottabilité),
- Prises en compte des bancs découvrant.

◆ Propagation de la houle et courants de dérive littorale

Au large la propagation de la houle ne participe pas au déplacement des masses d'eau. En revanche, près des côtes et tout particulièrement dans les zones de déferlement, les contraintes de radiation induites par la houle génèrent des courants. Quand la houle arrive de manière oblique par rapport au rivage, ou dans les zones de récifs et de lagons, ceci génère de forts courants de dérive littorale.

Pour prendre pleinement en compte de ce phénomène, le module de propagation de houle (MIKE SW) a été utilisé, conjointement au module hydrodynamique. Les courants induits par la houle sont pleinement intégrés aux autres courants du module hydrodynamique qui ont servis à simuler la dilution du panache.

MIKE SW est un modèle numérique de troisième génération qui permet le calcul des paramètres caractéristiques de la houle sur les domaines côtiers, les lacs et les estuaires à partir de conditions de houles fournies aux limites du domaine modélisé (conditions aux limites) et /ou de conditions de vent. Il s'agit d'un modèle spectral : la houle est décrite à travers la répartition de l'énergie en fréquences et en directions.

MIKE SW prend en compte la majeure partie des phénomènes influant sur la génération et la propagation d'une houle sur un domaine côtier :

- Phénomènes de réfraction liés à l'évolution des fonds et/ou à l'interaction avec le courant,
- Génération des vagues par le vent,
- Dissipation de l'énergie par frottement sur le fond et par déferlement,
- Interaction de houles,
- Shoaling (levage de la houle).
 - Domaine de calcul

Le domaine de calcul a été défini centré sur la baie d'Opunohu et présente une extension d'Est en Ouest de l'ordre de 25 km le long du littoral de Moorea et de 3-4 km vers le large, au-delà de la barrière récifale.

Maillage

Le maillage en éléments finis autorise une grande souplesse dans la représentation de zones complexes et dans la distorsion entre mailles, ce qui permet de raffiner localement les mailles aussi précisément que voulu.

Dans les zones d'intérêt (plage de Ta'ahiamanu, passes), les éléments ont une taille de quelques mètres. A l'extérieur des zones d'intérêt, le maillage est plus grossier, avec des mailles de quelques centaines de mètres, voir un kilomètre en limite du modèle.

Bathymétrie

La précision des courants calculés par le modèle dépend notamment d'une bonne représentation des profondeurs et des pentes des fonds, notamment dans les zones complexes. Ainsi, toutes les données bathymétriques disponibles ont été compilées pour l'élaboration du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Il s'agit en particulier des données acquises dans le cadre de cette étude, de l'ensemble des levés bathymétriques à disposition de CREOCEAN et des données du SHOM.

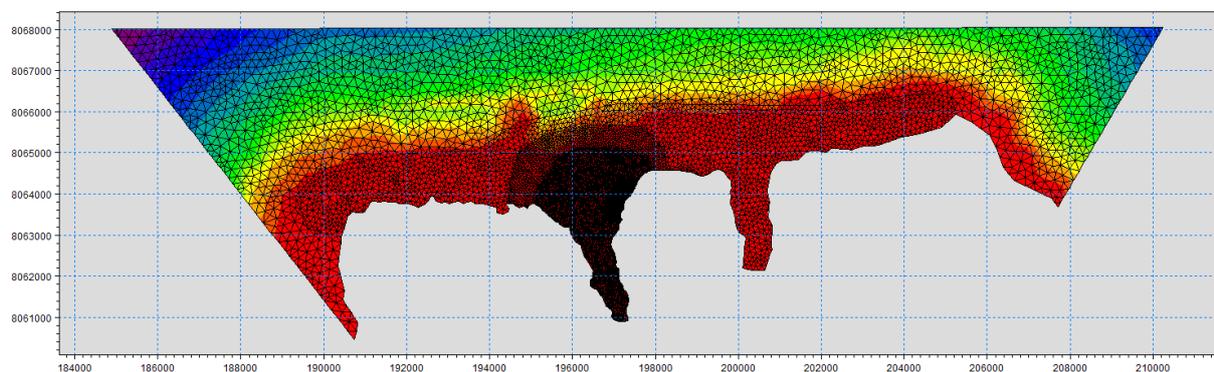


Figure 39 : Maillage et bathymétrie du modèle

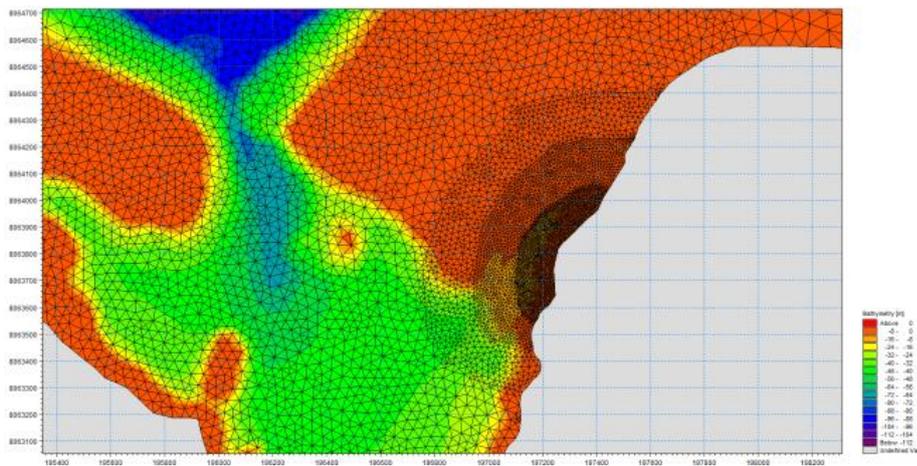


Figure 40 : Maillage et bathymétrie du modèle - Zoom

Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont calibrées de façon à obtenir des résultats de courantologie réalistes au niveau de la zone d'étude. Il s'agit de conditions :

- De niveaux d'eau constants,
- De houle au large,
- De vent soufflant sur la zone.

Les conditions de houle à appliquer aux frontières marines du modèle sont définies par les paramètres hauteurs significatives, période et direction de pic et le vent est appliqué de façon uniforme dans le temps et l'espace.

9.3 ANNEXE 5 : TRAITS DE COTE DE TA'AHIAMANU DE 1955 A 2014

