Analyse préliminaire du rapport bénéfice-coût des solutions d'adaptation à l'aléa houle cyclonique dans l'archipel des Tuamotu, Polynésie française

CPS, Division géosciences et technologies appliquées

Septembre 2013

Anna Rios Wilks

RAPPORT TECHNIQUE (PR171)

Section économie des ressources naturelles,
Département îles et océan

© Copyright Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (CPS), 2013

Tous droits réservés de reproduction ou de traduction à des fins commerciales/lucratives, sous quelque forme que ce soit. Le Secrétariat général de la Communauté du Pacifique autorise la reproduction ou la traduction partielles de ce document à des fins scientifiques ou éducatives ou pour les besoins de la recherche, à condition qu'il soit fait mention de la CPS et de la source. L'autorisation de la reproduction et/ou de la traduction intégrale ou partielle de ce document, sous quelque forme que ce soit, à des fins commerciales/lucratives ou à titre gratuit, doit être sollicitée au préalable par écrit. Il est interdit de modifier ou de publier séparément des graphismes originaux de la CPS sans autorisation préalable.

Texte original : anglais

Secrétariat général de la Communauté du Pacifique, catalogage avant publication

Rios Wilks, Anna

Analyse préliminaire du rapport bénéfice-coût des solutions envisagées dans le cadre du projet Réduction de risque de houle cyclonique dans l'archipel des Tuamotu, Polynésie française / Anna Rios Wilks

1. Houle cyclonique — Polynésie française.
2. Réduction de risque — Polynésie française.
3. Catastrophes naturelles — Polynésie française.

I. Rios Wilks, Anna

II. Title III. Secrétariat général de la Communauté du Pacifique

551.463 AACR2

ISBN: 978-982-000643-0

Secrétariat général de la Communauté du Pacifique
Division géosciences et technologies appliquées
Private Mail Bag
GPO, Suva
Fidji
Téléphone : +679 338 1377
Télécopieur : +679 337 0040
www.sopac.org
director@sopac.org

CPS, Division géosciences et technologies appliquées

Analyse préliminaire du rapport bénéfice-coût des solutions d'adaptation à l'aléa houle cyclonique dans l'archipel des Tuamotu, Polynésie française

RAPPORT TECHNIQUE (PR171)

Anna Rios Wilks

Septembre 2013

Section économie des ressources naturelles,
Département îles et océan

AVERTISSEMENT

Bien que les données contenues dans le présent rapport aient été recueillies, analysées et rassemblées avec le plus grand soin, la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique (CPS) ne saurait être tenue responsable en cas de perte ou de préjudice découlant de leur utilisation.

AVIS IMPORTANT

Ce document a été produit avec le concours financier de l'Union européenne, dans le cadre du Projet Soutien à la réduction des risques de catastrophes dans les Pays et Territoires d'outre-mer du Pacifique, financé au titre de l'enveloppe C du neuvième Fonds européen de développement.

Le contenu du présent document n'engage que la responsabilité du Secrétariat général de la Communauté du Pacifique et ne peut en aucun cas être interprété comme une prise de position de l'Union européenne.

Ces travaux ont été réalisés par la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) en collaboration avec le Service de l'urbanisme de la Polynésie française.

Remerciements

Pour leur expertise et leur soutien précieux durant la mission en Polynésie française :

- Émilie Nowak du Service de l'urbanisme pour son assistance logistique et son appui à la collecte de données en Polynésie française, ainsi que pour son dévouement tout au long du projet.
- Bruno Peaucellier du Service des relations internationales et Charles Garnier du Bureau des affaires européennes pour leur aide de manière générale.
- Henry Cinquin de la Direction des affaires foncières pour ses informations sur la valeur foncière à Rangiroa.
- Colonel Maxence Jouannet de la Direction de la défense et de la protection civile (DDPC) pour les renseignements relatifs aux cyclones en Polynésie française.
- Stéphan Challier, Charly Bodet et Patricia Anneville de l'Institut statistique de la Polynésie française (ISPF) pour les données de recensement.
- Raymond Siao de la Direction de l'équipement pour les informations sur les aménagements en place dans l'archipel des Tuamotu.
- Jean Suenko, James Nordhoff, Rudolphe Reia et Dougall Deane du Fonds de développement des archipels pour leurs contributions techniques concernant l'utilisation et la construction de *fare* MTR.
- Jérôme Lecerf de l'Institut de l'agriculture pour ses renseignements sur le secteur primaire à Rangiroa.
- Jean-Michel Corteel pour ses informations sur les prix et les spécificités du marché immobilier à Rangiroa.
- Éric Sacher, Chef de la subdivision administrative des Tuamotu-Gambier, Haut-Commissariat de la République française, pour ses précisions quant aux projets d'abris paracycloniques dans l'archipel des Tuamotu.
- Alain Timiona, Secrétaire général du motu d'Avatoru à Rangiroa, pour ses éclaircissements concernant la mise en œuvre de mesures de réduction des risques associés aux cyclones à Rangiroa.
- Boris Peytermann du Port autonome pour ses informations sur la digue de Tahiti.
- Nicolas Bernon du Service de l'urbanisme pour ses observations, ses suggestions et son soutien.

Mes collègues de la Division SOPAC et de la CPS pour leur aide précieuse :

- Paula Holland, Responsable de l'équipe économie des ressources naturelles, pour ses informations techniques et sa relecture critique.
- Frédérique Lehoux, Coordonnatrice du projet, pour son soutien logistique, son assistance dans les échanges avec les interlocuteurs en Polynésie française et sa contribution à la réussite du projet.
- Brian Dawson pour sa relecture critique de la présente analyse.
- Anja Grujovic pour la collecte et la synthèse d'informations contextuelles sur la Polynésie française.
- Hervé Damlamian, Modélisateur (phénomènes côtiers), pour son avis technique sur les inondations probables en cas de houle cyclonique.
- Jens Kruger et Aseri Baleilevuka pour leurs cartes spécialisées de Rangiroa.
- John Tagiilima, Ingénieur SOPAC, pour ses conseils avisés sur la pérennité des ouvrages.

ACRONYMES

ASCE	American Society of Civil Engineers
CSIRO	Centre pour la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth
DAF	Direction des affaires foncières
DDPC	Direction de la défense et de la protection civile
Fare MTR	Maisons préfabriquées (maisons en kit)
FED	Fonds européen de développement
UE	Union européenne
FDA	Fonds de développement des archipels
CFP	Franc Pacifique
PIB	Produit intérieur brut
IEOM	Institut d'émission d'Outre
NIWA	Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère de Nouvelle-Zélande
PTOM	Pays et Territoires d'Outre-mer
SOPAC	Division géosciences et technologies appliquées de la CPS
CPS	Secrétariat général de la Communauté du Pacifique
UNOCHA	Bureau de la coordination des affaires humanitaires des Nations Unies
XPF	Franc Pacifique

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ 6
Types de coûts et de bénéfices (avantages) pris en compte dans la présente analyse 6
Synthèse de l'analyse 6
Synthèse des résultats 7
Effet global probable sur la société 8
Solution la plus efficace 9
Principales conclusions générales 9
Recommandations 9

1 INTRODUCTION 11
Projet de réduction des risques de catastrophe 11
Objet de la présente analyse 11
Organisation du rapport 11

2 CONTEXTE 13
Polynésie française 13
Présentation succincte du contexte économique 13
Conditions climatiques 14
Scénarios futurs relatifs au changement climatique 14
Questions relatives aux risques de catastrophe 14
Recensement des dégâts causés par le cyclone Oli (2010) 15
Archipel des Tuamotu 15
État des lieux des mesures de réduction des risques 17
Zone de retrait 17
Murets de protection 18
Abris anticycloniques 19
Autres solutions envisageables en vue de la réduction des risques 19
Digues (levées de protection) 19
Maisons en kit (*fare* MTR) 20
Surélévation des bâtiments 21

3 MÉTHODE 22
Analyse bénéfice-coût 22
Scénarios d'adaptation examinés 22
Digue 23
Maisons en kit (*fare* MTR) 23
Surélévation des bâtiments 23
Zone de retrait 23
Hypothèses retenues pour l'analyse bénéfice-coût 23
Risque annuel de houle cyclonique 23
Période prise en compte 24
Valeur et prix 24
Données relatives à la zone d'étude 24
Données relatives aux habitations existantes à Rangiroa 24

4 ANALYSE DES COÛTS 26

5 ANALYSE DES BÉNÉFICES 27
Modélisation de la houle cyclonique à Rangiroa 27
Carte de la profondeur d'inondation 27
Carte de la vitesse d'inondation 27
Carte des catégories de risques 28
Carte de la densité de l'habitat 29
Dégâts et pertes escomptés 29
Description des bénéfices tirés des mesures d'adaptation et quantifiés dans la présente analyse 29
Dégâts causés aux bâtiments 29
Description des bénéfices non quantifiés 30
Dégâts causés aux biens ménagers 30
Préjudice pour les entreprises 31
Tourisme 31
Perliculture 31
Production de coprah 32
Perturbation des services 32
Autres dégâts 32
Analyse quantitative des bénéfices 32
Évaluation des dommages au regard de la situation actuelle (analyse « aucune action ») 32
Bénéfices probables générés par chaque solution de réduction des risques (analyse « avec action ») 33
Digue (levée de protection) 33
Maisons en kit (*fare* MTR) 33
Surélévation des bâtiments 33
Zone de retrait 34
Résultats relatifs aux bénéfices 34

6 ANALYSE BÉNÉFICE-COÛT GLOBALE 35
Valeur actualisée nette 35
Rapport bénéfice-coût 35
Analyse de sensibilité 37
Prise en compte de la réduction des dégâts causés aux biens ménagers 37
Taux d'actualisation 37
Frais de transport 39
Taux de change 39

7 FAISABILITÉ ET INCIDENCES 40
Zone de retrait 40
Digue (levée de protection) 40
Surélévation des bâtiments 40
Maisons en kit (*fare* MTR) 40
Recommandations 41

8 BIBLIOGRAPHIE 42

Liste des figures

Figure 1 Carte de la zone d'étude. Source : SOPAC, CPS (2013)..... 12
Figure 2 La Polynésie française..... 13
Figure 3 Archipel des Tuamotu..... 16
Figure 4 Rangiroa..... 16
Figure 5 Carte détaillée représentant les limites de la zone de retrait pour une petite partie d'Avatoru..... 17
Figure 6 Un muret de protection côté lagon à Avatoru, muret qui n'empêche pas l'érosion de la plage..... 18
Figure 7 Une maison en kit faiblement surélevée à Rangiroa. Photographie : Anna Rios Wilks (décembre 2012)..... 20
Figure 8 Valeur totale actualisée des coûts au terme de la période de 50 ans (en millions de XPF)..... 26
Figure 9 Profondeur d'inondation (en mètres) en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m. Division SOPAC de la CPS, 2013..... 27
Figure 10 Vitesse de la vague (en mètre/seconde) en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m. Division SOPAC de la CPS, 2013..... 28
Figure 11 Carte des catégories de risque..... 28
Figure 12 Carte de la densité de l'habitat. Division SOPAC de la CPS, 2013..... 29
Figure 13 Valeur actualisée totale des bénéfices attendus au terme de la période de 50 ans (en millions de XPF)..... 34
Figure 14 Rapport bénéfice-coût pour chaque scénario au terme de la période d'étude de 50 ans..... 36

La liste des tableaux

Tableau 1 Synthèse des coûts pour chaque solution d'adaptation..... 6
Tableau 2 Synthèse des bénéfices pour chaque solution d'adaptation..... 7
Tableau 3 Synthèse de l'analyse des scénarios d'adaptation..... 8
Tableau 4 Impact global escompté des solutions sur la société..... 9
Tableau 5 Nombre de catastrophes naturelles et nombre total de victimes, 1980-2012..... 14
Tableau 6 Informations détaillées sur les cyclones tropicaux recensés en Polynésie française sur la période 1980-2012..... 15
Tableau 7 Coût des biens..... 24
Tableau 8 Superficies des terres et des surfaces construites utilisées dans l'analyse..... 24
Tableau 9 Catégorisation des risques associés à la houle cyclonique en Polynésie française..... 28
Tableau 10 Dégâts que subiraient probablement les bâtiments selon chaque catégorie de risques en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m..... 30
Tableau 11 Valeurs actualisées nettes cumulatives pour chaque scénario à différents moments dans le temps (en millions de XPF)..... 35
Tableau 12 Rapport bénéfice-coût pour chaque scénario au terme de la période d'étude de 50 ans..... 36
Tableau 13 Rapports bénéfice-coût et classement des scénarios d'adaptation selon leur taux d'actualisation..... 38
Tableau 14 Rapports bénéfice-coût en cas de hausse de 10 % des coûts de mise en œuvre..... 39

RÉSUMÉ

En vue d'aider les Pays et Territoires d'Outre-mer (PTOM) du Pacifique à renforcer leur résilience face aux aléas naturels, l'Union européenne (UE) a chargé la Division SOPAC de la CPS d'œuvrer à l'amélioration de la protection et de la gestion de l'environnement côtier, en coopération avec les PTOM. Financé au titre de l'enveloppe C du neuvième Fonds européen de développement (FED), le projet sera axé sur l'analyse, l'élaboration et la mise en œuvre efficace de solutions en matière de gestion des risques de catastrophes à Wallis et Futuna, en Nouvelle-Calédonie, à Pitcairn et en Polynésie française.

Le présent document s'inscrit dans le cadre des travaux entrepris en faveur de la Polynésie française. Il vise plus précisément à fournir une analyse préliminaire du rapport bénéfice-coût des différentes méthodes d'adaptation que peut appliquer le gouvernement de la Polynésie française pour lutter contre les inondations côtières à Rangiroa, dans l'archipel des Tuamotu.

Le gouvernement de la Polynésie française est désireux de réduire le risque induit par une marée de tempête caractérisée par une hauteur de houle significative de 12 m.

Treize solutions d'adaptation sont étudiées dans le présent document : ce sont les mesures que les autorités de la Polynésie française pourraient envisager de prendre afin de réduire les effets négatifs d'une houle cyclonique d'une telle ampleur. Les solutions en question peuvent être réparties en quatre catégories : construction d'une digue (levée de protection), instauration d'une zone de retrait, surélévation des bâtiments 1 m au-dessus du sol, et remplacement des habitations par des maisons en kit MTR dont le plancher se situe 1,5 m au-dessus du sol. Il ne s'agit en aucun cas des seules options à la disposition du gouvernement. Les différentes méthodes sont examinées dans quinze scénarios illustratifs, l'objectif étant de donner une indication du type de solution le plus adapté et le plus rentable au vu de la situation aux Tuamotu, ainsi que de fournir aux autorités des informations sur lesquelles se fonder lors de l'examen des incidences et des caractéristiques techniques, de manière à éclairer les échanges ultérieurs.

Types de coûts et de bénéfices (avantages) pris en compte dans la présente analyse

La présente analyse quantifie uniquement le coût matériel de chaque solution et la réduction correspondante des dégâts causés aux bâtiments (bénéfices). Les tableaux ci-après récapitulent l'ensemble des composantes qui pourraient être retenues dans une étude bénéfice-coût. Les éléments surlignés en vert ne sont pas pris en considération dans notre analyse.

Tableau 1 : Synthèse des coûts pour chaque solution d'adaptation.

	Zone de retrait	Digue (levée de protection)	Surélévation	Maisons en kit MTR
Coût matériel	Coûts associés au relogement (achat de nouveaux terrains et construction de maisons)	Coûts de construction	Coûts de construction	Coûts de construction (achat de *fare* MTR)
Coût social	Attachement culturel à des lieux situés à l'intérieur de la zone de retrait. Accroissement de la surpopulation à d'autres endroits.	Altération de la beauté naturelle		
Coût environnemental		Biodiversité marine		
Coût en termes de prestation de services	Raccordement électrique et sanitaire des			Raccordement électrique et sanitaire des nouveaux logements
Coût économique		Répercussions sur le tourisme et la pêche de la modification du littoral		

Synthèse de l'analyse

Les résultats complets de l'analyse sont donnés dans le Tableau 3. Un taux d'actualisation de 10 % est appliqué dans l'ensemble de l'étude.

Les différentes méthodes sont présentées dans quinze scénarios illustratifs. Les bénéfices d'un scénario sont plus importants que ses coûts lorsque le rapport bénéfice-coût est supérieur à un.

Les scénarios sont classés par ordre d'efficacité (ou de « rentabilité »), la solution numérotée « 1 » étant la plus efficace.

Le coût total de mise en œuvre a été obtenu à l'aide de la méthode du moindre coût et tient compte de l'ensemble des fonds requis (en millions de XPF) sur la période d'étude de 50 ans[1]. Dans le classement économique des solutions, l'option numérotée « 1 » est celle la moins coûteuse.

Il convient de noter qu'il est toujours moins onéreux de procéder à la surélévation des bâtiments et à la construction de *fare* MTR uniquement dans la zone de retrait, et non dans l'ensemble de la zone d'étude, tout simplement en raison de l'échelle de l'intervention. Dans la colonne suivante sont précisées les parties susceptibles de financer les solutions d'adaptation compte tenu des normes sociales en vigueur.

Tableau 2 : Synthèse des bénéfices pour chaque solution d'adaptation.

	Zone de retrait	Digue (levée de protection)	Surélévation	Maisons en kit MTR
Dégâts aux bâtiments	Légère réduction de la vitesse et de la profondeur d'inondation	Diminution de la vitesse d'inondation	Réduction de la profondeur d'inondation	Réduction de la profondeur d'inondation
Biens ménagers	Légère diminution éventuelle des dégâts		Réduction notable des dégâts	Réduction notable des dégâts
Victimes (décès/ blessures)	Aucun changement escompté étant donné que des abris destinés à accueillir l'ensemble des habitants en cas d'urgence sont déjà prévus.			
Prestation de services			Inondation réduite des équipements	Inondation réduite des équipements
Activité économique			Inondation réduite des stocks et des équipements	Inondation réduite des stocks et des équipements

Synthèse des résultats

D'après la présente analyse préliminaire, les catégories qui semblent pouvoir contribuer de manière notable à la réduction des dégâts sont la surélévation des bâtiments et le recours à des *fare* MTR, deux solutions qui entraîneraient le rehaussement des planchers. Il s'agit d'un résultat encourageant, car si ces deux options sont mises en œuvre de façon progressive, il est probable qu'elles aient un effet positif global sur la société, dès lors que l'intégralité de leurs avantages sur le plan quantitatif sont pris en compte. En outre, l'instauration progressive de ces solutions engendrera nettement moins de problèmes sur le plan sociétal que l'établissement d'une digue ou d'une zone de retrait, ce qui fait que la population devrait beaucoup mieux les accepter.

La mise en place d'une digue ne devrait conduire qu'à une faible diminution de la profondeur d'inondation et, au regard de son coût élevé, cette solution constitue une méthode relativement inefficace en termes de réduction des dégâts. De plus, la digue pourrait avoir des répercussions sur l'environnement ainsi que sur l'activité touristique, car elle altérerait les qualités esthétiques du littoral.

Une zone de retrait ne permettrait d'atténuer que de manière limitée les dégâts occasionnés aux bâtiments par une marée de tempête. En effet, d'après le modèle du risque de houle cyclonique, la majorité de la zone d'étude est susceptible d'être frappée par des inondations très importantes et rapides, quelle que soit la distance avec la côte. D'autres coûts non quantifiés sont en outre associés à une zone de retrait, notamment l'attachement culturel aux terres que les habitants seraient forcés d'abandonner et des difficultés d'ordre social liées aux nouveaux terrains à trouver pour les personnes déplacées.

Ce sont les *fare* MTR qui procurent le plus d'avantages, mais il serait contreproductif d'opter pour une mise en œuvre immédiate de cette solution, car les constructions existantes seraient alors laissées vacantes. Si l'édification des logements MTR est progressive, les habitants ne remplaceront leur maison que lorsque celle-ci ne peut plus être utilisée, ce qui permet d'obtenir le meilleur rapport bénéfice-coût.

La surélévation des bâtiments permet elle aussi de réduire de manière notable les dégâts, bien que, pour des raisons techniques, le rehaussement immédiat des habitations existantes soit relativement coûteux. La surélévation progressive des constructions apparaît comme une solution nettement plus satisfaisante, qui permet de dégager un rapport bénéfice-coût presque aussi intéressant que pour la formule « édification progressive de *fare* MTR ».

[1] Un taux d'actualisation de 10% est appliqué pour agréger les coûts sur la période.

Tableau 3 : Synthèse de l'analyse des scénarios d'adaptation.

Scénario d'adaptation		Rapport bénéfice-coût	Classement en termes d'efficacité	Coût total de mise en œuvre (en millions de XPF)	Classement en termes d'accessibilité économique	Quels financements ?
Digue (levée de protection)	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 25 %	0,0021	15	6,787	11	Gouvernement
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 50 %	0,0061	14			
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 75 %	0,0149	13			
Édification immédiate de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,2129	10	21,040	13	On peut s'attendre à un financement public en cas de mise en œuvre immédiate des solutions. Une mise en œuvre progressive pourrait être financée par des particuliers bénéficiant de subventions ou de prêts publics.
	Zone de retrait uniquement	0,2134	9	603	6	
Édification progressive de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,9867	2	4,528	9	
	Zone de retrait uniquement	0,9874	1	130	1	
Surélévation immédiate 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,2876	5	14,691	12	
	Zone de retrait uniquement	0,2874	6	421	3	
Surélévation progressive 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone	0,9391	4	4,740	10	
	Zone de retrait uniquement	0,9396	3	136	2	
Instauration immédiate de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,0469	12	2,505	7	
	Relogement dans des *fare* MTR	0,0512	11	2,526	8	
Instauration progressive de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,2326	8	546	4	
	Relogement dans des *fare* MTR	0,2334	7	549	5	

Effet global probable sur la société

Outre ceux étudiés, d'autres coûts et bénéfices doivent être pris en compte. La deuxième colonne du Tableau 4 fait état du rendement attendu de chaque solution d'adaptation lorsque sont uniquement analysés les coûts de construction et les avantages liés à la réduction des dégâts occasionnés aux bâtiments. La colonne en question résume les conclusions relatives aux aspects quantitatifs dressées dans le présent rapport. Les deux colonnes suivantes décrivent les autres coûts et bénéfices susceptibles d'être engendrés par la mise en place des solutions d'adaptation. La dernière colonne présente l'effet global probable sur la société lorsque l'ensemble des coûts et des bénéfices correspondants sont pris en considération.

Tableau 4 : Impact global escompté des solutions sur la société.

Scénario d'adaptation	Rendement attendu	Autres coûts	Autres bénéfices	Effet global probable sur la société
Digue (levée de protection)	Pour 100 XPF dépensés, un seul franc est récupéré.	Répercussions sur l'environnement ? Sur le tourisme ?		Négatif
Édification immédiate de *fare* MTR	Pour 100 XPF dépensés, 21 francs seulement sont récupérés.	Abandon des bâtiments actuellement utilisés.	Réduction des dégâts causés aux biens ménagers et aux stocks ou aux équipements des entreprises. Devrait permettre un retour plus rapide à la normale après le cyclone. Bénéfices supplémentaires potentiels liés à la réduction des dommages occasionnés par le vent. En effet, les constructions MTR sont « anticycloniques » et résistent à des vents allant jusqu'à 204 km/h.	Négatif
Édification progressive de *fare* MTR	Pour 100 XPF dépensés, 99 francs sont récupérés.			Positif
Surélévation immédiate 1 m au-dessus du sol	Pour 100 XPF dépensés, 29 francs seulement sont récupérés.		Réduction des dégâts causés aux biens ménagers et aux stocks ou aux équipements des entreprises. Devrait permettre un retour plus rapide à la normale après le cyclone.	Négatif
Surélévation progressive 1 m au-dessus du sol	Pour 100 XPF dépensés, 94 francs sont récupérés.			Positif
Instauration immédiate de la zone de retrait	Pour 100 XPF dépensés, 5 francs seulement sont récupérés.	Attachement culturel aux terres abandonnées. Coûts sociaux du relogement. Abandon des bâtiments actuellement utilisés dans la zone de retrait.	Éventuelle réduction supplémentaire des dégâts en raison du nombre moins important de bâtiments dans la zone où la vague se brise et est la plus puissante.	Négatif
Instauration progressive de la zone de retrait	Pour 100 XPF dépensés, 23 francs seulement sont récupérés. Coûts sociaux du relogement.	Attachement culturel aux terres abandonnées.		Négatif

Solution la plus efficace

La solution la plus efficace consiste à remplacer progressivement les habitations par des constructions MTR. Toutefois, lorsque l'on ne considère que les avantages minimums, à savoir la réduction des dégâts causés aux bâtiments, le rapport bénéfice-coût de chaque solution d'adaptation demeure légèrement inférieur à 1, ce qui signifie qu'aucune option ne permet de réaliser suffisamment d'économies pour couvrir les coûts afférents.

Il convient également de noter que les solutions « surélévation » et « *fare* MTR » engendrent des avantages qui n'ont pas été quantifiés dans notre analyse, notamment la réduction des dégâts causés aux biens ménagers et des préjudices subis par les différentes entreprises dont les stocks ou les équipements auraient autrement pu être submergés. Par ailleurs, les deux solutions en question doivent aussi permettre de réduire les dommages occasionnés par d'autres phénomènes plus fréquents et de moindre envergure.

Par conséquent, une fois ces autres éléments pris en compte, l'analyse montrerait probablement que ce sont les solutions de surélévation des bâtiments qui auraient un effet positif global sur la société.

Principales conclusions générales

- D'après la présente analyse préliminaire, les seules catégories semblant pouvoir contribuer de manière notable à la réduction des dégâts sont la surélévation des bâtiments et l'utilisation de *fare* MTR, deux solutions qui entraîneraient le rehaussement des planchers. Ce résultat confirme le bien-fondé du projet de construction d'abris paracycloniques actuellement conduit par le gouvernement de la Polynésie française.
- Les solutions de rehaussement des planchers (*fare* MTR et surélévation) permettent d'obtenir un rapport bénéfice-coût relativement intéressant dès lors qu'elles sont mises en œuvre de manière progressive, de manière à limiter l'abandon, et donc la perte, de bâtiments existants à Rangiroa.
- Lorsque l'on ne tient compte que des dommages causés aux constructions (avantages minimums), aucun des scénarios d'adaptation analysés n'est rentable à 50 ans. Toutefois, il est probable que l'édification progressive de *fare* MTR et la surélévation progressive des bâtiments aient un effet global positif si les autres bénéfices connexes (comme la diminution des dégâts occasionnés aux biens ménagers et commerciaux ainsi que la moindre perturbation du fonctionnement des entreprises) sont quantifiés et pris en considération.
- L'analyse montre que l'utilisation de *fare* MTR et la surélévation des bâtiments auraient de nombreux avantages et que, si ces solutions étaient appliquées au fur et à mesure sur plusieurs années, leur coût serait relativement faible. On peut ainsi affirmer que des solutions d'adaptation sont envisageables à Rangiroa, et que les autorités peuvent s'en inspirer dans leurs futures actions de protection de la population.

Recommandations

- Il est suggéré au gouvernement d'axer ses prochaines études sur les solutions impliquant le rehaussement du plancher des bâtiments d'au moins 1 m. D'après les résultats obtenus, si des normes de construction devaient être adoptées, il conviendrait de favoriser le recours à des constructions MTR surélevées et à des bâtiments en béton rehaussés d'au moins 1 m.
- Quelle que soit la solution d'adaptation examinée, il faut étudier les incidences sur la population et sa capacité financière. Un partage des coûts sera peut-être nécessaire, le gouvernement accordant alors des subventions ou mettant en place des conditions d'emprunt avantageuses.
- Il est recommandé aux pouvoirs publics de poursuivre la construction et l'entretien d'abris paracycloniques au profit des habitants de Rangiroa, afin que la population puisse être protégée de manière appropriée en cas de cyclone ou de marée de tempête.

1 INTRODUCTION

Projet de réduction des risques de catastrophe

L'enveloppe C du neuvième Fonds européen de développement est axée sur la réduction des risques associés aux catastrophes naturelles dans les Pays et Territoires d'Outre-mer du Pacifique.

Le volet Polynésie française du projet a été mené par la Division géosciences et technologies appliquées (SOPAC) de la CPS et cible la région des Tuamotu. Étant donné que la houle cyclonique constitue le principal aléa naturel présentant des risques dans l'archipel, l'objectif du présent projet est d'étudier la houle cyclonique et d'examiner les schémas d'aménagement envisageables afin de réduire les risques en question.

Le projet relatif à la Polynésie française se divise en deux parties : une étude scientifique sur les risques existant aux Tuamotu, fondée sur la collecte et l'examen de données bathymétriques et topographiques à Rangiroa ; et une analyse économique des solutions les plus efficaces pour atténuer ces risques.

Le présent rapport correspond au second volet de l'analyse économique complète conduite dans le cadre du projet. Il donne un premier aperçu de l'efficacité des solutions d'adaptation que peut mettre en place le gouvernement de la Polynésie française pour réduire les risques de dégâts et de pertes en cas de houle cyclonique. Bien que chaque stratégie n'y soit pas évaluée de manière exhaustive, l'analyse devrait néanmoins fournir des estimations et recommandations générales solides et fondées sur les données disponibles.

Objet de la présente analyse

Face à la menace que représentent les cyclones et les ondes de tempête qu'ils engendrent, la Polynésie française a adopté une politique de prévention des risques établissant des règles en matière d'aménagement du territoire en vue de mieux protéger les îliens, notamment à Rangiroa et sur les atolls voisins.

Dans le cadre de la politique de prévention des risques, c'est l'instauration d'une zone de retrait qui est jusqu'à présent la solution privilégiée à Rangiroa, à savoir une zone réglementée où les habitants n'ont pas le droit de reconstruire et d'entretenir les propriétés existantes, ni d'entreprendre de nouveaux travaux de construction. La zone de retrait proposée pour l'heure correspond aux terres situées à moins de 30 m de la première ligne de végétation côté océan et à moins de 10 m du littoral côté lagon sur les petits îlots appelés « motus » (Figure 1). Bien que les autorités disposent des moyens coercitifs nécessaires pour faire appliquer la réglementation, elle n'est guère respectée (Alain Timiona, Secrétaire général d'Avatoru, Rangiroa, communication personnelle, 2012). De manière générale, les pouvoirs publics estiment qu'une meilleure compréhension par les communautés locales du rôle crucial joué par le zonage dans la protection de leurs biens permettrait d'améliorer le respect de la réglementation (Émilie Nowak, Ingénieure risques naturels, Service de l'urbanisme de la Polynésie française, communication personnelle, 2012). La pénurie de terrains disponibles sur l'atoll et le profond attachement des habitants à leurs terres sont toutefois susceptibles de créer des difficultés.

Le gouvernement reste déterminé à renforcer le respect des dispositifs de zonage proposés à Rangiroa, mais s'intéresse également aux autres options d'adaptation aux marées de tempête. Pour l'heure, les infrastructures capables de résister à des événements cycloniques qui ne cessent de s'intensifier font défaut dans l'archipel des Tuamotu. Trois solutions pourraient permettre d'améliorer la résistance des ouvrages de Rangiroa en cas de houle cyclonique. Premièrement, la population pourrait avoir recours à des maisons en kit plus facilement remplaçables au lieu des logements en béton permanents qui sont actuellement utilisés et qu'il est assez coûteux de faire réparer suite à des fortes houles ou des houles cycloniques. Deuxièmement, les bâtiments pourraient être surélevés (sur des piliers de 1,5 m). Troisièmement, une levée de protection (digue) pourrait être construite le long de certaines zones côtières de l'atoll à des fins de comparaison. Il convient de noter que la digue ne figure pas parmi les stratégies prévues par le gouvernement de la Polynésie française dans les schémas d'aménagement de Rangiroa. Cela étant, dans le cadre des efforts d'adaptation, il est essentiel que les autorités disposent d'informations sur les mérites relatifs de différentes méthodes, l'objectif étant de renforcer la résilience de la population et d'atténuer les effets des inondations côtières et des marées de tempête qui surviendront à l'avenir.

Afin d'éclairer les futures réflexions, les coûts et les bénéfices potentiels de quatre solutions d'adaptation envisagées à Rangiroa sont soulignés dans le présent document : la zone de retrait, l'utilisation de maisons en kit, la surélévation des bâtiments et, à des fins de comparaison, l'édification d'une digue. Notre analyse est ciblée sur les gains qui seraient obtenus grâce à la mise en œuvre de mesures d'adaptation à une houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m.

Organisation du rapport

La deuxième partie du rapport fournit des informations contextuelles pertinentes sur la Polynésie française, son économie et les conditions climatiques susceptibles d'entraîner des inondations côtières. Nous y exposons ensuite les risques auxquels est confronté Rangiroa lors de cyclones ainsi que les solutions envisageables dès aujourd'hui et à l'avenir en vue d'atténuer ces risques. La troisième partie décrit la méthode employée pour l'analyse bénéfice-coût, les hypothèses émises concernant chaque solution d'adaptation examinée ainsi que les scénarios illustratifs connexes soumis à l'étude bénéfice-coût. Les résultats de l'analyse du moindre coût sont présentés dans la quatrième partie, tandis que la cinquième partie détaille les avantages tirés de chaque scénario et les résultats correspondants. La sixième partie regroupe les conclusions concernant les bénéfices et les coûts, de sorte à dresser un tableau général pour chaque scénario. Elle comporte également une analyse de sensibilité. Dans la septième partie, la faisabilité et les incidences de chaque solution d'adaptation sont abordées.

Figure 1 : Carte de la zone d'étude. Source : SOPAC, CPS (2013).

2 CONTEXTE

Polynésie française

La Polynésie française est un Pays d'Outre-mer français situé au cœur du Pacifique, entre les 7° et 28° de latitude Sud et les 134° et 155° de longitude Ouest. La plupart de ses îles sont très isolées et séparées par de vastes distances. Ses 118 îles occupent une superficie terrestre totale d'environ 3 500 km², mais une fois ajoutée la surface maritime, le territoire s'étend sur 2 500 000 km² (Figure 2).

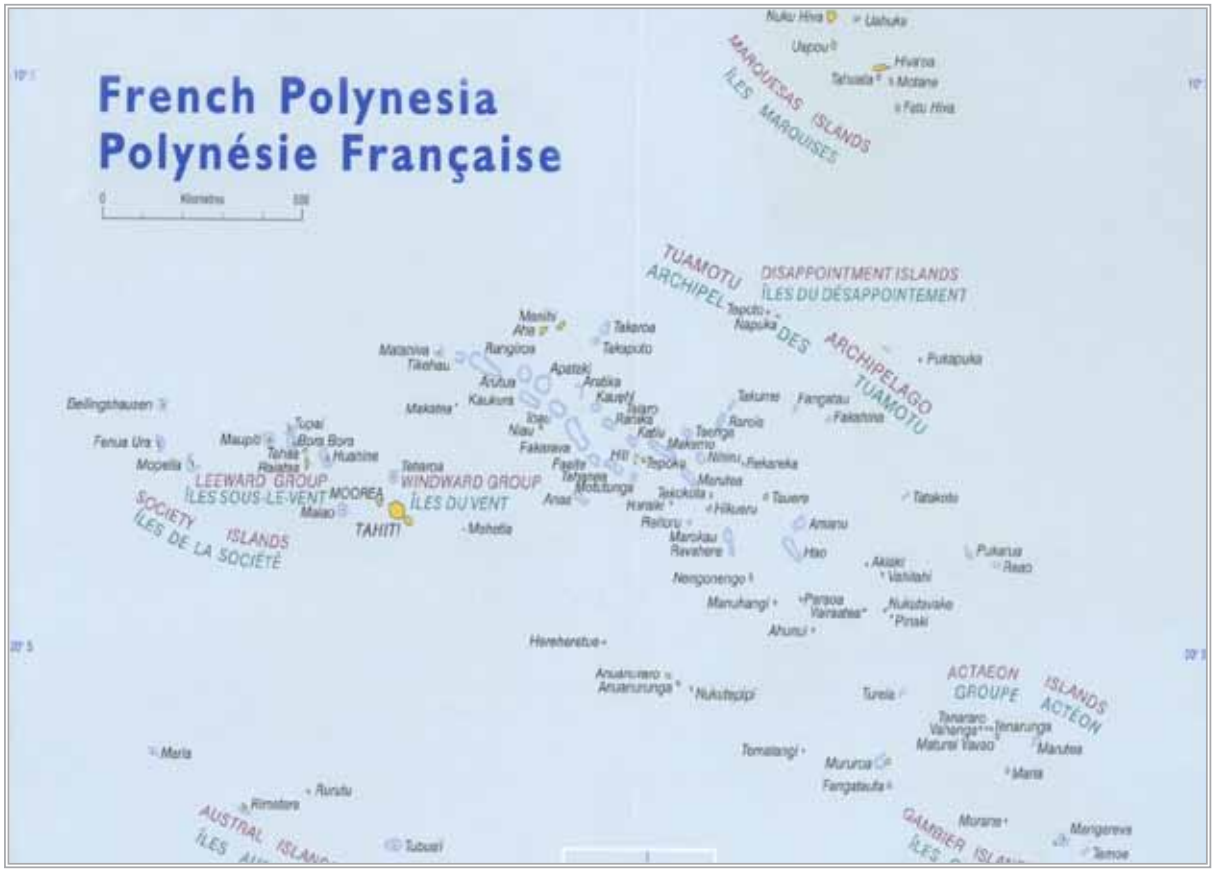

Figure 2 : La Polynésie française. Source : SOPAC, CPS (2013).

La Polynésie française compte 260 000 habitants (ISPF, 2007) et connaît une forte croissance démographique, sa population ayant triplé entre 1962 et 2007 (ISPF, 2009). Sa densité moyenne (74 habitants/km²) est assez faible par rapport à celle de nombreux pays océaniens (UNESCO, 2011), mais varie d'une île à l'autre.

Les îles de la Polynésie française forment cinq archipels : l'archipel de la Société, l'archipel des Tuamotu, l'archipel des Gambier, l'archipel des Marquises et les Australes (Figure 2). Papeete, la capitale, se trouve sur l'île de Tahiti, qui appartient à l'archipel de la Société.

Présentation succincte du contexte économique

Comme dans une grande partie du Pacifique, l'économie de la Polynésie française était fondée sur le secteur primaire et l'agriculture vivrière jusqu'à la seconde moitié du XXe siècle. Deux de ses principales marchandises d'exportation étaient le phosphate et la vanille, cette dernière demeurant aujourd'hui encore un produit phare.

Le tourisme représente à peu près un quart des recettes générées par le secteur tertiaire. Les sites touristiques sont avant tout situés sur le littoral, environ 80 % se trouvant à proximité des lagons (Avangliano et al., 2009). Depuis 2003, la filière a connu un important recul, notamment en raison de la réduction du nombre de compagnies aériennes desservant le pays, de l'affaiblissement du dollar des États-Unis d'Amérique (ce qui a rendu cette destination plus onéreuse en termes relatifs pour les voyageurs états-uniens) et de l'offre touristique relativement limitée en Polynésie française (Avangliano et al., 2009). Quoi qu'il en soit, les dommages occasionnés aux zones côtières par les cyclones ont des répercussions sur l'activité touristique.

Outre le secteur tertiaire, la perliculture et la pêche constituent elles aussi des sources majeures de revenus pour le pays. Malheureusement, la filière perlière connaît un ralentissement depuis quelque temps. Alors qu'elle engendrait 75 % des

recettes d'exportation du pays et qu'elle employait plus de 5 000 personnes en 2008 (IEOM, 2008), la perliculture est à présent un secteur en déclin, fortement touché par la baisse des prix et des ventes à l'échelon international. Avant même l'année 2008, les ventes de perles avaient diminué de moitié entre 2002 et 2007, et les exportations de perles de 32 % (ISPF, 2009). Ces évolutions ont eu une incidence considérable sur l'économie des Tuamotu, où étaient implantées de nombreuses fermes perlières. En revanche, depuis quelques années, on note un rebond du secteur de la pêche, avec une hausse de la valeur des produits halieutiques exportés et des recettes de 626 000 000 CPF engrangées au total pour les exportations de poissons pélagiques en 2010 (IEOM, 2011).

Le secteur agricole est quant à lui relativement restreint, car la plupart des Polynésiens estiment qu'il est plus rentable de travailler dans d'autres domaines. La majeure partie des produits primaires consommés en Polynésie française sont d'ailleurs importés.

Entre 2004 et 2007 (dernier recensement publié), le taux de chômage est demeuré stable à 11,7 %. Au vu de la crise économique mondiale qui a éclaté en 2008, l'Institut d'émission d'Outre-mer estime que ce taux dépasse à présent les 20 % (IEOM, 2011).

Les ressources sont variées dans l'archipel des Tuamotu. Les activités agricoles sont limitées à cause de la qualité médiocre des sols sur les atolls coralliens, bien que certaines cultures puissent être plantées dans les fosses à taro (Lonely Planet, 2009). Le poisson regorge quant à lui dans les lagons, et les fermes perlières permettent d'engendrer des revenus supplémentaires. De plus, le coprah occupe une place importante dans l'économie, et c'est à Rangiroa que sont produites les plus grandes quantités. L'archipel des Tuamotu est en outre fortement tributaire du tourisme, et ses superbes lagons sont réputés dans le monde entier (Lonely Planet, 2009). À la lumière de ces éléments notamment, l'archipel représente aujourd'hui une zone stratégique en Polynésie française pour le secteur du tourisme et la perliculture, deux des principaux moteurs économiques du pays.

À Rangiroa, le marché immobilier est restreint, car la plupart des terres sont transmises de génération en génération.

Conditions climatiques

Dans la région des Tuamotu, le climat est tropical, chaud et humide. Le phénomène El Niño est présent en Polynésie française, ce qui accroît sensiblement le nombre de cyclones susceptibles de frapper l'archipel (Avangliano et al., 2009).

Bien évidemment, les cyclones et les marées de tempête sont d'ampleur variable. En règle générale, les événements de moindre envergure se produisent plus fréquemment, peut-être une fois tous les cinq ans uniquement, tandis que les phénomènes majeurs surviendraient moins souvent, probablement une à deux fois par siècle seulement.

Scénarios futurs relatifs au changement climatique

Bien que des prévisions aient été établies concernant la fréquence et l'ampleur des cyclones tropicaux en Océanie, on observe des écarts notables entre les différents modèles scientifiques. Le Centre pour la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO) s'est appuyé sur plusieurs modèles en vue d'émettre ses prévisions pour le Pacifique, en se fondant sur le scénario A2 (émissions élevées ; Bureau australien de météorologie et CSIRO, 2011). Pour le bassin Sud-Est, où se trouve la Polynésie française, la fréquence des cyclones tropicaux à l'horizon 2080-2099 pourrait aussi bien augmenter de 10 % que diminuer de 70 % par rapport à aujourd'hui (1980-1999). En fonction des modèles utilisés, l'intensité maximale potentielle des cyclones oscillerait entre une hausse de 13 % et une baisse de 59 % dans la région d'étude. Compte tenu de l'extrême variabilité des prévisions, toute mesure d'adaptation visant à réduire les dégâts et les pertes devrait se révéler bénéfique, car la préparation aux scénarios climatiques les moins favorables serait ainsi améliorée.

Questions relatives aux risques de catastrophe

Le Portail océanien d'information sur les catastrophes fait état à ce jour d'un total de onze catastrophes naturelles déclarées à l'échelon national depuis 1980 en Polynésie française. La majorité des catastrophes enregistrées sont des cyclones tropicaux (huit phénomènes), suivis par des glissements de terrain (trois événements ; Tableau 5). Ces onze catastrophes ont provoqué 56 décès au total et occasionné de lourds dégâts aux logements, aux aménagements et aux cultures.

Tableau 5 : Nombre de catastrophes naturelles et nombre total de victimes, 1980-2012.

	Nombre de phénomènes	Nombre total de victimes (décès)
Cyclones tropicaux	8	33
Glissements de terrain	3	23

Source : Base de données du Portail océanien d'information sur les catastrophes (2012).

Les huit cyclones recensés dans la base de données du Portail océanien d'information sur les catastrophes sont détaillés dans le Tableau 6, avec notamment des renseignements sur les dégâts estimés et les victimes. En ce qui concerne les deux cyclones pour lesquels une estimation chiffrée a été donnée (cyclones tropicaux Veena et Orama), le coût moyen s'élève aux alentours de 18,5 millions de dollars É.-U. (aux prix de 1983). Cinq des huit cyclones ont entraîné des pertes humaines, avec une moyenne de 6,6 décès par événement.

Tableau 6 : Informations détaillées sur les cyclones tropicaux recensés en Polynésie française sur la période 1980-2012.

Nom du cyclone tropical	Année	Coût nominal estimé en milliers de dollars É.-U.	Nombre de décès	Nombre de personnes sinistrées	Remarques
Veena	1983	21,000	1	5,050	
Orama	1983	16,000	6		
Arthur	1991				
Osea	1997			5,600	Dégâts importants causés aux logements, aux infrastructures et aux cultures.
Martin	1997		8		Dommages importants occasionnés aux bâtiments et aux cultures – vent et forte houle cyclonique.
Alan	1998		8		Dégâts causés aux bâtiments, aux cultures et aux infrastructures. Pertes humaines occasionnées par des coulées de boue.
Veli	1998				Dommages causés aux logements et aux zones côtières.
Bart	1998		10		Dégâts mineurs. Décès dus au chavirement d'un navire provoqué par la mer agitée.

Source : Base de données du Portail océanien d'information sur les catastrophes (2012).

Recensement des dégâts causés par le cyclone Oli (2010)

Il semble que le cyclone Oli (2010) soit l'un des plus dévastateurs qu'ait connu le pays ces dernières années. D'après la Polynésie française, le coût total des dégâts occasionnés par Oli aux logements et aux infrastructures s'élève à 70 millions de dollars É.-U. (Radio New Zealand International, 2010a). Environ un millier de maisons ont été endommagées par les vents violents, dont 600 à Tubuai et aux Australes. Au total, 284 logements ont été entièrement détruits (Radio New Zealand International, 2010b). De plus, un cinquième de Tahiti et de Moorea, les îles principales, a été privé de courant (Australian Broadcasting Corporation, 2010). Quelque 3 400 personnes vivant sur le littoral de Tahiti et de Moorea ont dû être évacuées vers des zones plus élevées. Dans d'autres endroits, en revanche, il a été difficile de procéder à l'évacuation des habitants en raison des distances importantes entre les îles. Les habitants de Tubuai ont affirmé que le cyclone Oli avait été la pire tempête survenue dans la région de mémoire d'homme (Australian Broadcasting Corporation, 2010).

Les inondations côtières sont un phénomène courant dans la majorité des îles de Polynésie française, et les efforts déployés en vue d'atténuer les effets des catastrophes ciblent essentiellement les îles habitées, en particulier celles de faible altitude ou celles qui ne comportent que peu voire pas de terrains élevés où se réfugier en cas de cyclone et d'ondes de tempête. Dans l'archipel des Tuamotu, qui compte un nombre relativement important d'habitants, les îles ne présentent pas plus de 2 à 3 m d'altitude. La présente analyse porte sur l'atoll le plus peuplé de l'archipel, Rangiroa, et vise à fournir une évaluation économique de l'efficacité des solutions envisagées pour lutter contre les inondations côtières sur l'atoll.

Archipel des Tuamotu

Situé au nord-est de Tahiti, l'archipel des Tuamotu comprend 77 atolls, dont les plus proches se trouvent à 300 km de la capitale polynésienne (Figure 3). La superficie totale des terres émergées de l'archipel est égale à 700 km^2, et des milliers de kilomètres carrés d'océan séparent les différentes îles. Des récifs extérieurs ceignent entièrement certains atolls. Seuls 30 atolls environ disposent d'un chenal permettant aux bateaux d'accéder facilement au lagon.

Les îles de l'archipel sont regroupées en communes, et c'est celle de Rangiroa qui est la plus peuplée avec 3 245 habitants. Elle se compose de trois atolls, Rangiroa, Mataiva et Tikehau, ainsi que de l'île de Makatea (ISPF, 2007a).

Rangiroa est l'atoll le plus important des Tuamotu, aussi bien en termes de taille que de population (Figure 4), et l'un des plus grands atolls au monde. Il s'étend sur 75 km de long et 25 km de large, et ses nombreux motus forment un mur perméable autour de son lagon. Sur les motus, qui s'apparentent à des îlots, la largeur maximale entre l'océan et le lagon n'est que de quelques centaines de mètres (cartes du Département îles et océan de la Division SOPAC, CPS).

Figure 3 : Archipel des Tuamotu. Source : Lonely Planet (2009).

Les îles de l'archipel sont regroupées en communes, et c'est celle de Rangiroa qui est la plus peuplée avec 3 245 habitants. Elle se compose de trois atolls, Rangiroa, Mataiva et Tikehau, ainsi que de l'île de Makatea (ISPF, 2007a).

Rangiroa est l'atoll le plus important des Tuamotu, aussi bien en termes de taille que de population (Figure 4), et l'un des plus grands atolls au monde. Il s'étend sur 75 km de long et 25 km de large, et ses nombreux motus forment un mur perméable autour de son lagon. Sur les motus, qui s'apparentent à des îlots, la largeur maximale entre l'océan et le lagon n'est que de quelques centaines de mètres (cartes du Département îles et océan de la Division SOPAC, CPS).

Figure 4 : Rangiroa. Source : Division SOPAC de la CPS (2013).

Tiputa et Avatoru, les deux principaux villages de Rangiroa situés au nord de l'atoll, rassemblent la majeure partie des 2 473 habitants (ISPF, 2007a), et quelques kilomètres seulement les séparent. On peut se rendre d'un village à l'autre en empruntant la route principale qui relie Avatoru à la passe de Tiputa, puis en prenant un ferry ou un autre bateau pour rejoindre Tiputa, de l'autre côté.

Rangiroa comporte deux chenaux entre l'océan et son lagon, et ceux-ci sont fréquemment utilisés, même par de petites embarcations. De plus, un ferry circule dans la passe de Tiputa, et un grand nombre de ses passagers font chaque jour la navette entre Tiputa et Avatoru pour aller à l'école ou au travail.

Étant donné que Tiputa et Avatoru sont les zones les plus peuplées de Rangiroa, ce sont ces deux sites principaux qui sont essentiellement examinés dans la présente analyse.

État des lieux des mesures de réduction des risques

Zone de retrait

Une « zone rouge » (également appelée zone d'aléa fort) a récemment été établie à Rangiroa. La réglementation interdit la conduite de travaux de construction ou d'entretien quels qu'ils soient à l'intérieur de la zone de retrait. Cette dernière est délimitée en rouge sur la carte représentant la partie de Rangiroa étudiée (Figure 1). Les limites de la zone rouge applicable au tronçon le plus peuplé d'Avatoru sont indiquées à la Figure 5.

Figure 5 : Carte détaillée représentant les limites de la zone de retrait pour une petite partie d'Avatoru. Source : Carte de la SOPAC établie à partir de fichiers de formes communiqués par le Service de l'urbanisme (2013).

Bien qu'en théorie une zone de retrait permette de réduire les dégâts occasionnés par de fortes houles cycloniques, grâce au déplacement des habitations vers des endroits plus éloignés du littoral (hors de la zone de retrait), elle restreint dans les faits les terrains exploitables. Étant donné qu'à Rangiroa, la bande de terre entre l'océan et le lagon ne fait pas plus de quelques centaines de mètres de largeur, une part considérable des terres habitables devient alors indisponible. Pour l'heure, aucune indemnisation n'est accordée aux propriétaires de terrains situés à l'intérieur de la zone (Figure 1), afin de compenser la perte de valeur foncière ou l'interdiction de construire. Divers facteurs risquent même de dissuader les habitants de se conformer à la réglementation : par exemple, certaines personnes ont peut-être épargné afin d'acquérir une parcelle avant que la zone d'aléa fort ne soit mise en place, et découvrent à présent que leur lopin appartient à la zone rouge. Elles n'ont donc pas le droit de construire sur leur terrain et ne pourront très certainement pas le revendre au prix où elles l'ont acheté, puisque les mesures relatives à la zone de retrait sont désormais en vigueur.

En cas d'application stricte de la zone rouge, les résidences qui se trouvent dans ce périmètre devront être déplacées hors de la plage pour que des travaux de rénovation ou de reconstruction puissent être réalisés. Outre la perte de jouissance, cela signifie que les habitants devraient en définitive supporter les coûts associés à l'abandon de l'ensemble des parcelles concernées et à l'achat de nouveaux terrains. De plus, pour une grande partie de la population habitant la zone de retrait, il est tout simplement impensable de déménager. En effet, les terrains ont été transmis de génération en génération et les habitants sont très attachés à leurs terres (Alain Timiona, Secrétaire général d'Avatoru, communication personnelle de décembre 2012).

Autre difficulté liée à la zone rouge : de nombreuses installations de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse y sont implantées (Alain Timiona, Secrétaire général d'Avatoru, communication personnelle de décembre 2012). Ces installations ont été construites par le gouvernement dans le cadre de son programme d'alimentation en eau potable, au titre duquel une commune est tenue de fournir de l'eau douce à l'ensemble de ses habitants. Des problèmes pourraient donc surgir à l'avenir, puisqu'il sera en principe interdit de mener des travaux de réparation et de reconstruction dans la zone.

La zone de retrait est considérée ici comme l'une des quatre solutions que peuvent envisager les pouvoirs publics en vue d'atténuer l'incidence des cyclones.

Murets de protection

Il s'agit de petits murs qui dépassent d'environ 50 cm la surface de la mer, généralement construits en vue de limiter l'érosion des zones côtières. Il est peu probable que de tels murets permettent de réduire les dommages occasionnés par les marées de tempête. En effet, même lors d'une marée haute normale, il n'est pas rare que les vagues passent par-dessus les murets, ce qui contribue parfois à l'érosion des plages qu'ils étaient censés protéger. À Rangiroa, au moins une maison a été abandonnée à cause de la subsidence provoquée par l'érosion du sol sablonneux sur lequel elle était construite, alors même qu'un muret de protection y avait été érigé afin de prévenir cette situation (photographie prise sur le lieu en question).

Figure 6 : Un muret de protection côté lagon à Avatoru, muret qui n'empêche pas l'érosion de la plage. Photographie : Anna Rios Wilks (décembre 2012).

Il a été observé que non seulement les vagues passaient par-dessus les murets de protection, mais aussi que l'eau de mer parvenait souvent à s'infiltrer par-dessous, minant ainsi les fondations et entraînant l'effondrement des ouvrages (Raymond Siao de la Direction de l'équipement, communication personnelle de décembre 2012). C'est tout particulièrement vrai lorsque le muret n'a pas été bâti dans les règles de l'art et n'est pas incliné vers la mer de sorte à limiter l'impact des vagues.

Par le passé, de nombreux murets de protection ont été érigés, notamment dans l'archipel des Tuamotu, afin de protéger les zones côtières basses. Les murets sont généralement construits à l'aide de débris coralliens (ramassés sur place) mélangés à du ciment de manière à former une structure solide qui réduit l'effet des vagues sur le littoral. Ils mesurent habituellement à peu près 1,5 m de hauteur, pour un niveau d'eau d'environ 1 m.

Certes, les murets de protection contribuent peut-être à freiner l'érosion pendant un nombre limité d'années, mais ils ne sont guère efficaces pour ralentir la houle.

Abris anticycloniques

En 1983 et 1984, plusieurs cyclones ont frappé Rangiroa. Des vagues ont submergé ses motus, non seulement depuis le rivage océanique, mais également côté lagon, ravageant ainsi les maisons qui bordaient les plages.

Après ces événements, les autorités ont décrété la construction d'abris paracycloniques au profit des habitants des Tuamotu. Le projet en question n'a pas rencontré le succès escompté, la majorité des îles disposant toujours d'un nombre inapproprié d'abris ou d'abris incapables de résister à un cyclone. En 2007, l'État français et le gouvernement de la Polynésie française ont lancé un nouveau programme stratégique visant à construire suffisamment d'abris pour l'ensemble des populations vulnérables, pour un coût total estimé à 11 ou 12 milliards de francs Pacifique. Quelques refuges ont ainsi été construits. Dans la commune de Rangiroa, un abri a été érigé sur l'atoll de Tikehau et un autre sur l'atoll de Mataiva, où il fait office d'établissement d'enseignement secondaire et d'internat en temps normal. La commune de Hao a elle aussi bénéficié d'un abri. En plus d'offrir une solution à long terme pour protéger la population en cas de cyclone et de marée de tempête, ces bâtiments servent également à la collectivité le reste de l'année (Éric Sacher, Chef de la subdivision administrative des Tuamotu-Gambier, Haut-Commissariat de la République française, communication personnelle de décembre 2012). De plus, en phase de construction, près de la moitié de la main-d'œuvre est embauchée directement sur l'atoll, ce qui procure des emplois à la population locale, fait profiter l'atoll d'effets multiplicateurs du revenu et est susceptible de renforcer la qualité du capital humain.

Un programme de construction d'abris à hauteur de 1,6 milliard de francs Pacifique est d'ores et déjà mené à Rangiroa et dans l'archipel des Tuamotu. Les bâtiments auparavant utilisés comme abris n'avaient pas la capacité d'accueillir tous les habitants. Souvent, les personnes vivant à proximité d'Avatoru, la ville principale, venaient aussi y trouver refuge, et de nombreux enfants restaient pour la semaine à l'internat (le bâtiment de l'internat sert actuellement d'abri). Par ailleurs, les abris de fortune utilisés, souvent des églises et d'autres édifices similaires, ne sont pas conçus pour résister aux cyclones.

Trois abris sont prévus à Rangiroa: un dans le village de Tiputa et deux dans le village d'Avatoru. L'abri destiné au motu de Tiputa est terminé : s'apparentant à une maison en béton, il est surélevé sur de grandes arches en béton et il comporte une partie centrale en béton. Ces ouvrages doivent pouvoir résister à des vents de plus de 300 km/h (Éric Sacher, Chef de la subdivision administrative des Tuamotu-Gambier, Haut-Commissariat de la République française, communication personnelle de décembre 2012). L'abri peut accueillir l'ensemble des habitants de Tiputa et comprend environ 1,5 m^2 par personne dans la principale zone collective. La cuisine, les toilettes et les autres pièces offrent un espace et des services supplémentaires. Les locaux sont surélevés de 3 à 3,5 m par rapport au sol. En temps normal, l'abri est une école primaire, ce qui permet d'utiliser le bâtiment et de s'assurer de son entretien tout au long de l'année. La quasi-totalité des fonds nécessaires à la construction des deux autres abris de Rangiroa ont été mobilisés. Ces refuges seront situés sur le côté Avatoru de la passe de Tiputa et pourront héberger toute la population d'Avatoru, à savoir plus de 1 200 personnes, en cas d'urgence. Leurs dimensions seront similaires à celles de l'abri de Tiputa. L'un des refuges d'Avatoru présentera une superficie utile de 1 100 m^2 et fera office de nouveau centre médical, tandis que l'autre servira de bâtiment municipal (Secrétaire général d'Avatoru, communication personnelle de décembre 2012). La construction de ces deux abris devrait commencer en 2013, ce qui signifie que les trois abris prévus pour Rangiroa devraient être achevés d'ici 2016. Une fois le projet mené à bien, un nouveau plan d'urgence sera élaboré afin d'indiquer à l'ensemble de la population de Rangiroa les abris où se réfugier en cas de cyclone.

Les abris construits devraient en principe permettre de protéger tous les habitants en cas de marée de tempête. Le présent projet et l'analyse des autres solutions de réduction des risques envisageables demeurent néanmoins essentiels pour l'atténuation des dégâts causés aux biens et aux infrastructures de Rangiroa.

Autres solutions envisageables en vue de la réduction des risques

Bien que des stratégies de protection des populations côtières soient d'ores et déjà en place, le gouvernement de la Polynésie française souhaite examiner d'autres solutions visant à limiter les dégâts provoqués par les inondations. Plusieurs méthodes ont ainsi été analysées : la surélévation des habitations, l'utilisation de maisons en kit (*fare* MTR) et l'établissement de digues.

Digues (levées de protection)

La Polynésie française ne comporte que très peu de digues, et la plus grande, de 5 m de hauteur, se trouve à Tahiti et a coûté environ 170 000 XPF par mètre de longueur lors de sa construction en 1978 (Boris Peytermann du Port autonome, communication personnelle de janvier 2013), ce qui fait approximativement 560 692 XPF par mètre aux prix de 2012.

La digue a été érigée afin de protéger le port principal et les infrastructures stratégiques cruciales de la capitale, Papeete, si bien qu'il était rentable de financer un ouvrage de cette envergure.

Les levées de protection ne sont pas infaillibles, comme on a pu le constater au Japon lors du tsunami de 2011 (Onishi, 2011). Toutefois, l'utilisation de ce type d'ouvrages à Tahiti devrait permettre de réduire la force de la submersion pour la plupart des épisodes de houle cyclonique.

Maisons en kit (*fare* MTR)

Une maison en kit ou *fare* MTR est une habitation livrée préfabriquée à son emplacement final. La construction des *fare* MTR examinés dans la présente étude est rapide et relativement bon marché par rapport aux maisons en béton. Les maisons en kit sont également anticycloniques et peuvent résister à des vents allant jusqu'à 204 km/h comme attesté par SOCOTEC, un groupe d'analyse des risques indépendant (ingénieurs, Fonds de développement des archipels, communication personnelle de décembre 2012).

Pour les autorités, les maisons en kit constituent une solution d'adaptation intéressante face aux inondations côtières, car elles ont l'avantage d'offrir une protection assez efficace contre les vents cycloniques. De plus, les *fare* MTR retenus dans notre analyse sont surélevés de 1,5 m par rapport au sol, ce qui confère là aussi une certaine protection contre les inondations.

Comme les ingénieurs du Fonds de développement des archipels, le Secrétaire général du motu d'Avatoru, à Rangiroa, estime que les maisons en kit sont adaptées à la région. Les derniers *fare* MTR en date sont par définition anticycloniques, même s'il convient de préciser que le terme « anticyclonique » fait référence uniquement aux vents auxquels ils peuvent résister. Il n'existe aucune réglementation concernant la hauteur à laquelle surélever les logements ou la résistance aux vagues. Or, les grandes vagues continuent de représenter un danger. Les maisons en kit examinées sont des structures modernes, recommandées par le Fonds de développement des archipels. Elles sont érigées 1,5 m au-dessus du sol sur des piliers rectangulaires mesurant 40 cm de largeur sur 40 cm de profondeur. Le matériau adopté est le ciment, et des armatures en fer sont ajoutées à l'intérieur des piliers et des fondations. Chaque pilier fait 1,5 m de hauteur et les fondations en ciment sont enterrées sur plus de 30 cm. Sans entretien, la durée de vie moyenne d'une construction de ce type est de vingt ans (ingénieurs, Fonds de développement des archipels, communication personnelle, 2012 ; ingénieurs de la Division SOPAC, communication personnelle, 2013). Lors de la mission à Rangiroa, une seule des maisons en kit observées était surélevée à cette hauteur, les autres se trouvant à environ 1 m au-dessus du sol (Figure 7).

Figure 7 : Une maison en kit faiblement surélevée à Rangiroa. Photographie : Anna Rios Wilks (décembre 2012).

Comme elles sont rehaussées, les maisons en kit peuvent résister aux marées de tempête dans une certaine mesure. Néanmoins, en cas de phénomène majeur provoquant une submersion supérieure à 1,5 m, les maisons seraient assurément inondées. Il est peu probable que l'eau abîme les piliers, mais les débris flottants et le sable transportés par les vagues pourraient causer des dégâts considérables. Les troncs d'arbres et les bancs de sable projetés dégraderaient, voire détruiraient, les piliers. Si l'eau dépassait la hauteur des piliers, les maisons seraient certainement inondées et pourraient être sérieusement endommagées ou dévastées.

Bien que les maisons en kit offrent une certaine protection, il est possible que les personnes vivant dans ce type de logement (ou tout autre type d'habitation) doivent être évacuées vers des abris paracycloniques en cas de cyclone à Rangiroa.

La procédure d'acquisition des maisons peut varier. En règle générale, lorsque les revenus du ménage sont inférieurs à un certain seuil, des subventions sont allouées (elles peuvent ne représenter qu'un dixième du prix total de *fare* MTR). Les pouvoirs publics peuvent aussi octroyer gratuitement le logement à une famille dans un premier temps, puis celle-ci rembourse tout ou partie de la maison (en fonction des subventions accordées) en versant chaque mois un loyer, jusqu'à ce que la maison lui appartienne. Si l'on veut s'assurer du règlement de l'ensemble des loyers et de la bonne compréhension des conditions d'octroi des maisons, tous les intéressés, à savoir le ministère, les partis politiques et les médias, doivent veiller à fournir à la population des informations cohérentes, correctes et exhaustives sur le dispositif proposé.

Surélévation des bâtiments

La surélévation des maisons n'est pas un procédé nouveau dans l'archipel des Tuamotu. Depuis des générations, de nombreux logements sont construits sur pilotis afin de les protéger des inondations et d'empêcher l'humidité de pénétrer à l'intérieur par le sol.

Deux options de surélévation sont envisageables en vue de limiter les effets des inondations côtières : fixer une hauteur minimale pour les nouvelles constructions, ou bien exiger que l'ensemble des bâtiments existants soient immédiatement surélevés, soit en les démontant puis en les reconstruisant, soit en insérant des piliers sous les habitations après les avoir soulevées à l'aide d'une grue. Il serait très certainement moins onéreux de prévoir la surélévation des maisons dès leur conception et leur fabrication, sauf si les structures existantes ont été construites à l'aide de matériaux extrêmement coûteux. De plus, faire venir une grue sur les îles serait hors de prix.

Dans notre analyse, nous nous intéressons à la surélévation des habitations 1 m au-dessus du sol ; nous étudions aussi bien la surélévation immédiate de l'ensemble des bâtiments existants que la surélévation progressive des constructions (c'est-à-dire au moment où les bâtiments sont reconstruits).

3 MÉTHODE

L'étude se présente sous la forme d'une analyse préliminaire du rapport bénéfice-coût pour les solutions suivantes : zone de retrait, surélévation des bâtiments et construction de maisons en kit dans la partie la plus peuplée du littoral de Rangiroa. La présente analyse correspond à la seconde partie de l'évaluation économique complète menée dans le cadre du projet. Nous nous sommes appuyés sur la fréquence et la gravité des inondations côtières causées dans le passé par les cyclones et les marées de tempête.

Le gouvernement de la Polynésie française désire réduire les risques induits par les houles cycloniques se traduisant par des hauteurs significatives de 12 m. D'après une analyse des valeurs extrêmes réalisée à Tahiti par Scott Stephen de l'Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère de Nouvelle-Zélande (NIWA ; Modélisateur [phénomènes côtiers], Division SOPAC de la CPS, communication personnelle, 2012), une houle significative de 12 m se produit environ tous les 50 ans, soit une probabilité annuelle de survenue de 2 %.

La zone, la profondeur et la vitesse potentielles de l'inondation provoquée par une houle de ce type ont été déterminées sur la base de données scientifiques obtenues dans le cadre du volet modélisation du projet. Les bénéfices de chaque solution d'adaptation ont été évalués à partir de documents sur les inondations passées et d'un rapport récemment réalisé par une société d'ingénierie (Worley Parsons, 2013) concernant les dégâts susceptibles d'être causés par la houle cyclonique dans la zone d'étude de Rangiroa. Les avantages ont ensuite été mis en balance avec les coûts de mise en œuvre de chacune des solutions dans cette même zone. Les montants ont été estimés à l'aide de la méthode du moindre coût dans la première partie de la présente étude, où sont détaillés l'ensemble des hypothèses et des résultats relatifs aux coûts (Rios Wilks, 2013). Enfin, des recommandations préliminaires ont été formulées.

En règle générale, l'analyse économique porte sur la durée de fonctionnement de la composante la plus résistante d'un projet (Woodruff, 2008). Dans le cas présent, il s'agit de la digue, dont la durée de vie utile est estimée à 50 ans. Aux fins de l'étude, la période retenue est donc de 50 ans (deux générations), ce qui signifie que chaque solution d'adaptation est supposée être mise en place pour 50 ans, et que les coûts et les bénéfices connexes sont examinés sur ce laps de temps.

Analyse bénéfice-coût

Dans une analyse de ce type, le coût économique et les bénéfices de chacune des options sont évalués sur le plan financier, y compris la solution consistant à ne rien faire (option « aucune action » ou « situation d'origine »). Une fois les dépenses et les avantages réunis, on obtient la valeur actualisée nette de chaque solution (qui peut être négative), ainsi que le rapport bénéfice-coût correspondant. Le gouvernement de la Polynésie française pourra s'appuyer sur les évaluations réalisées afin de déterminer les stratégies les plus efficaces en vue de la réduction des risques associés à la houle cyclonique, aux différents stades de la période d'étude de 50 ans, et pourra ainsi prendre des décisions éclairées en la matière.

Chacune des solutions contribuera de manière plus ou moins importante à la limitation des dégâts causés par la houle cyclonique. Par conséquent, le niveau d'avantages dont profitera la société sera fonction de la formule retenue. Chaque solution d'adaptation est évaluée au regard de l'option « aucune action » (c'est-à-dire la situation actuelle). Les bénéfices économiques d'une solution équivalent donc à la diminution des dégâts et des pertes par rapport à la situation d'origine.

Dans le cadre du projet, une analyse statique, et non une analyse stochastique, a été réalisée. Une analyse statique suppose que seul un cyclone d'une ampleur prédéterminée peut survenir, soit, dans le cas présent, un phénomène tous les 50 ans. Or, des houles cycloniques de tout type sont susceptibles de se produire, aussi bien des épisodes mineurs observés en moyenne une fois par an que les inondations du millénaire. Chaque année, n'importe lequel de ces événements peut ainsi avoir lieu, voire plusieurs d'entre eux. Cependant, au vu des délais impartis pour la réalisation du projet, il aurait été trop complexe de procéder à une analyse tenant compte de l'ensemble des possibilités. L'analyse statique doit donc permettre d'obtenir une première estimation des coûts et des bénéfices générés par les solutions qui s'offrent aux autorités.

Scénarios d'adaptation examinés

Le gouvernement de la Polynésie française est ouvert à de nouvelles stratégies d'adaptation aux marées de tempête, les modalités précises restant toutefois à définir. Afin de donner une idée des considérations techniques à prendre en compte, plusieurs options de mise en œuvre sont proposées. Les options en question ne sont pas exhaustives et pourraient très bien prendre d'autres formes. Cela étant, nous espérons qu'elles fourniront suffisamment d'informations pour éclairer les futures discussions. Les solutions d'adaptation pourraient ainsi être mises en œuvre de treize manières différentes par le gouvernement. Bien qu'une seule méthode soit envisageable pour la digue (construction), on ignore dans quelle mesure un tel ouvrage permettrait de réduire la force de la marée de tempête, et c'est pourquoi trois scénarios hypothétiques ont été retenus pour l'analyse des avantages. Au total, quinze scénarios possibles ont donc été étudiés au titre de l'analyse bénéfice-coût ; ils sont résumés ci-après[2].

[2] L'analyse du moindre coût (Rios Wilks, 2013) contient des informations plus précises sur les hypothèses formulées pour chaque forme de mise en œuvre.

Digue

Un seul type de digue et de méthode de mise en œuvre est étudié. Il s'agit du même ouvrage que celui actuellement utilisé à Tahiti, dont les dimensions sont les suivantes : 5 m de hauteur, pour 1,2 m de largeur environ au sommet et plus de 5 m de largeur à la base. La digue s'étendrait sur toute la longueur de la zone d'étude (1 199 km), côté océan. On ne dispose pour l'heure d'aucune donnée permettant d'estimer dans quelle mesure une levée de protection permettrait d'atténuer la puissance d'une houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m. C'est pour cette raison que trois scénarios illustratifs ont été retenus pour l'examen des avantages attendus de la digue :

a) La digue permet de réduire la force de la houle cyclonique de 25 %.
b) La digue permet de réduire la force de la houle cyclonique de 50 %.
c) La digue permet de réduire la force de la houle cyclonique de 75 %.

Si une telle solution était plus sérieusement envisagée, il conviendrait de conduire des travaux de modélisation plus poussés concernant l'effet d'une digue sur la houle cyclonique. Cela étant, si d'après les résultats obtenus, la digue ne constitue pas une option viable sur le plan économique même avec une réduction de 75 % de la puissance, il est alors suggéré d'écarter cette solution.

Maisons en kit (*fare* MTR)

Dans la présente analyse, quatre scénarios différents sont étudiés pour les *fare* MTR :

a) Remplacement immédiat de toutes les habitations dans l'ensemble de la zone d'étude.
b) Remplacement immédiat des habitations situées dans la zone de retrait uniquement.
c) Remplacement progressif de toutes les habitations dans l'ensemble de la zone d'étude, lorsque les maisons actuellement utilisées arrivent au terme de leur durée de vie utile.
d) Remplacement progressif de toutes les habitations situées dans la zone de retrait, lorsque les maisons actuellement utilisées arrivent au terme de leur durée de vie utile.

Surélévation des bâtiments

Quatre scénarios sont examinés pour la solution « surélévation » :

a) Surélévation immédiate de toutes les habitations dans l'ensemble de la zone d'étude.
b) Surélévation immédiate des habitations situées dans la zone de retrait uniquement.
c) Surélévation progressive de toutes les habitations dans l'ensemble de la zone d'étude, lorsque les maisons actuellement utilisées arrivent au terme de leur durée de vie utile et que de nouveaux logements sont construits.
d) Surélévation progressive de toutes les habitations situées dans la zone de retrait, lorsque les maisons actuellement utilisées arrivent au terme de leur durée de vie utile et que de nouveaux logements sont construits.

Zone de retrait

Quatre scénarios différents sont analysés pour la zone de retrait :

a) Établissement d'une « zone interdite », avec relogement immédiat des habitants de la zone dans des maisons de plain-pied en béton.
b) Établissement d'une « zone interdite », avec relogement immédiat des habitants de la zone dans des *fare* MTR.
c) Établissement d'une zone où l'entretien et la construction de bâtiments sont interdits, avec relogement progressif des habitants de la zone[3] dans des maisons de plain-pied en béton.
d) Établissement d'une zone où l'entretien et la construction de bâtiments sont interdits, avec relogement progressif des habitants de la zone dans des *fare* MTR.

Hypothèses retenues pour l'analyse bénéfice-coût

Risque annuel de houle cyclonique

Le risque annuel de houle cyclonique a été fixé à 2 % dans l'ensemble de l'analyse. Cela signifie que, chaque année, les dégâts moyens anticipés dans la zone seraient équivalents à 2 % du total estimé des dégâts que pourraient provoquer les houles cycloniques.

[3] Il s'agit du type de zone actuellement en place ; les habitants ont l'interdiction d'y entretenir leurs biens immobiliers et d'y reconstruire.

Période prise en compte

Certaines dépenses liées aux solutions d'atténuation des risques devront être supportées au fil du temps, dans les années à venir. D'après la théorie économique, les individus préfèrent généralement supporter les coûts le plus tard possible et profiter des avantages le plus tôt possible. L'importance relative accordée aux coûts ou aux bénéfices associés à différents moments peut être déterminée de manière quantitative à l'aide de « l'actualisation ». L'actualisation de l'utilité future peut être modélisée de nombreuses façons différentes, et le débat reste ouvert concernant la meilleure méthode pour représenter les préférences temporelles collectives (consulter à ce sujet Bateman et Henderson, 1995, ou Cruz Rambaud et Muñoz Torrecillas, 2006). Dans notre analyse, c'est la forme exponentielle de l'actualisation qui est retenue.

Le choix du taux d'actualisation fait également l'objet d'âpres discussions (voir Holland, 2008, au sujet des taux d'actualisation employés dans les pays insulaires océaniens). Des taux d'actualisation très variables, oscillant de 3 à 12 %, continuent d'être utilisés dans les projets d'aménagement et les projets relatifs à l'environnement. Compte tenu du niveau élevé d'incertitude prévalant en Océanie, un taux de 10 % semble être l'option la plus communément retenue pour les activités de développement menées dans la région et est en outre conforme aux directives formulées par la Banque asiatique de développement en 2006 (Holland, 2008). De plus, un taux de 10 % permet de maintenir la cohérence avec les autres études conduites par la Division SOPAC. Dans la présente analyse, un taux d'actualisation de 10 % est donc appliqué à chaque solution examinée. Pour ce qui de l'analyse de sensibilité, des taux de 7 et de 3 % sont également utilisés.

Valeur et prix

Les coûts et les bénéfices sont indiqués en prix constants, et non en valeur nominale. La main-d'œuvre est systématiquement prise en compte dans les coûts de construction et de mise en œuvre.

Quant aux prix du foncier et de l'immobilier, ils ont été obtenus au moyen d'entretiens et de données recueillies à Tahiti et à Rangiroa. Les informations détaillées sont disponibles dans le document relatif à la méthode du moindre coût (Rios Wilks, 2013). Le Tableau 7 ci-après récapitule quant à lui les chiffres utilisés.

Tableau 7 : Coût des biens.

	Minimum	Moyenne	Maximum	Source
Prix du foncier à Rangiroa	88 XPF/m²	2,415 XPF/m²	12,000 XPF/m²	DAF
Maison en béton (plain-pied)		100,000 XPF/m²		Expert immobilier de Rangiroa
Fare MTR (plain-pied)		88,496 XPF/m²		FDA
Maison en béton surélevée (plain-pied)		107,000 XPF/m²		Expert immobilier de Rangiroa et estimations concernant le coût de la surélévation[4].

Données relatives à la zone d'étude

La superficie des terres et des surfaces construites dans la zone d'étude a été calculée à l'aide d'images aériennes et de données obtenues grâce à des systèmes d'information géographique. Les informations correspondantes sont résumées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Superficies des terres et des surfaces construites utilisées dans l'analyse.

	Superficie des terres (en m²)	Superficie des surfaces construites (en m²)
Total de la zone d'étude	4,435,600	203,078
Zone de retrait uniquement	796,300	5,815

Source : Division SOPAC de la CPS (2013).

Données relatives aux habitations existantes à Rangiroa

D'après des observations réalisées au mois de décembre 2012, la majorité des bâtiments présents à Avatoru et à Tiputa sont des constructions de plain-pied en béton. On a néanmoins recensé quelques rares constructions sur deux niveaux, habitations MTR et maisons en bois, de même que l'abri construit à Tiputa au titre du programme d'abris paracycloniques.

[4] On part du principe que la valeur d'une maison de plain-pied en béton surélevée est égale à la valeur d'une maison de plain-pied en béton non surélevée, à laquelle est ajouté le coût des biens utilisés pour surélever ce type d'habitation durant la construction. Comme indiqué dans l'analyse du moindre coût, les frais supplémentaires associés à la surélévation de tels bâtiments pendant leur construction équivalent à 7 % de la valeur de la structure non surélevée. Par conséquent, la valeur d'une maison de plain-pied en béton surélevée est égale à 107 % de la valeur d'une maison de plain-pied en béton non surélevée.

Tout au long de l'analyse économique, l'hypothèse retenue est que l'ensemble des bâtiments existants à Rangiroa sont des structures en béton sans étage. La durée de vie utile anticipée d'ouvrages en béton de ce type est de 50 ans. Le document relatif à la méthode du moindre coût contient des informations plus détaillées sur ce point (Rios Wilks, 2013).

Il convient également d'estimer l'âge des maisons qui se trouvent actuellement à Rangiroa. Le postulat est que les habitations sur place sont des bâtiments de plain-pied en béton, dont la durée de vie utile est de 50 ans. Étant donné que l'on ignore l'âge réel de chaque maison individuelle, il est supposé que les maisons se répartissent de manière homogène sur une période de zéro à 50 ans[5]. La valeur des maisons selon leur âge est calculée à l'aide de la formule du coût de remplacement net, qui est détaillée dans le rapport sur la méthode du moindre coût (Rios Wilks, 2013).

[5] Cela veut également dire que dans le scénario « aucune action », à savoir même si aucune mesure de réduction des risques n'est prise, chaque année, 2 % des maisons sont supposées atteindre l'âge de 50 ans et devoir être reconstruites.

4 ANALYSE DES COÛTS

L'analyse préliminaire du moindre coût pour les options de réduction des risques est décrite dans le rapport de Rios Wilks (2013a), et la synthèse des coûts cumulatifs dans le temps est présentée à la Figure 8. Les coûts en question ont été calculés en appliquant un taux d'actualisation social de 10 %.

La Figure 8 représente la valeur actualisée totale des coûts de mise en œuvre pour chaque scénario d'adaptation au terme de la période de 50 ans retenue dans le cadre de l'analyse. Le coût est identique pour tous les scénarios relatifs à une levée de protection et est indiqué dans une seule colonne.

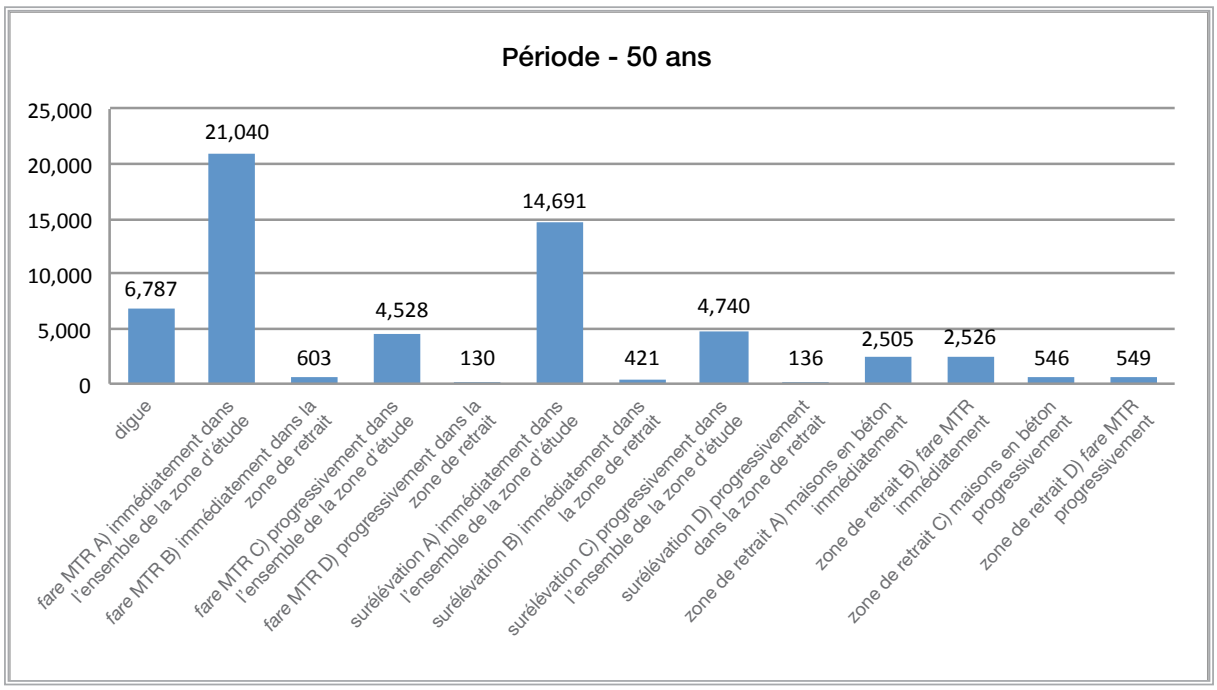

Figure 8 : Valeur totale actualisée des coûts au terme de la période de 50 ans (en millions de XPF).

Le remplacement immédiat de l'ensemble des bâtiments situés dans la zone d'étude par des *fare* MTR constitue le scénario le plus dispendieux. Ce résultat est probablement dû au fait qu'une large partie des dépenses seraient engagées dès la première année, et non à l'avenir. Plus les coûts doivent être supportés tardivement, moins leur valeur sociale est importante après application du taux d'actualisation correspondant aux préférences temporelles. Il est toutefois possible que ce soit les solutions les plus onéreuses qui permettent d'engranger le plus de bénéfices. C'est pourquoi, en vue d'étayer une prise de décision éclairée, il convient d'examiner le rapport bénéfice-coût afin de déterminer la stratégie la plus rentable.

5 ANALYSE DES BÉNÉFICES

Les bénéfices correspondent à la réduction des pertes et des dégâts provoqués par la houle cyclonique dont profite la communauté une fois une solution d'adaptation mise en œuvre. Compte tenu du manque de temps et de données, seuls les coûts et les avantages matériels sont pris en compte pour chaque option. Les incidences sur l'économie et l'environnement sont brièvement abordées.

Modélisation de la houle cyclonique à Rangiroa

La probabilité de survenue d'une houle d'une hauteur significative de 12 m n'est que de 2 % par an dans la région du Pacifique où se trouve Rangiroa, et un phénomène de cette ampleur ne toucherait pas forcément l'atoll même. De nombreux autres facteurs, comme la direction de la houle et l'amplitude de la marée, joueraient sur la hauteur de la vague. Aucune analyse probabiliste sur la survenue future de houles cycloniques modélisées spécifiquement pour Rangiroa n'a été conduite dans le cadre du projet relatif à la Polynésie française. C'est pourquoi, tout au long de la présente étude, nous nous sommes appuyés sur une simple probabilité estimée de 2 %.

À partir de modèles établis par l'équipe de la SOPAC, nous avons pu déterminer la profondeur et la vitesse d'inondation dans les différentes zones touchées en cas de houle cyclonique de cette envergure et, partant, déduire les dégâts probablement occasionnés.

Carte de la profondeur d'inondation

La Figure 9 représente les différentes profondeurs d'inondation susceptibles d'être observées à divers endroits de la zone d'étude en cas de houle cyclonique majeure.

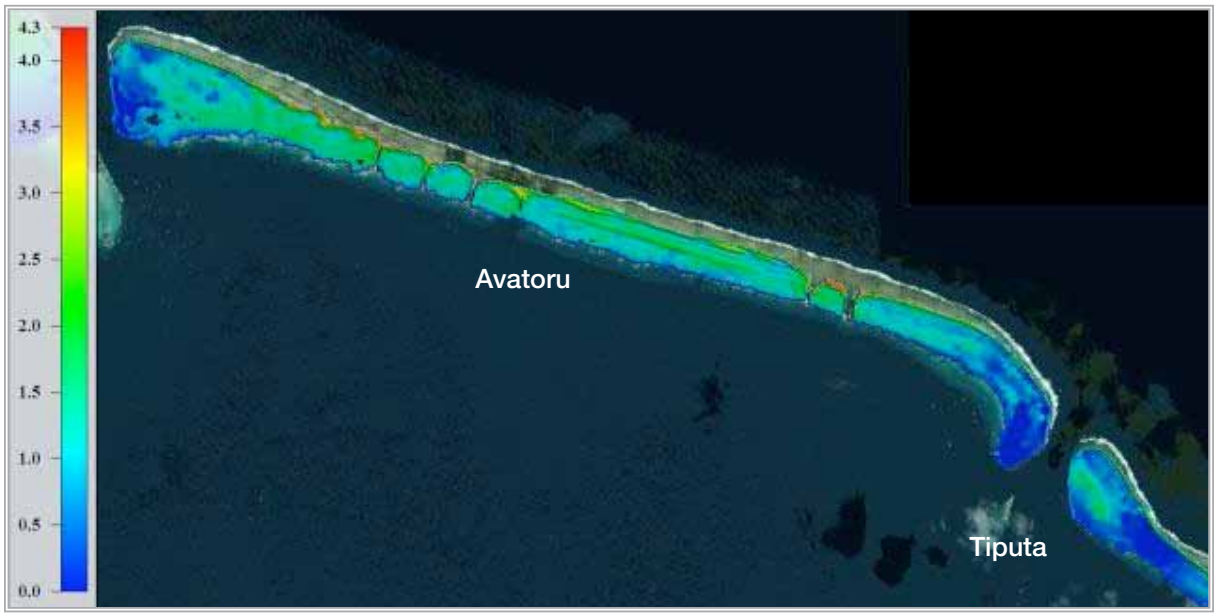

Figure 9 : Profondeur d'inondation (en mètres) en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m. Division SOPAC de la CPS, 2013.

Dans une large partie de la zone, la profondeur d'inondation devrait être d'au moins 1 m, et de plus de 3 m à certains endroits.

Carte de la vitesse d'inondation

La Figure 10 illustre la vitesse à laquelle l'inondation devrait toucher les différents points de la zone en cas de houle de 12 m de hauteur.

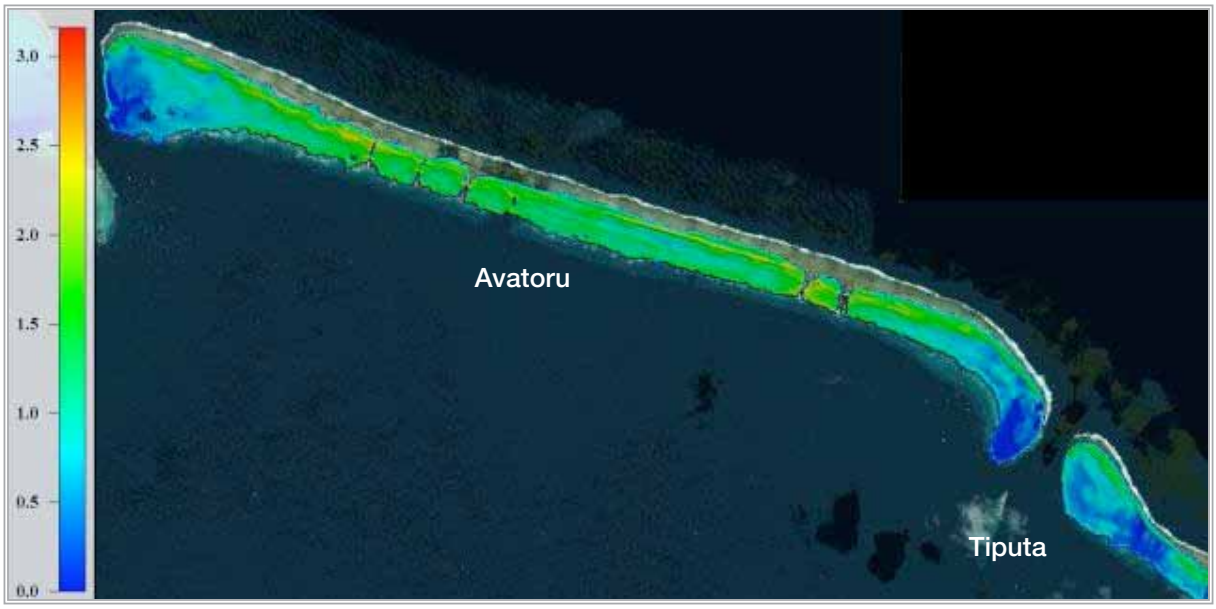

Figure 10 : Vitesse de la vague/submersion (en mètres/seconde) en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m. Division SOPAC de la CPS, 2013.

Dans la majeure partie de la zone, la vitesse serait supérieure à 1,5 m/s.

Carte des catégories de risque

La carte fait apparaître les risques, par catégorie, auxquels chaque endroit serait confronté si survenait un phénomène susceptible de se produire deux fois par siècle. Les catégories ci-après sont celles suggérées par la Polynésie française. Pour ce qui est des marées de tempête, les risques sont classés en fonction de la profondeur et de la vitesse d'inondation maximales dans une zone donnée, comme indiqué dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Catégorisation des risques de vague/submersion en Polynésie française.

	Vitesse < 0,5	0,5 ≤ vitesse
Profondeur < 0,5	Catégorie 1 (risque faible)	Catégorie 2 (risque intermédiaire)
0,5 ≤ profondeur < 1	Catégorie 2 (risque intermédiaire)	Catégorie 3 (risque élevé)
1 ≤ profondeur	Catégorie 3 (risque élevé)	Catégorie 4 (risque très élevé)

Les couleurs employées dans le tableau ci-dessus correspondent à celles utilisées à la Figure 11, chacune illustrant la catégorie de risque à tout point donné de la zone.

Figure 11 : Carte des catégories de risque. Division SOPAC de la CPS, 2013.

Carte de la densité de l'habitat

La carte ci-après indique où sont localisées les habitations dans les parties des motus d'Avatoru et de Tiputa étudiées dans le cadre du projet.

Figure 12 : Carte de la densité de l'habitat. Division SOPAC de la CPS, 2013.

Comme le montre la carte, la densité des ménages est élevée dans la zone d'étude et est légèrement plus importante sur le côté lagon des motus.

Dégâts et pertes escomptés

Aucune évaluation des dégâts et des pertes causés par les houles cycloniques n'a été menée jusqu'à présent dans l'archipel des Tuamotu, les efforts se concentrant en effet sur l'aide d'urgence et sur l'assistance à apporter aux habitants afin qu'ils puissent retrouver une vie normale. C'est pourquoi on ne dispose d'aucune donnée officielle permettant d'estimer le préjudice entraîné par les houles cycloniques.

Les dommages les plus visibles sont ceux occasionnés aux infrastructures, ainsi que la dégradation ou la destruction des habitations, des routes, des bâtiments publics et des entreprises. Il faut aussi prendre en considération les victimes, la perte de moyens de subsistance et les problèmes persistants liés à la perturbation des services offerts (hôpitaux et centrales électriques notamment). Faute de temps, il n'a pas été possible de quantifier l'ensemble de ces éléments.

Description des bénéfices quantifiés dans la présente analyse

Dégâts causés aux bâtiments

En fonction de son ampleur, la houle cyclonique peut dévaster des zones plus ou moins vastes et densément peuplées. Grâce aux modèles de houle cyclonique et aux photographies aériennes, il est possible de déterminer le nombre de bâtiments qui seraient détruits ou endommagés[6], ainsi que leur superficie (en m²). On peut ensuite estimer le coût de la destruction des constructions concernées.

[6] L'analyse ne porte que sur les dommages et les destructions provoqués par la profondeur et la vitesse d'inondation due à la houle cyclonique en tant que telle. Les dégâts causés par le vent ou toute autre forme de dégâts ne sont pas pris en compte.

Aux fins de l'analyse, un rapport d'ingénierie indépendant a été réalisé afin de fournir une évaluation des dégâts susceptibles d'être occasionnés aux divers types de bâtiments en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m, en fonction de la cartographie des risques (Worley Parsons, 2013). Cette étude technique a en outre permis de recalculer les niveaux de risque en cas d'édification d'une digue capable de réduire la force de la houle de 25 %, de 50 % et de 75 % (informations détaillées à consulter dans Worley Parsons, 2013). Le Tableau 10 présente les dommages moyens que subiraient probablement les bâtiments en cas de houle cyclonique majeure, en pourcentage de leur valeur. Il s'agit des chiffres retenus dans la présente analyse pour quantifier les dégâts.

Tableau 10 : Dégâts que subiraient probablement les bâtiments, par catégorie de risque, en cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m.

		Description de la catégorie		Dégâts moyens causés aux constructions (en pourcentage de la valeur des constructions)		
Catégorie définie par la Polynésie française	Nouvelle catégorie définie en vue d'affiner l'analyse[7]	Profondeur	Vitesse	Béton (aucune surélévation)	Béton (surélévation à 1 m)	maison en kit MTR (surélévation à
1	1	profondeur < 0,5	vitesse < 0,5	0,045	0,02	0,02
2	2a	profondeur < 0,5	0,5 ≤ vitesse	0,045	0,02	0,02
2	2b	0,5 ≤ profondeur < 1	vitesse < 0,5	0,02	0,02	0,02
3	3a	0,5 ≤ profondeur < 1	0,5 ≤ vitesse	0,11	0,02	0,02
3	3b	1 ≤ profondeur	vitesse < 0,5	0,185	0,12	0,12
4	4	1 ≤ profondeur	0,5 ≤ vitesse	0,575	0,51	0,51

Worley Parsons (2013).

Description des bénéfices non quantifiés

Bien que toutes les pertes dues aux houles cycloniques ne soient pas prises en compte dans la présente analyse préliminaire, il n'en demeure pas moins important de les évoquer. Les principaux éléments susceptibles d'être affectés sont décrits ci-après. D'autres études plus approfondies pourraient être conduites afin de quantifier les pertes subies par les secteurs concernés pendant et après un cyclone. Toute réduction des pertes engendrée par la mise en œuvre d'une solution d'adaptation pourra alors être ajoutée aux autres avantages d'ores et déjà comptabilisés.

Dégâts causés aux biens ménagers

À la suite d'un cyclone, les habitants peuvent s'adresser aux autorités afin d'obtenir une indemnisation financière pour leurs biens de première nécessité détruits. Le Colonel Maxence Jouannet, du Haut-Commissariat, a communiqué la valeur indicative des biens en question en se référant à la situation lors du cyclone Oli survenu en 2010 (communication personnelle de décembre 2012). Les données transmises permettent d'estimer la valeur des principaux articles que l'on s'attend à trouver dans un ménage classique de quatre personnes aux îles du Vent (parmi lesquelles figure notamment Tahiti), aux Australes et aux îles Sous-le-Vent. Les sept biens ménagers pris en compte sont les suivants : un réfrigérateur, un congélateur, une cuisinière, un lave-linge, quatre lits, une armoire pour quatre personnes, ainsi qu'une table et des chaises pour quatre personnes. Aux îles du Vent, ces marchandises valaient 705 000 XPF, contre 885 000 XPF aux Australes et aux îles Sous-le-Vent.

Un ménage se compose en moyenne de 3,7 personnes. Bien évidemment, seul un nombre entier est possible dans la réalité, mais dans le cadre d'une analyse statistique, on peut calculer la valeur des articles pour un ménage représentatif de 3,7 membres à partir des chiffres donnés. Sur les sept biens retenus, seul le nombre de lits, de vêtements et de chaises devrait changer en fonction des ménages dont la taille varie légèrement. Les chiffres sont corrigés afin de calculer les dépenses engendrées pour un ménage représentatif comprenant 3,7 membres, au lieu de quatre personnes.

Dans les faits, les coûts de remplacement de biens ménagers de ce type, coûts qui sont compensés par le gouvernement, dépendent vraisemblablement de l'isolement de l'île et de sa distance avec Tahiti (le port international et centre économique de la Polynésie française). Le prix des marchandises aux îles du Vent (les plus proches de Tahiti) est inférieur à celui sur les autres îles considérées dans le cadre de l'étude. La distance séparant Tahiti de Rangiroa est assez similaire à celle entre Tahiti et les Australes. De plus, Rangiroa comme les Australes bénéficient d'une desserte aérienne et maritime. C'est pourquoi les prix des biens en vigueur aux Australes sont utilisés par analogie à Rangiroa.

[7] Aux fins de l'analyse des dégâts, de nouvelles catégories ont été définies à partir de celles utilisées par la Polynésie française, afin d'évaluer de manière plus pointue l'impact de la houle cyclonique sur les constructions. Il est suggéré au gouvernement d'adopter ces nouvelles catégories dans ses futures études, afin d'améliorer la précision des estimations des dégâts.

Enfin, on peut supposer que les biens possédés par les ménages varient selon leurs revenus, et que les pertes occasionnées seront donc elles aussi différentes. En raison des contraintes de temps, il n'a pas été possible de recueillir de données sur les biens ménagers précis détenus par les habitants de Rangiroa. On suppose donc que les sept biens susmentionnés sont généralement présents dans tous les logements, la valeur moyenne des possessions des ménages étant alors probablement sous-estimée.

D'après les calculs, le coût total des sept articles pour un ménage représentatif de 3,7 personnes à Rangiroa est de 846 000 XPF (soit 5 528 XPF/m^2).

On considère que les biens ménagers seront endommagés si l'eau dépasse le niveau du plancher de l'habitation et, par conséquent, parvient à atteindre tout objet situé au sol.

Préjudice pour les entreprises

Outre les logements, les entreprises seraient elles aussi touchées. À Rangiroa, les trois principaux secteurs d'activité économique sont le tourisme, la perliculture et la production de coprah.

Tourisme

Le principal hôtel d'Avatoru, le Kia Ora, se compose de 66 bungalows et peut accueillir jusqu'à 120 clients. Il est doté de bâtiments imposants abritant sa réception, son restaurant et son bar. De plus, dix-sept chambres sont prévues pour le personnel. Au minimum 96 personnes travaillent sur place, 115 environ au maximum.

Bien que, d'après des représentants du Kia Ora, certains des bâtiments les plus solides puissent servir d'abri en cas de cyclone, si un tel phénomène survenait, les clients devraient être évacués ou trouver refuge dans le centre médical récemment construit ou dans les abris municipaux, conformément au nouveau plan d'urgence.

Ces dernières années, 25 bungalows ont été reconstruits dans le respect des normes anticycloniques. Ils sont surélevés de 60 cm et leurs piliers de fondation sont également enterrés sur 120 cm de profondeur. On peut supposer que les autres bâtiments seraient entièrement détruits en cas de cyclone.

Les hôtels et les maisons d'hôtes endommagés par une houle cyclonique connaîtraient certainement un manque à gagner après la catastrophe, jusqu'à ce que leurs bâtiments soient reconstruits et qu'ils soient de nouveau opérationnels.

Outre les dégâts qu'ils occasionnent aux bâtiments, les cyclones et les marées de tempête modifient souvent les plages, voire les dévastent. Certes, la transformation du littoral est un phénomène naturel[8], mais la disparition totale des plages de sable se répercuterait probablement sur l'activité touristique.

Perliculture

La perliculture a fortement décliné à Rangiroa au cours de ces dernières années. Alors que l'atoll comportait auparavant six à huit exploitations, il n'en compte plus que deux environ à présent.

Selon un chef d'entreprise de la filière, plus de 80 personnes travaillaient dans sa ferme il y a encore quelques années, contre 30 seulement aujourd'hui.

D'après lui, peu de dommages directs seraient causés aux huîtres, car celles-ci sont conservées à l'intérieur de cages dans le lagon. Ce sont les bâtiments et les ateliers à terre qui seraient principalement touchés, et quand bien même, leur remplacement ne serait pas si coûteux puisque la plupart de ces constructions sont de qualité médiocre et réalisées avec peu de moyens.

Aux Tuamotu, l'expérience montre que le naissain (les jeunes mollusques qui parviennent à maturité dans des lagons de plus petite taille) serait probablement emporté lors d'un cyclone, ce qui se répercuterait sur les autres fermes perlières qui seraient alors dans l'impossibilité de trouver le naissain nécessaire à leur production. Étant donné que Rangiroa ne possède qu'un vaste lagon où le naissain ne peut se développer, les exploitations sont toutes obligées de s'en procurer auprès d'atolls avoisinants moins grands. Si ces atolls étaient eux aussi touchés par la houle cyclonique, cela entraînerait une baisse de la production pendant un certain nombre d'années après le passage du cyclone, à moins que le naissain ne soit acheté dans des lagons indemnes.

Autre danger souligné par le chef d'entreprise, durant les mois qui suivent un cyclone, il n'est pas rare que des efflorescences algales se produisent dans les lagons, or certaines espèces de phytoplancton sont toxiques pour les huîtres perlières. La personne interrogée a toutefois précisé qu'un dépôt de matière organique avait été observé dans le lagon lors des dernières houles cycloniques, dépôt qui aurait peut-être été à l'origine de meilleures récoltes d'huîtres quelques années plus tard.

De manière générale, il est très difficile de quantifier les effets d'un cyclone sur les deux fermes perlières encore en exploitation à Rangiroa.

---

[8] Certains atolls comportent même des *motu* appelés « *Motu Tere One* », ce qui signifie « *motu* du sable qui s'en va ».

Production de coprah

Parmi tous les atolls, c'est à Rangiroa que la production de coprah est la plus importante. L'activité est rentable (avec un prix de vente de 140 XPF/kilo) et les emplois créés dans les plantations ont en outre permis de lutter avec succès contre le chômage. On peut imaginer qu'une houle cyclonique perturberait gravement la production du coprah à Rangiroa. En effet, le procédé consiste à attendre que les noix de coco tombent au sol, puis à les ramasser. L'intégralité d'une récolte pourrait ainsi être emportée par les flots.

Évaluer l'impact économique de la houle cyclonique sur la filière nécessiterait de recueillir des informations sur le volume de coprah produit à Rangiroa, ce qui pourrait être envisagé si une analyse approfondie était conduite.

Perturbation des services

Parmi les services de Rangiroa qui pourraient être perturbés à la suite d'une houle cyclonique figurent notamment l'alimentation électrique, les transports, les soins médicaux, l'enseignement et la desserte aérienne.

Outre l'ampleur des inondations et des dégâts causés aux bâtiments, l'approvisionnement électrique est déterminant pour le fonctionnement des hôpitaux, des écoles et de l'aéroport après le passage d'un cyclone. L'alimentation est assurée à l'aide d'un générateur appartenant à la principale compagnie d'électricité de Tahiti. À Rangiroa, près de 80 % de l'électricité est distribuée au moyen de câbles souterrains qui ne devraient pas être abîmés en cas d'inondation. Les 20 % restants passent par des lignes aériennes, et certaines seraient probablement détruites. C'est la compagnie d'électricité qui se charge de réparer tout dégât occasionné aux infrastructures électriques, sauf ceux survenus sur des terrains privés. Dans ce cas, c'est au propriétaire de décider s'il fait réinstaller les lignes sous terre ou en surface (une solution bien moins coûteuse). Certains habitants ont indiqué disposer de générateurs photovoltaïques, mais aucun dispositif de ce type n'a été observé durant la mission à Rangiroa. Aucune réserve de carburant n'a été endommagée lors des cyclones de 1983 et trois sociétés peuvent approvisionner l'atoll en essence.

Autres dégâts

Avant d'opter pour la mise en œuvre d'une solution d'adaptation, il est recommandé d'effectuer une analyse environnementale de la houle cyclonique, analyse qui sera mise en parallèle avec les résultats de l'étude d'impact environnemental réalisée pour chaque option considérée. Il serait essentiel de procéder ainsi si la construction d'une digue était envisagée.

Analyse quantitative des bénéfices

Il est important de comprendre que les bienfaits de chaque solution ne se feront concrètement ressentir qu'après la survenue de la catastrophe. Étant donné qu'il est impossible de savoir à quel moment l'événement se produira, il convient de calculer la valeur probable par an des dégâts provoqués par une houle cyclonique[9]. Puisque la probabilité annuelle de survenue de ce phénomène est de 2 %, la valeur probable des dommages par an correspond à 2 % du total estimé des dégâts que pourraient provoquer les houles cycloniques.

Les bénéfices sont calculés en appliquant un taux d'actualisation annuel de 10 %, afin que l'ensemble des futurs avantages soient convertis en valeurs courantes.

La valeur d'une maison retenue dans l'analyse des bénéfices est son coût de remplacement net[10].

Comme expliqué précédemment, le postulat est que les habitations en place à Rangiroa (option « aucune action ») sont des maisons de plain-pied en béton, dont l'âge se répartit de manière homogène sur un intervalle de un à cinquante ans.

Quelle que soit la solution d'adaptation adoptée, si des modifications sont apportées aux bâtiments, il convient alors d'utiliser la nouvelle valeur des ouvrages en question afin de quantifier tout dégât qui y serait causé.

Évaluation des dommages au regard de la situation actuelle (analyse « aucune action »)

En cas de houle cyclonique d'une hauteur significative de 12 m, le montant estimé des dégâts occasionnés aux bâtiments actuellement situés dans la zone d'étude s'élève à environ 2 864 951 883 XPF. Par conséquent, la valeur probable annuelle des dommages causés aux habitations est d'à peu près 57 299 038 XPF. Cette estimation est utilisée comme situation de départ et sert à déterminer dans quelle mesure chaque solution d'adaptation, une fois mise en œuvre, doit permettre de

[9] En termes économiques, la « valeur probable » par an des dégâts causés par une houle cyclonique correspond à la valeur totale estimée des dommages subis en cas de houle cyclonique, multipliée par la probabilité qu'une houle cyclonique survienne au cours d'une année donnée.

[10] Élément expliqué dans le rapport sur la méthode du moindre coût (Rios Wilks, 2013a).

réduire les pertes escomptées chaque année. Pour le calcul des dommages dans la configuration « aucune action », les habitations présentes à Rangiroa sont supposées être des constructions de plain-pied en béton, dont l'âge se répartit de manière homogène sur un intervalle de un à cinquante ans. Cela signifie que l'on note chaque année le même pourcentage de maisons de chaque âge, car au bout de 50 ans, les logements sont remplacés par de nouvelles habitations.

Bénéfices probables générés par chaque solution de réduction des risques (analyse « avec action »)

Nous nous intéressons à présent à la mesure dans laquelle chaque solution permet de réduire les dégâts et les pertes.

Digue (levée de protection)

Selon un rapport indépendant réalisé par une société d'ingénierie dans le cadre du présent projet (Worley Parsons, 2013), une digue permettrait de diminuer la vitesse de la houle cyclonique, sans toutefois limiter la profondeur d'inondation dans les habitations. Grâce à la réduction de la vitesse, certaines maisons seraient alors classées dans des catégories de risque inférieures, et une certaine atténuation des dégâts serait donc observée. La digue étant érigée durant la première année de l'analyse et perdurant sur l'ensemble de la durée d'étude, la réduction de la valeur probable des dégâts serait notable dès la première année et resterait la même tout au long des 50 années.

Étant donné qu'en l'absence de données supplémentaires, il est impossible de quantifier le degré de réduction de la vitesse de la houle, trois scénarios sont examinés à titre indicatif : diminution de la puissance de 0 %, de 25 % et de 75 %.

Maisons en kit (*fare* MTR)

La solution des maisons en kit (*fare* MTR) est préconisée, car elle est susceptible de réduire les dégâts occasionnés par une marée de tempête. Il s'agit en effet de structures surélevées respectant les normes anticycloniques.

Dans l'hypothèse d'une mise en œuvre immédiate, l'ensemble des maisons seraient remplacées dès la première année. Le nombre d'habitations MTR dans la zone ne varierait pas dans le temps, mais la valeur des dégâts évoluerait sur toute la durée de l'analyse. En effet, l'étude tient compte de la valeur annuelle réelle des bâtiments présents dans la zone, laquelle change (diminue) au fur et à mesure que les constructions vieillissent. Par exemple, la première année, lorsque toutes les habitations sont des *fare* MTR neufs, la valeur des logements est la plus élevée. Leur valeur se déprécie ensuite dans le temps, jusqu'au remplacement des habitations par de nouveaux *fare* MTR au bout de 20 ans, leur durée de vie utile.

La valeur des bâtiments selon leur âge est calculée à l'aide de la formule du coût de remplacement net détaillée dans le rapport relatif à la méthode du moindre coût (Rios Wilks, 2013). Dans les scénarios prévoyant une mise en œuvre progressive, puisqu'un nombre différent d'habitations serait remplacé par des *fare* MTR à divers moments sur l'ensemble de la durée d'étude (50 ans), la réduction des dégâts (bénéfices) évoluerait elle aussi dans le temps. Ce facteur est pris en compte dans la présente analyse.

Si aucune maison en kit n'était construite (option « aucune action »), les logements actuels (supposés être en béton et sans étage) continueraient d'être utilisés et devraient être remplacés au terme de leur durée de vie utile durant la période considérée. Or, une fois les maisons en kit adoptées, il ne serait plus nécessaire de procéder au remplacement des bâtiments actuels, et les sommes correspondantes devraient être comptabilisées comme une économie ou un bénéfice. Comme expliqué précédemment dans la partie sur les hypothèses, à des fins d'illustration, on estime que les maisons en place à Rangiroa sont des constructions de plain-pied en béton, et sont réparties de manière homogène sur une échelle d'âge de zéro à cinquante ans. Cela veut dire que dans le scénario « aucune action », chaque année, 2 % des maisons atteindraient l'âge de 50 ans et devraient être reconstruites. Avec la solution *fare* MTR, comme les habitations en béton ne seraient plus entretenues, les frais connexes seraient économisés et, partant, considérés comme un bénéfice.

Le total des bénéfices escomptés chaque année correspond à la somme des bénéfices examinés ci-dessus.

Surélévation des bâtiments

La surélévation devrait permettre de réduire les dégâts occasionnés grâce à la diminution du niveau d'inondation dans les bâtiments.

Comme pour l'option *fare* MTR, l'analyse des dommages tient compte de l'âge des constructions à différents moments sur l'ensemble de la durée d'étude ainsi que du nombre de maisons surélevées chaque année dans le cas des scénarios prévoyant une mise en œuvre progressive.

Si les maisons n'étaient pas surélevées (option « aucune action »), les habitants continueraient de supporter les coûts liés au remplacement des habitations non surélevées au terme de leur durée de vie utile. Le fait d'opter pour la surélévation des logements permettrait de ne pas avoir à assumer les coûts de remplacement, qui seraient alors considérés comme un

bénéfice (l'analyse prend en considération l'intégralité des coûts de reconstruction associés aux *fare* MTR[11]).

Le total des bénéfices escomptés chaque année correspond à la somme des bénéfices examinés ci-dessus.

Zone de retrait

Comme pour les autres options, l'analyse des dégâts tient compte de l'âge des constructions à différents moments sur l'ensemble de la durée d'étude ainsi que du nombre de maisons abandonnées chaque année, et dont les habitants sont relogés, dans le cas des scénarios prévoyant une mise en œuvre progressive.

Si aucune zone de retrait n'était mise en place (option « aucune action »), les habitants continueraient de supporter les coûts liés au remplacement des habitations au terme de leur durée de vite utile dans la zone en question. Grâce à l'instauration d'une zone de retrait, les coûts de remplacement n'auraient pas à être assumés (l'analyse prend en considération les coûts de relogement associés à la zone de retrait).

Le total des bénéfices escomptés chaque année correspond à la somme des bénéfices examinés ci-dessus.

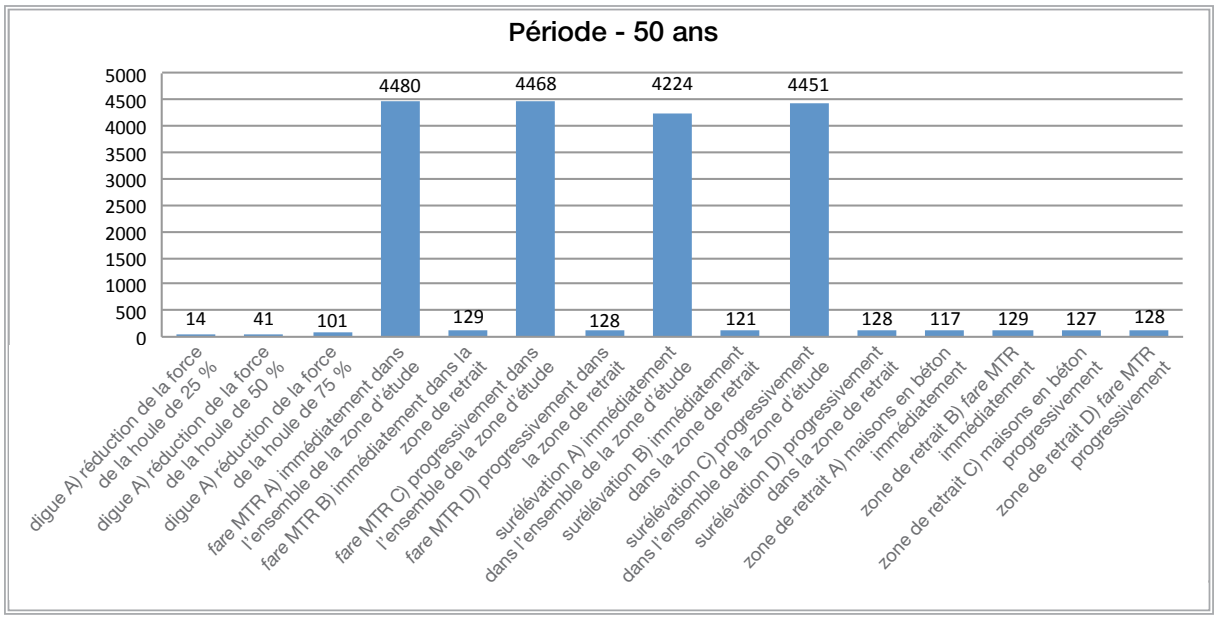

Figure 13 : Valeur actualisée totale des bénéfices attendus au terme de la période de 50 ans (en millions de XPF).

Résultats relatifs aux bénéfices

La valeur totale des bénéfices qui devraient être générés par chacun des quinze scénarios d'adaptation est calculée pour chaque année considérée. Comme pour la partie relative aux coûts, un taux d'actualisation de 10 % est appliqué aux avantages escomptés chaque année, de manière à refléter les préférences temporelles.

La Figure 13 présente la valeur actualisée totale des bénéfices attendus pour chaque scénario d'adaptation au terme de la période de 50 ans sur laquelle porte l'analyse.

Sur la figure ci-dessus, on constate que les bénéfices des bâtiments surélevés (rehaussement de maisons en béton ou utilisation d'habitations MTR) sont nettement supérieurs à ceux d'une digue (même lorsque la levée est censée réduire la puissance de la houle cyclonique de 75 %) et aux gains retirés de l'instauration d'une zone de retrait. Les bénéfices générés par la mise en place d'une zone rouge sont faibles, car les catégories de risque à l'intérieur de la zone de retrait sont très similaires aux catégories auxquelles appartiennent les bâtiments situés sur le reste de l'atoll. Cela s'explique probablement par le fait que l'ensemble de l'atoll se trouve peu ou prou à la même altitude. Par conséquent, faire déménager les habitants hors de la zone de retrait ne contribuerait guère à l'atténuation des dégâts.

[11] Le document relatif à la méthode du moindre coût (Rios Wilks, 2013a) contient des informations complètes sur les coûts utilisés dans la présente analyse.

6 ANALYSE BÉNÉFICE-COÛT GLOBALE

Valeur actualisée nette

La valeur actualisée nette de chaque scénario d'adaptation (valeur actualisée des bénéfices moins valeur actualisée des coûts) est calculée pour chaque année. Les chiffres sont ensuite additionnés afin d'obtenir les valeurs actualisées nettes cumulées associées à chaque scénario à différents moments sur l'ensemble de la période d'étude (50 ans). Les valeurs actualisées nettes cumulées correspondent au bénéfice global que doit retirer la société une fois chaque solution mise en œuvre depuis 1, 10, 25 et 50 ans.

Tableau 11 : Valeurs actualisées nettes cumulées pour chaque scénario à différents moments dans le temps (en millions de XPF).

Scénario d'adaptation		1re année (mise en place)	10e année	25e année	50e année
Digue (levée de protection)	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 25 %	- 6 721	- 6 714	- 6 710	- 6 773
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 50 %	- 6 719	- 6 697	- 6 685	- 6 745
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 75 %	- 6 713	- 6 660	- 6 630	- 6 686
Édification immédiate de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	- 17 586	- 15 267	- 16 551	- 16 560
	Zone de retrait uniquement	- 504	- 437	- 474	- 474
Édification progressive de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	47	326	271	- 60
	Zone de retrait uniquement	1	9	8	- 2
Surélévation immédiate 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	- 10 016	- 10 345	- 10 462	- 10 466
	Zone de retrait uniquement	- 287	- 296	- 300	- 300
Surélévation progressive 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	- 28	- 186	- 268	- 289
	Zone de retrait uniquement	- 1	- 5	- 8	- 8
Instauration immédiate de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	- 2 494	- 2 434	- 2 398	- 2 387
	Relogement dans des *fare* MTR	- 2 427	- 2 360	- 2 396	- 2 396
Instauration progressive de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	- 38	- 260	- 384	- 419
	Relogement dans des *fare* MTR	- 37	- 251	- 376	- 421

Seule la mise en œuvre progressive de *fare* MTR permet de générer un bénéfice global (chiffres en gras), et même dans les deux cas correspondants, les pertes globales commenceraient à être plus importantes que les gains vers la fin de la période d'étude.

Rapport bénéfice-coût

Le rapport bénéfice-coût permet aux décideurs d'avoir une idée des gains qu'ils devraient retirer de chaque franc dépensé en faveur d'un scénario d'adaptation.

Dans la présente analyse, il est calculé comme suit : total du flux actualisé de bénéfices divisé par le total du flux actualisé de coûts sur la période d'étude (50 ans). La Figure 14 présente le rapport bénéfice-coût de chaque scénario d'adaptation. Un taux d'actualisation de 10 % est systématiquement appliqué.

Compte tenu de la similarité entre les différents rapports, il est plus instructif de consulter les informations détaillées du Tableau 12, dans lequel les solutions sont classées de la plus efficace (numéro 1) à la moins efficace (numéro 15).

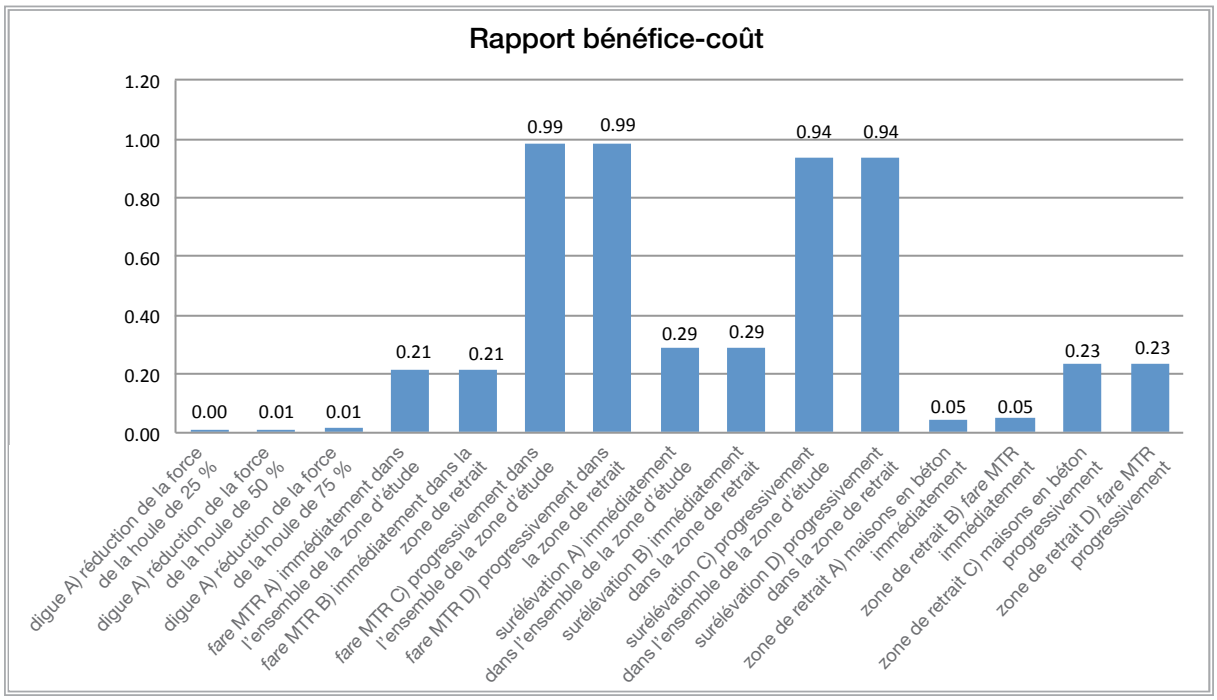

Figure 14 : Rapport bénéfice-coût pour chaque scénario au terme de la période d'étude de 50 ans.

Tableau 12 : Rapport bénéfice-coût pour chaque scénario au terme de la période d'étude de 50 ans.

Scénario d'adaptation		Rapport bénéfice-coût (avec un taux d'actualisation de 10 %)	Classement
Digue (levée de protection)	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 25 %	0,0021	15
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 50 %	0,0061	14
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 75 %	0,0149	13
Édification immédiate de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,2129	10
	Zone de retrait uniquement	0,2134	9
Édification progressive de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,9867	2
	Zone de retrait uniquement	0,9874	1
Surélévation immédiate 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,2876	5
	Zone de retrait uniquement	0,2874	6
Surélévation progressive 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,9391	4
	Zone de retrait uniquement	0,9396	3
Instauration immédiate de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,0469	12
	Relogement dans des *fare* MTR	0,0512	11
Instauration progressive de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,2326	8
	Relogement dans des *fare* MTR	0,2334	7

Dans la présente analyse préliminaire, aucune stratégie ne permet d'obtenir un rapport bénéfice-coût supérieur à un. Cela signifie que pour chaque franc dépensé en faveur d'actions d'adaptation, les bénéfices retirés seront inférieurs à un franc. Dans le cas de la digue, par exemple, quand bien même un mur de 5 m permettrait de réduire de 75 % la force de la houle cyclonique (d'une hauteur significative de 12 m), le rapport bénéfice-coût ne serait que de 0,015 XPF, c'est-à-dire que pour chaque franc dépensé, 1,5 centime seulement serait engrangé en contrepartie.

Les solutions d'adaptation présentant le meilleur rapport bénéfice-coût escompté sont celles prévoyant l'édification progressive de *fare* MTR. C'est la mise en place progressive d'habitations MTR dans la zone de retrait uniquement qui génère le rapport le plus élevé. En effet, dans ce scénario, chaque franc dépensé doit permettre d'obtenir en retour 0,9874 XPF, soit environ 99 centimes. Quant au rapport bénéfice-coût relatif à l'instauration progressive de *fare* MTR dans l'ensemble de la zone d'étude, il serait légèrement inférieur (0,9867).

Les autres options qui procurent un rapport bénéfice-coût approchant celui obtenu pour les scénarios « édification progressive de *fare* MTR » sont celles prévoyant la surélévation progressive de maisons en béton 1 m au-dessus du sol.

Lorsque seule la diminution des dégâts occasionnés aux bâtiments est prise en considération dans les bénéfices, aucune stratégie ne permet de générer un rapport dépassant l'unité. Néanmoins, si l'on prenait en compte la réduction estimée des dommages causés aux biens ménagers dans les deux scénarios les plus intéressants (mise en place progressive des *fare* MTR dans la zone de retrait uniquement/dans l'ensemble de la zone d'étude), le rapport bénéfice-coût enregistré pourrait être supérieur à un. C'est ce qui est examiné dans la partie ci-après sur l'analyse de sensibilité.

Analyse de sensibilité

Prise en compte de la réduction des dégâts causés aux biens ménagers

Les biens ménagers sont endommagés par les inondations. Si la vague n'atteint jamais le niveau du plancher d'un *fare* MTR (1,5 m), on peut alors supposer que les articles ne subiront que des dégâts limités. Grâce aux données relatives aux inondations, il est possible de déterminer les endroits où l'eau ne dépassera pas 1 m, un niveau nettement inférieur au plancher d'une construction MTR. Dans la zone de retrait, la profondeur d'inondation est ainsi inférieure à 1 m pour 58 % des bâtiments, contre 59 % dans l'ensemble de la zone d'étude. Si les dégâts causés aux biens se trouvant dans les bâtiments concernés étaient minimes, des bénéfices supplémentaires seraient alors engrangés : 32 148 000 XPF environ pour la solution « zone de retrait » et 1 122 642 000 XPF pour le scénario « ensemble de la zone d'étude » sur les 50 années que doivent durer les projets. Une fois ces montants ajoutés aux avantages liés à la réduction des dommages, on obtient des rapports bénéfice-coût de respectivement 1,041 et 1,040 pour l'édification progressive de *fare* MTR dans la zone de retrait et la construction progressive de *fare* MTR dans l'ensemble de la zone d'étude.

Dans le cas des scénarios prévoyant une surélévation progressive des maisons en béton 1 m au-dessus du sol (à savoir les deux seules autres solutions pour lesquelles le rapport se rapproche du chiffre 1), l'atténuation des dégâts occasionnés aux biens ménagers serait certainement moins importante que celle obtenue grâce aux scénarios *fare* MTR. En effet, la surélévation des maisons en béton est envisagée à 1 m au-dessus du sol, contre 1,5 m pour les *fare* MTR.

Quant aux solutions pour lesquelles aucune surélévation n'est prévue (digue et zone de retrait), non seulement leur rapport bénéfice-coût est nettement inférieur à celui des options « édification progressive de *fare* MTR », mais aucune réduction des dommages aux biens ménagers n'est non plus attendue. En effet, dans ces scénarios, l'ensemble des maisons seraient probablement inondées.

La mise en place progressive de *fare* MTR dans la zone de retrait uniquement et la construction progressive d'habitations MTR dans l'ensemble de la zone d'étude sont donc considérées comme les solutions les plus intéressantes.

De plus, outre le fait que les scénarios « édification progressive de *fare* MTR » obtiennent les meilleurs rapports bénéfice-coût et sont probablement ceux grâce auxquels les dégâts causés aux biens ménagers seraient les plus réduits, il s'agit également des seules stratégies d'adaptation qui font appel à des structures anticycloniques. Comme précisé précédemment dans le rapport, les *fare* MTR sont décrits comme étant « anticycloniques », ce qui veut dire qu'ils peuvent résister à des vents allant jusqu'à 204 km/h.

Taux d'actualisation

Compte tenu du débat toujours ouvert concernant le taux d'actualisation à utiliser dans une analyse bénéfice-coût, les rapports bénéfice-coût ont également été calculés en appliquant des taux de 3 % et de 7 %. On peut ainsi comparer le classement de chaque scénario d'adaptation en fonction du taux d'actualisation employé (3 %, 7 % et 10 %).

Tableau 13 : Rapports bénéfice-coût et classement des scénarios d'adaptation selon leur taux d'actualisation.

Scénario d'adaptation		Rapport bénéfice-coût (taux d'actualisation de 10 %)	Classement	Rapport bénéfice-coût (taux d'actualisation de 7 %)	Classement	Rapport bénéfice-coût (taux d'actualisation de 3 %)	Classement
Digue (levée de protection)	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 25 %	0,0021	15	0,0027	15	0,0044	15
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 50 %	0,0061	14	0,0081	14	0,0130	14
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 75 %	0,0149	13	0,0198	13	0,0319	13
Édification immédiate de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,2129	10	0,2565	8	0,3306	8
	Zone de retrait uniquement	0,2134	9	0,2571	7	0,3315	7
Édification progressive de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,9867	2	0,9021	4	0,7535	4
	Zone de retrait uniquement	0,9874	1	0,9029	3	0,7545	3
Suréléva-tion immédiate 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,2876	5	0,3545	6	0,4990	6
	Zone de retrait uniquement	0,2874	6	0,3545	5	0,4997	5
Suréléva-tion progressive 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,9391	4	0,9404	2	0,9429	2
	Zone de retrait uniquement	0,9396	3	0,9410	1	0,9439	1
Instauration immédiate de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,0469	12	0,0646	12	0,1200	11
	Relogement dans des *fare* MTR	0,0512	11	0,0677	11	0,1108	12
Instauration progressive de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,2326	8	0,2327	9	0,2329	9
	Relogement dans des *fare* MTR	0,2334	7	0,2288	10	0,2189	10

Lorsqu'un taux d'actualisation de 10 % est appliqué, le scénario présentant le meilleur rapport bénéfice-coût est la construction progressive de *fare* MTR dans la zone de retrait. Si le gouvernement utilise un taux d'actualisation de 10 %, c'est l'édification progressive de *fare* MTR qui devrait permettre d'engranger les bénéfices les plus importants pour chaque franc dépensé. Toutefois, si seuls les dégâts causés aux bâtiments sont pris en compte dans l'analyse des bénéfices, les coûts demeurent légèrement supérieurs aux gains retirés de la mise en œuvre de cette solution d'adaptation.

Lorsque des taux d'actualisation de 3 % et de 7 % sont appliqués, la mise en place progressive de *fare* MTR devient moins rentable, car ce type d'habitat doit être remplacé relativement plus souvent, ce qui accroît la proportion de coûts supportés à l'avenir pour cette solution. Si des taux d'actualisation inférieurs sont utilisés, les coûts supportés dans le futur deviennent plus importants. Le meilleur rapport bénéfice-coût est alors celui associé à la surélévation progressive des bâtiments dans la zone de retrait, ceux-ci devant être remplacés moins fréquemment. Cette évolution du classement entre les solutions « édification progressive de *fare* MTR » et « surélévation progressive » est mise en exergue dans le Tableau 14.

Quel que soit le taux d'actualisation retenu, ce sont systématiquement les options assorties d'une mise en place progressive et prévoyant le rehaussement du plancher des bâtiments (« surélévation progressive » ou « édification progressive de *fare* MTR ») qui engendrent, et de loin, les meilleurs rapports bénéfice-coût.

Néanmoins, dans la présente analyse préliminaire où sont uniquement pris en compte les dégâts causés aux bâtiments, les coûts l'emportent toujours sur les bénéfices. C'est pourquoi, avant que les autorités n'envisagent de mettre en œuvre une ou plusieurs des options d'adaptation examinées en vue de la réduction des dégâts, il est préconisé de procéder à l'examen approfondi des solutions prévoyant la surélévation des bâtiments.

Frais de transport

Quelle que soit la solution d'adaptation choisie, les matériaux de construction ne seront pas disponibles sur l'atoll et devront être expédiés jusqu'à Rangiroa. D'après des données émanant de l'IEOM (ISPF, 2013a), les prix du carburant sont en hausse constante depuis quelque temps, avec une augmentation d'environ 20 % au cours des six dernières années (2006-2012).

Le Tableau 14 présente à titre indicatif les rapports bénéfice-coût dans le cas où les prix du carburant entraîneraient un accroissement de 10 % des coûts de mise en œuvre.

Tableau 14 : Rapports bénéfice-coût en cas de hausse de 10 % des coûts de mise en œuvre.

Scénario d'adaptation		Rapport bénéfice-coût (taux d'actualisation de 10 %)	Classement
Digue (levée de protection)	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 25 %	0,0019	15
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 50 %	0,0055	14
	Hypothèse retenue : atténuation de la force de la houle de 75 %	0,0135	13
Édification immédiate de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,1936	10
	Zone de retrait uniquement	0,1940	9
Édification progressive de *fare* MTR	Ensemble de la zone d'étude	0,8970	2
	Zone de retrait uniquement	0,8976	1
Surélévation immédiate 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,2614	5
	Zone de retrait uniquement	0,2613	6
Surélévation progressive 1 m au-dessus du sol	Ensemble de la zone d'étude	0,8537	4
	Zone de retrait uniquement	0,8542	3
Instauration immédiate de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,0426	12
	Relogement dans des *fare* MTR	0,0465	11
Instauration progressive de la zone de retrait	Relogement dans des maisons en béton	0,2114	8
	Relogement dans des *fare* MTR	0,2122	7

Certes, le classement resterait identique, mais on constate que même le scénario le plus rentable (édification progressive de *fare* MTR dans la zone de retrait) ne présenterait alors qu'un rapport bénéfice-coût de 0,898.

Taux de change

La devise utilisée en Polynésie française (XPF) est indexée sur l'euro (Veyroon, 2007). Au vu de la tendance actuelle à la baisse de l'euro, les importations depuis des pays tiers pourraient coûter plus cher, à moins que la devise des pays en question ne se déprécie elle aussi dans les mêmes proportions, voire davantage.

Hormis pour les *fare* MTR, les matériaux de construction sont accessibles dans le pays, ce qui devrait permettre d'éviter un tel accroissement des coûts. Toutefois, étant donné que les habitations MTR suggérées pour Rangiroa par le Fonds de développement des archipels proviendraient de l'étranger, les coûts associés à cette solution pourraient augmenter de manière considérable si l'euro demeurait faible.

Si on applique une hausse de 10 % des coûts à la solution *fare* MTR, même pour la méthode présentant le meilleur rapport bénéfice-coût (édification progressive de *fare* MTR dans la zone de retrait), le rapport diminuerait à 0,898, ce qui ferait alors de la surélévation progressive des maisons en béton situées dans la zone de retrait le scénario le plus rentable, avec un rapport de 0,94.

7 FAISABILITÉ ET INCIDENCES

Le présent document expose plusieurs stratégies d'adaptation que le gouvernement de la Polynésie française pourrait envisager de mettre en œuvre en vue de réduire les répercussions des houles cycloniques d'une hauteur significative de 12 m. Les scénarios correspondants ont été regroupés en quatre catégories : construction d'une digue, instauration d'une zone de retrait, surélévation des bâtiments 1 m au-dessus du sol, et remplacement des bâtiments par des *fare* MTR (maisons en kit).

Zone de retrait

Au vu de l'analyse, il apparaît que l'option « zone de retrait » en place à l'heure actuelle n'est pas la méthode d'adaptation la plus efficace face à la menace représentée par les houles cycloniques. Cette solution ne doit permettre d'obtenir qu'un gain de 0,23 XPF environ pour chaque franc dépensé, ce qui coûterait à la communauté quelque 400 millions de francs Pacifique sur les 50 années de la période d'étude. De plus, il sera extrêmement délicat de faire respecter des mesures interdisant aux habitants de vivre dans la maison qui leur appartient ou d'y réaliser des travaux. Étant donné qu'il est peu probable que les habitants disposent des fonds nécessaires pour acheter de nouveaux terrains et logements, puisqu'il leur sera impossible de vendre leur bien actuel, le gouvernement devrait peut-être envisager des indemnisations. Même si un dédommagement était accordé par les pouvoirs publics afin de compenser la perte de valeur des biens, l'acquisition de nouveaux terrains sur l'atoll devrait certainement là aussi poser problème. En effet, en règle générale, les terres appartiennent à des familles entières et sont transmises de génération en génération. Cela veut non seulement dire que les familles renâcleront probablement à vendre une partie de leurs terrains, mais que même si tous les membres d'une famille étaient d'accord pour céder des parcelles, il faudrait du temps avant que l'ensemble des documents juridiques puissent être signés par l'intégralité des intéressés, dont un grand nombre ne vit plus à Rangiroa. Compte tenu de l'ampleur des dommages escomptés si une houle cyclonique majeure frappait l'atoll, le fait de fournir à la population davantage d'informations sur la menace à laquelle elle est confrontée pourrait toutefois permettre d'assurer un meilleur respect de la réglementation.

Digue (levée de protection)

La digue ne constitue pas non plus une méthode d'adaptation efficace. Compte tenu de la forme de l'atoll, qui se compose d'une longue bande littorale habitée, la levée érigée entre les maisons et l'océan devrait s'étendre sur une distance considérable, ce qui serait coûteux à construire. De plus, un tel ouvrage ne permettrait de diminuer que de manière limitée la profondeur d'inondation dans les bâtiments et les infrastructures. Ces derniers, s'ils se trouvent au niveau du sol, subiraient alors des dégâts substantiels. Une autre question se pose : l'édification d'une digue côté océan permettrait-elle de réduire l'incidence de la surcote cyclonique côté lagon ? Si tel est le cas, c'est-à-dire si la surcote côté lagon est formée par le jet de rive pénétrant dans le lagon depuis l'océan, puis rebondissant côté lagon, la levée pourrait contribuer à limiter les marées de tempête des deux côtés. Dans le cas contraire, cette option ne permettrait pas d'atténuer le risque de dommages côté lagon.

Surélévation des bâtiments

Procéder à la surélévation immédiate des habitations est une solution assez onéreuse en raison du défi technique que représente le rehaussement de bâtiments déjà construits. Le spécialiste de la Direction de l'équipement consulté n'avait encore jamais entendu parler de tels travaux de surélévation sur des maisons existantes et a fait remarquer qu'une entreprise de ce type serait très certainement irréalisable (communication personnelle de décembre 2012).

La surélévation des maisons pourrait être une solution envisageable si elle était appliquée progressivement, lorsqu'il est de toute manière nécessaire de reconstruire les bâtiments. Faire en sorte que les habitations soient moins exposées aux inondations n'entraînerait alors qu'un surcoût relativement modeste (7 % du coût de la construction). Cependant, les maisons en kit répondent aux normes anticycloniques, sont elles aussi surélevées à 1,5 m de hauteur et sont moins chères à remplacer qu'une maison en béton. Par conséquent, de nombreux habitants estimeront probablement qu'un *fare* MTR est une solution plus judicieuse.

Maisons en kit (*fare* MTR)

Les *fare* MTR (maisons en kit) semblent offrir une protection contre les cyclones et, une fois surélevées, doivent permettre de réduire les effets des inondations. Certes, elles sont meilleur marché que les maisons en béton, mais leur durée de vie utile est plus courte, ce qui fait qu'elles devront certainement être remplacées plus fréquemment.

Recommandations

FD'après la présente analyse préliminaire, les seules catégories susceptibles de réduire de manière notable les dégâts sont celles prévoyant la surélévation du plancher des bâtiments (soit par la surélévation des constructions, soit par le recours à des *fare* MTR). Néanmoins, lorsque seule la diminution des dommages occasionnés aux bâtiments est prise en compte dans les bénéfices, le rapport bénéfice-coût obtenu pour les scénarios d'adaptation correspondants demeure inférieur à 1, ce qui signifie que les coûts seraient supérieurs aux gains en cas de mise en œuvre. Le gouvernement pourrait à présent envisager de conduire une étude plus approfondie, qui quantifierait les autres avantages retirés des solutions d'adaptation, notamment la réduction des dégâts causés aux biens ménagers et du préjudice économique subi à cause de l'état des bâtiments après une catastrophe. Une fois ces éléments supplémentaires comptabilisés, l'analyse pourrait montrer que ce sont les solutions d'adaptation prévoyant la surélévation progressive des bâtiments qui ont un effet positif global sur la société. Cela étant, il sera là encore peut-être difficile d'imposer de telles restrictions à la population, car il est peu probable que tous les habitants aient suffisamment d'argent pour acquérir directement une nouvelle maison. Par conséquent, l'adhésion au projet pourrait être favorisée si les autorités accordaient des subventions ou mettaient en place un dispositif de remboursement souple à l'appui de la mise en œuvre des solutions.

8 BIBLIOGRAPHIE

ASCE (2001) Underwater Investigations Standard Practice Manual. ASCE Manuals and reports on Engineering practice, Number 101

Australian Bureau of Meteorology and CSIRO (2011) Climate Change in the Pacific: Scientific Assessment and New Research. Volume 1: Regional Overview

Australian Broadcasting Corporation (2010) Cyclone Oli crosses French Polynesia. Published 5th Feb 2010. Available online at: http://reliefweb.int/node/344184

Avagliano, E. and Petit, J.N. (2009) Etat des Lieux sur les Enjeux du Changement Climatique en Polynésie Française. Ministry of Environment and UC Berkeley Gump Station. Available online at http://moorea.berkeley.edu/etat-des-lieux-changement-climatique-PF

Bateman, I. and Henderson, N. (1995) 'Empirical and public choice evidence for hyperbolic social discount rates and the implications for intergenerational discounting'. Environmental and Resource Economics. June 1995, Vol(5), Issue 4

British Broadcasting Company (2010) French Polynesia islands battered by Cyclone Oli. Published 5th Feb 2010. Available online at: http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/8497969.stm

Cruz Rambaud, S. and Muñoz Torrecillas (2006) 'Social Discount Rate: A Revision'. Anales de Estudios Económicos y Empresariales 2006, Vol 16

Damlamian, H. and Krüger, J (2013) 2D Coupled Hydrodynamic Spectral Wave Model of Rangiroa- The 1983 Orama –Nisha Tropical Cyclone. Sopac Division Data Release Report (PR166)

Damlamian, H., Krüger, J., Turagabeci, M. and Kumar, S (2013) Cyclone Wave Inundation Models for Apataki, Arutua, Kauehi, Manihi and Rangiroa Atolls, French Polynesia. Sopac Division Data Release Report (PR176)

Gabrié, C., You, H., Farget, P., (2006) État de l'environnement en Polynésie française 2006. Publication du Ministère du développement et de l'environnement de Polynésie française. Available online at: http://www.sprep.org/att/irc/ecopies/countries/french_polynesia/30.pdf

Gargominy, O. (2003) « Biodiversité et conservation dans les collectivités françaises d'outre-mer ». Collection Planète Nature. Comité français pour l'UICN, Paris, France. Available online at: http://www.uicn.fr/Biodiversite-outre-mer-2003.html

Geovoyages (undated) Web-article on Rangiroa. Available online at: http://www.geovoyages.net/pages_sites/poly_fra/rangiroa/rangiroa_2.html

Government of France (2010) Quatre jours après que le cyclone OLI sur Tubuai. Accessible online at: http://www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/original/PYF_TC_Oli_2010_damage_assessment.pdf

HM Treasury (undated) The Green Book. Appraisal and Evaluation in Central Government. Treasury Guidence. London:TSO. Available online at http://www.hm-treasury.gov.uk/data_greenbook_index.htm

Holland, P. (2008) An Economic Analysis of Flood Warning in Navua, Fiji. SOPAC Technical Report. Available online at: http://ict.sopac.org/VirLib/ER0122.pdf

IEOM (2008) La Polynésie française en 2007: Rapport Annuel. Available online at: http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2007_polynesie.pdf

IEOM (2011) La Polynésie française en 2010: Rapport Annuel. Available online at: http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2010_polynesie.pdf

IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4): The Synthesis Report. Available online at http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

ISPF (2007) Census of French Polynesia 2007: accessible online at http://www.ispf.pf/bases/Recensements/2007/SynthesesLocales.aspx

ISPF (2007a). Carte Des Quartiers 2000,- Recensement de la population de 2007. SPF and Institut National de la Statistique et des Études Économiques.

ISPF (2009) Projections de population pour la Polynésie française à l'horizon 2027, Points forts de la Polynésie française. Available online at: http://www.ispf.pf/bases/Repertoires/Etatcivil/Publications.aspx

ISPF (2013) Inflation Data. Available online at: http://www.ispf.pf/bases/Indices/Indicedesprixlaconsommation/DonneesIndiceGeneral.aspx

ISPF (2013a) Fuel Price Data. Available online at: http://www.ispf.pf/bases/Indices/Indicedesprixlaconsommation/DonneesIndicesDetailles.aspx

L'Institut d'Emission d'Outre-Mer (2008) La Polynésie française en 2007: Rapport Annuel. Available online at: http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2007_polynesie.pdf

L'Institut d'Emission d'Outre-Mer (2011) La Polynésie française en 2010: Rapport Annuel. Available online at: http://www.ieom.fr/IMG/pdf/ra2010_polynesie.pdf

Lonely Planet (2009) Tahiti and French Polynesia. 8th Edition. Lonely Planet Publications

Martin, K. (unpublished) Compensation Report on Compensation using Emergency Funds for Cyclone Oli. Received December 2012, French High Commission

Msubi (2011) Seawalls are no Match for Japan Tsunami. Retrieved online 8 April 2011 from: http://www.nippon-sekai.com/main/articles/great-east-japan-earthquake-of-2011/sea-walls-were-no-match-for-this-tsunami/

Onishi (2011) "Seawalls Offered Little Protection Against Tsunami's Crushing Waves". The New York Times. Retrieved online Feb 2013 at: http://www.nytimes.com/2011/03/14/world/asia/14seawalls.html?pagewanted=all&_r=0

Pacific Disaster Net. Available online at http://www.pacificdisaster.net/pdn2008/

PRISM, SPC (2012) Inflation rate in French Polynesia. Available online at http://www.spc.int/prism/cpi-annual-average-inflation

Radio New Zealand International (2010a) French Polynesia says Cyclone Oli caused about US$70 million damage. Published 17th Feb 2010. Accessible online at: http://www.pina.com.fj/index.php?p=pacnews&m=read&o=16050063544b7b62d0cc535b60983e&PHPSESSID=812237364012013677a1af539bc2dc21

Radio New Zealand International (2010b) Hundreds still homeless in French Polynesia following Cyclone Oli. Published 17th Feb 2010. Accessible online at: http://www.rnzi.com/pages/news.php?op=read&id=52000

Rheologic.net. available at http://rheologic.net/FieldTripPictorials/Tahiti-2002/tahiti-56-report-1.html)

Rios Wilks (2013) Preliminary Least Cost Analysis of Storm surge hazard mitigation in the Tuamotu Islands: deterministic quantification and inclusion of the hazard in future development planning. SPC SOPAC Published Report 170

Salvat, B., Aubanel, A., Adjeroud, M., Bouisset, P., Calmet, D., Chancerelle, Y., Cochennec N., Davies, N., Fougerousse, A., Galzin, R., Lagouy, E., Lo, C., Monier C., Ponsonnet, C., Remoissenet, G., Schneider, D., Stein, A., Tatarat, M. and Villiers, L. (2008) Le suivi de l'état des récifs coralliens de Polynésie Française et leur récente évolution. Revue d'Ecologie de la Terre et de la Vie, 63(1-2), 145-177. Accessible online at: http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/4558/

Sea Level Center (2005) 'Anomalies du niveau de la mer détectées par le marégraphe de Papeete (Polynésie Française) et de Nouméa (Nouvelle Calédonie) entre 1975 et 2005'. Available online at: http://onerc.org/listAllIndicators.jsf

The Tahiti Traveller (undated a) French Polynesia. Accessed December 2012:http://www.thetahititraveler.com/maps/fpoly.asp

The Tahiti Traveller (undated b) Rangiroa – Introduction and Map. Accessed December 2012: http://www.thetahititraveler.com/islandguide/rangiroaintro.asp

UNESCO (2011) Statistical Yearbook for Asia and the Pacific 2011. Accessed Feb 2013 at http://www.uis.unesco.org/Library/Documents/statistical-yearbook-asia-pacific-education-2011-en.pdf

UNOCHA (2010a) Update No.1 on Tropical Cyclone OLI. Published 2 February, 2010. Available online at: http://www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/original/COK_TC_OLI_2010_UNOCHA_update1.pdf

UNOCHA (2010b) Update No.2 on Tropical Cyclone OLI. Published 2 February, 2010. Available online at: http://www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/original/COK_TC_OLI_2010_UNOCHA_update2.pdf

UNOCHA (2010c) Update No.2 on Tropical Cyclone OLI. Published 3 February, 2010. Available online at: http://www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/original/COK_TC_OLI_2010_UNOCHA_update3.pdf

Veyrune, R. (2007) 'Fixed Exchange Rates and the Autonomy of Monetary Policy: The Franc Zone Case'. IMF Working Paper WP/07/34. Available online at: http://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2007/wp0734.pdf

Williams, G. (1978) Flood Proofing: A Component of Flood Damage Reduction Report Prepared by J. F. MacLaren Ltd. for Department of Fisheries and Environment, Gatineau, Canada, Available online at: http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/cbd/building-digest-198.html

Woodruff, A. (2008) Samoa Technical Report - Economic analysis of flood risk reduction measures for the lower Vaisigano catchment area. February 2008. EU EDF – SOPAC Project Report 69g. Reducing Vulnerability of Pacific ACP States, Available online at: http://ict.sopac.org/VirLib/ER0069g.pdf

Worley Parsons (2013) Building damage analysis in Rangiroa following a 1 in 50 year storm surge event, SPC SOPAC Division Published Report 169

SPC CPS

SECRETARIAT OF THE PACIFIC COMMUNITY

SECRÉTARIAT GÉNÉRAL DE LA COMMUNAUTÉ DU PACIFIQUE