

Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de l'île de la Réunion aux risques liés à la mer (1950-actuel)

V.K.E. Duvat, C. Salmon (LIENSs), A.K. Magnan (Iddri)

RENSEIGNER LE PASSÉ POUR INFORMER LE FUTUR

Analyser les principaux facteurs qui expliquent l'émergence, sur les dernières décennies, de la vulnérabilité des littoraux aux risques météo-marins est une manière pragmatique d'interroger les leviers et les obstacles à l'adaptation au changement climatique. C'est l'approche par les « trajectoires de vulnérabilité ».

UN CAS CONCRET D'ÉTUDE

Cette étude retrace les trajectoires de vulnérabilité de quatre communes littorales de l'île de La Réunion (Saint-Denis, Le Port, Saint-Paul et Saint-Pierre) aux problèmes d'érosion côtière et de submersion marine, de 1950 à aujourd'hui. Elle repose sur l'analyse de l'évolution de quatre indicateurs : la position du trait de côte, l'exposition des enjeux (bâti et infrastructures), la zone tampon terrestre naturelle (plages, dunes, végétation côtière) et la protection des enjeux (ouvrages de défense).

UNE VULNÉRABILITÉ CROISSANTE : L'IMPORTANCE DES PHÉNOMÈNES ANTHROPIQUES

Les résultats montrent des combinaisons de phénomènes relativement similaires d'une commune à une autre, à savoir d'une part, un recul du trait de côte et une urbanisation littorale croissante, ce qui favorise d'une part l'exposition du bâti et des routes (constructions de plus en plus près du rivage et dans des zones basses) et, d'autre part, une réduction de surface et une dégradation de la zone tampon terrestre naturelle, que l'homme tend à compenser par une fixation du trait de côte au travers d'ouvrages de défense. Cela démontre l'importante contribution des facteurs anthropiques à l'augmentation de la vulnérabilité des littoraux dans un contexte où les événements tempétueux intenses (fortes houles australes, cyclones tropicaux) sont relativement fréquents et intenses. La départementalisation en 1946, qui a encouragé le développement de l'île, et la forte croissance démographique qui l'a accompagné (260 000 habitants en 1950, 845 000 en 2014) ont joué un rôle majeur dans l'émergence (au Port, à Saint-Paul) et dans l'augmentation (Saint-Pierre, Saint-Denis) de la vulnérabilité des littoraux.

Copyright © 2016 Iddri

En tant que fondation reconnue d'utilité publique, l'Iddri encourage, sous réserve de citation (référence bibliographique et/ou URL correspondante), la reproduction et la communication de ses contenus, à des fins personnelles, dans le cadre de recherches ou à des fins pédagogiques. Toute utilisation commerciale (en version imprimée ou électronique) est toutefois interdite.

Sauf mention contraire, les opinions, interprétations et conclusions exprimées sont celles de leurs auteurs, et n'engagent pas nécessairement l'Iddri en tant qu'institution ni les individus ou les organisations consultés dans le cadre de cette étude.

☆☆☆

Citation : Duvat, V.K.E., Salmon, C., Magnan, A.K. (2016). Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de l'île de la Réunion aux risques liés à la mer (1950-actuel), *Studies* N°04/16, Iddri, Paris, France, 72 p.

☆☆☆

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-01.

☆☆☆

Les auteurs remercient la Fondation de France (convention n°00021940) et la Région Réunion (convention n°DGADD/2013 0210) pour leur soutien au projet VulneraRe, ainsi que le programme « Risque Décision Territoire » (RDT) du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer pour son soutien au projet Réomers.

☆☆☆

Pour toute question sur cette publication, merci de contacter: Alexandre K. Magnan – alexandre.magnan@iddri.org

ISSN 2258-7535

Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de l'île de la Réunion aux risques liés à la mer (1950-actuel)

V.K.E. Duvat, C. Salmon, A.K. Magnan

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	4-5
RÉSUMÉ	6
INTRODUCTION	7
1. CADRE CONCEPTUEL	9
2. RÉSULTATS PAR INDICATEUR	15
2.1. Évolution de la position du trait de côte	15
2.2. Évolution des enjeux humains dans la bande côtière des 100 m de 1950 à 2011	21
2.3. Évolution de l'exposition des enjeux humains de 1950 à 2011	28
2.4. Évolution des zones tampon terrestres naturelles	39
2.5. Évolution de la protection des enjeux	47
3. SYNTHÈSE GÉNÉRALE : FACTEURS D'INFLUENCE DES TRAJECTOIRES DE VULNÉRABILITÉ ET ANALYSE DES PROCESSUS ASSOCIÉS	50
3.1. Quelques éléments de méthode	50
3.2. Études de cas	51
3.3. Synthèse	65
4. CONCLUSION	69
RÉFÉRENCES	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des communes d'étude sur l'île de la Réunion.	8	Figure 24. Évolution de la surface bâtie en situation critique par commune entre 1950 et 2011	36
Figure 2. Modèle développé par Fazey <i>et al.</i> (2011) pour représenter le système socio- environnemental de la communauté de Kahua, îles Salomon	10	Figure 25. Évolution de la bande côtière à Grand Fond et Saint-Gilles, et notamment de l'exposition des enjeux en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude	37
Figure 3. Chronologies couplant les dynamiques environnementales et anthropiques qui s'opèrent à Bellona aux îles Salomon (Reenberg <i>et al.</i> , 2008)	12	Figure 26. Évolution de la bande côtière au centre-ville de Saint-Pierre et notamment de l'exposition des enjeux en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude	38
Figure 4. Exemple de sorties cartographiques possibles, à partir du cas de Tongafale, Tuvalu (Yamano <i>et al.</i> , 2007)	13	Figure 27. Évolution de la longueur du réseau routier en situation critique par commune entre 1950 et 2011	39
Figure 5. Reconstruction schématique des changements morphologiques à proximité du village de Tebunginako, atoll d'Abaiang, Kiribati (Webb, 2006)	14	Figure 28. Exemples d'unités morphologiques jouant le rôle de zone tampon à la Réunion.	41
Figure 6. Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol sur la flèche d'Eita-Bangantebure à Tarawa-Sud, district « capitale » de Kiribati (Duvat <i>et al.</i> , 2013)	14	Figure 29. À partir des indicateurs de trait de côte et de la limite des enjeux en dur (A), les zones tampons ont été créées (B)	42
Figure 7. Segmentation du littoral en 14 secteurs	16	Figure 30. Évolution de la surface et de la structure des zones tampons sur l'ensemble de la zone d'étude entre 1950 et 2011	42
Figure 8. Évolution de la position du trait de côte (pied de plage) entre 1950 et 2011. La moyenne et les valeurs min et max sont indiquées pour chaque secteur.	18	Figure 31. Évolution de la surface et de la structure de la zone tampon par commune entre 1950 et 2011	45
Figure 9. Évolution de la position du trait de côte (ligne de stabilité) entre 1950 et 2011. La moyenne et les valeurs min et max sont indiquées pour chaque secteur.	19	Figure 32. Évolution de l'indice de zone tampon par commune entre 1950 et 2011	46
Figure 10. Évolution du trait de côte par secteur et par période (N.B. : la longueur du linéaire varie légèrement en fonction des périodes)	20	Figure 33. Évolution de la zone tampon entre 1950 et 2011. Exemples de cas de figures rencontrés à : A) Saint-Denis ; B) Le Port ; C) La Saline-les-Bains (Saint-Paul) ; D) Saint-Pierre, à proximité du centre-ville.	47
Figure 11. Évolution de la surface bâtie par commune dans la bande côtière des 100 m entre 1950 et 2011	22	Figure 34. Évolution du linéaire côtier protégé par commune entre 1950 et 2011	49
Figure 12. Évolution de l'urbanisation du littoral de Saint-Denis entre 1950 et 2011	23	Figure 35. Évolution démographique de la commune de Saint-Denis de 1961 à 2012 (sources : Insee et Ehess)	52
Figure 13. Évolution de l'urbanisation de la commune du Port entre 1950 et 2011	25	Figure 36. Étude de cas : le littoral de la commune de Saint-Denis (secteur 1).	53
Figure 14. Évolution de l'urbanisation de la Baie de Saint-Paul entre 1950 et 2011	26	Figure 37. Étude de cas : le littoral de la commune du Port (secteurs 2.1 et 2.2)	55
Figure 15. Évolution de l'urbanisation du littoral de Saint-Pierre entre 1950 et 2011	27	Figure 38. Évolution démographique de la commune du Port de 1961 à 2012 (Sources : Insee et Ehess)	56
Figure 16. Degré d'exposition du bâti (en surface) aux aléas météo-marins en fonction de sa distance au trait de côte entre 1950 et 2011 sur l'ensemble de la zone d'étude	29	Figure 39. Étude de cas : la partie centre et sud de la baie de Saint-Paul (secteur 3.2).	57
Figure 17. Évolution de la surface bâtie située dans la bande côtière des 30 m par commune entre 1950 et 2011	29	Figure 40. Évolution démographique de la commune de Saint-Paul de 1961 à 2012 (Sources : Insee et Ehess)	58
Figure 18. Degré d'exposition des routes aux aléas météo-marins en fonction de leur distance au trait de côte, sur l'ensemble des communes étudiées entre 1950 et 2011	31	Figure 41. Étude de cas : le littoral autour de Boucan Canot (3.3 à 3.5).	59
Figure 19. Évolution de la longueur des réseaux routiers situés dans la bande côtière des 30 m par commune entre 1950 et 2011	31	Figure 42. Étude de cas : la station de Saint-Gilles les Bains (secteurs 3.6 et 3.7).	61
Figure 20. Degré d'exposition du bâti (en surface) aux aléas météo-marins en fonction de son altitude entre 1950 et 2011 sur l'ensemble de la zone d'étude	33	Figure 43. Étude de cas : la station de Saint-Gilles les Bains (secteurs 3.6 et 3.7).	62
Figure 21. Évolution de la surface bâtie située à moins de 3 m d'altitude par commune entre 1950 et 2011	33	Figure 44. Étude de cas : la station de la Saline les Bains (secteurs 3.8 et 3.9).	64
Figure 22. Degré d'exposition des routes (longueur du réseau routier en km) aux aléas météo-marins en fonction de leur altitude entre 1950 et 2011 sur l'ensemble de la zone d'étude	34	Figure 45. Évolution démographique de la commune de Saint-Pierre de 1961 à 2012 (Sources : Insee et Ehess).	65
Figure 23. Évolution de la longueur des réseaux routiers situés à moins de 3 m d'altitude par commune entre 1950 et 2011	35	Figure 46. Étude de cas : le littoral de Saint-Pierre centre (secteur 4.1).	66
		Figure 47. Niveaux de vulnérabilité des études de cas et trajectoires de vulnérabilité	67
		Figure 48. Contribution des différents critères dans l'évolution de la vulnérabilité des 7 études de cas et du modèle « Réunion » (ensemble des quatre communes d'étude)	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Longueur du réseau routier situé dans la bande côtière des 100 m	22
Tableau 2. Nature et évolution du bâti situé dans la bande côtière des 100 m par commune entre 1950 et 2011	24
Tableau 3. Évolution et rythme de l'urbanisation par commune entre 1950 et 2011	24
Tableau 4. Degré d'exposition du bâti aux aléas météo-marins (unités + surface bâtie) en fonction de sa distance au trait de côte par commune entre 1950 à 2011	30
Tableau 5. Degré d'exposition des routes aux aléas météo-marins en fonction de leur distance au trait de côte par commune entre 1950 et 2011	32
Tableau 6. Degré d'exposition du bâti (unités + surface bâtie) aux aléas météo-marins en fonction de leur altitude par commune entre 1950 et 2011	34
Tableau 7. Degré d'exposition des routes aux aléas météo-marins en fonction de leur altitude par commune entre 1950 et 2011	35
Tableau 8. Degré d'exposition du bâti (nombre d'unités et surface bâtie) en fonction de sa distance au trait de côte et de son altitude par commune entre 1950 et 2011	36
Tableau 9. Degré d'exposition des routes en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude par commune entre 1950 et 2011	39
Tableau 10. Évolution de la surface des zones tampons sur l'ensemble de la zone d'étude entre 1950 et 2011	43
Tableau 11. Évolution de la surface des zones tampons et vitesse des changements en ha/an par période.	43
Tableau 12. Évolution de la structure de la zone tampon par commune entre 1950 et 2011	44
Tableau 13. Évolution de la surface de la zone tampon par commune et par période	46

RÉSUMÉ

De nombreuses incertitudes pèsent sur les caractéristiques futures des composantes de la vulnérabilité au changement climatique, et d'une manière générale aux aléas naturels : l'exposition aux risques, la sensibilité des écosystèmes, la capacité d'adaptation des sociétés. Envisager une évaluation de la vulnérabilité future d'un territoire au changement climatique nécessite des connaissances solides sur l'évolution des facteurs climatiques mais aussi humains, car nos sociétés changent et changent vite. L'enjeu consiste alors à intégrer cette dimension évolutive des facteurs humains et pour ce faire, à interroger l'évolution de la vulnérabilité dans un passé récent (ici depuis 1950) pour ensuite informer le futur sur des bases de connaissances empiriques. L'approche par le « trajectoires de vulnérabilité », développée dans le projet VulneraRe, vise donc à identifier les principaux facteurs qui expliquent, sur le passé récent, l'émergence de la vulnérabilité de quatre communes de La Réunion (Saint-Denis, Le Port, Saint-Paul et Saint-Pierre), partant du principe que ces facteurs constituent également les leviers majeurs de l'adaptation au changement climatique. Dans un premier temps, une revue de la littérature montre que cette approche est innovante car elle n'est pas ou est peu développée, même si des études s'en approchent en analysant

les changements qui peuvent survenir dans une société. Dans un second temps, les résultats du projet VulneraRe sont présentés par indicateur (évolution de la position du trait de côte, évolution de l'exposition des enjeux, évolution de la zone tampon, évolution de la protection des enjeux) et par commune, afin d'avoir une idée des changements qui s'opèrent à la Réunion depuis 1950. Globalement, les phénomènes qui s'observent sur les communes étudiées sont les suivants : recul du trait de côte et urbanisation littorale, favorisant l'exposition du bâti et des routes (constructions de plus en plus près du rivage et dans des zones basses) ; réduction de surface et dégradation de la zone tampon (espace « naturel » littoral amortissant les impacts de la houle et du vent), fixation du trait de côte par des ouvrages de défense. Enfin, des études de cas ont été réalisées afin d'illustrer de manière plus précise les facteurs d'influence de la vulnérabilité. Un travail de carto-chronologie associant cartographie des changements et chronologie des aménagements-équipements et la construction graphique de trajectoires de vulnérabilité servent de support à ces études de cas.

Mots-clés : trajectoires de vulnérabilité ; risques liés à la mer ; zone tampon ; ouvrages de défense ; Réunion ; outre-mer ; îles tropicales

INTRODUCTION

L'analyse de la vulnérabilité au changement climatique est devenue une préoccupation majeure de la communauté scientifique au cours des deux dernières décennies, et un objet de préoccupation grandissant au sein de la société civile, des décideurs à diverses échelles de gouvernance aux praticiens de terrain. Un problème unanimement reconnu est l'existence d'incertitudes sur les caractéristiques futures et à une échelle fine des trois composantes de la vulnérabilité, telle qu'elle est définie par le Giec¹ : l'exposition aux risques (quels aléas frapperont quelles portions précises de territoire, à quels pas de temps et suivant quels rythmes ?), la sensibilité des écosystèmes (comment réagiront les milieux et les espèces aux forçages climatiques ?) et les capacités d'adaptation des sociétés (quels facteurs influent ? Vont-ils changer au cours des prochaines décennies ? Permettent-ils d'anticiper sur le temps long ?). Ces incertitudes questionnent les bases sur lesquelles on peut aujourd'hui parler de la vulnérabilité future d'un territoire en particulier. Une tendance dominante dans la littérature scientifique consiste à projeter l'état d'une société actuelle donnée dans des conditions environnementales modifiées par le changement climatique. Autrement dit, on tend à faire une photographie de la société présente, à la confronter à des modifications environnementales futures, et à en déduire un niveau de

vulnérabilité future. L'écueil est alors de ne pas tenir compte du fait qu'à l'échelle des projections climatiques (2050, 2070, 2100, par exemple), les sociétés présenteront elles-mêmes des caractéristiques différentes des sociétés actuelles. L'enjeu consiste alors à intégrer cette dimension évolutive des facteurs humains dans l'analyse de la vulnérabilité au changement climatique. La position adoptée dans ce texte, qui fait état d'une partie des résultats du projet de recherche VulnераRe², consiste non pas directement à se projeter dans le futur, mais à renseigner l'évolution de la vulnérabilité dans un passé récent (ici, depuis 1950) pour ensuite informer le futur sur des bases de connaissances empiriques. L'approche par les « trajectoires de vulnérabilité » vise donc à identifier les principaux facteurs qui expliquent, sur le passé récent, l'émergence de la vulnérabilité, partant du principe que ces facteurs constituent également les leviers majeurs de l'adaptation au changement climatique.

Ce texte présente les résultats de la reconstruction des trajectoires de vulnérabilité des littoraux de quatre communes de l'île de la Réunion (sud-ouest de l'océan Indien) : Saint-Denis, Le Port, Saint-Paul et Saint-Pierre (Figure 1). Il se concentre sur les littoraux bas, c'est-à-dire les côtes alluvionnaires et sédimentaires. La période couverte est 1950-2011 et définit des trajectoires dites « courtes », par opposition aux trajectoires « longues » également étudiées dans le projet VulnераRe et qui remontent au début du XIX^e siècle (Desarthe et Garnier, 2013 ; Magnan *et al.*, 2012). Ces trajectoires courtes ont été reconstruites sur la base de 5 indicateurs principaux utilisés pour évaluer la vulnérabilité actuelle, et qui concernent les aléas météo-marins (en particulier, l'érosion côtière et

1. Pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (www.ipcc.ch), la vulnérabilité est « le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation »

2. Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de la Réunion aux risques liés à la mer : renseigner le passé pour informer le futur.

Figure 1. Localisation des communes d'étude sur l'île de la Réunion.



la submersion marine), les enjeux côtiers (le bâti essentiellement), l'exposition des enjeux côtiers aux aléas météo-marins, les zones tampons terrestres « naturelles » (cordons sableux et alluvionnaires, systèmes plage-dune), et la protection des enjeux côtiers. Ces indicateurs ont été renseignés pour trois dates (1950, 1978 et 2011) pour chacune des communes, grâce notamment au traitement de photographies aériennes anciennes de l'Institut Géographique National (IGN, site Géoportail). Ces traitements ont ensuite été intégrés à une base de données géo-référencées réalisée sous ArcGis 10.2. Pour une description plus détaillée de la démarche méthodologique, voir le guide méthodologique élaboré par Duvat et Salmon (2015a).

Ce rapport constitue un document d'accompagnement de l'Atlas de la vulnérabilité des littoraux aux risques liés à la mer (Duvat et Salmon, 2015b) qui a été lui aussi produit dans le cadre du projet VulneraRe. Il est structuré en trois grandes parties.

La partie 1 présente une analyse de la littérature scientifique qui s'intéresse aux dimensions temporelles de la vulnérabilité aux aléas naturels, et littoraux en particulier. Elle permet notamment de mettre en avant le caractère innovant de l'approche par les « trajectoires de vulnérabilité » restituée ici. La partie 2 analyse ces trajectoires à partir des cinq des indicateurs précédents, pour lesquels il a été possible de collecter des données pour des pas de temps anciens (1950 et 1978). Il s'agit donc d'une restitution relativement

descriptrice des résultats du projet VulneraRe indicateur par indicateur :

- synthèse sur l'évolution de la position du trait de côte ;
- évolution du nombre d'enjeux humains dans la bande côtière des 100 m, afin de mettre en évidence la contribution de l'évolution de l'occupation du sol aux trajectoires de vulnérabilité ;
- évolution de l'exposition de ces mêmes enjeux aux aléas météo-marins en fonction de leur distance au trait de côte, de leur altitude, et du croisement de ces deux variables ; (iv) évolution des zones tampons terrestres « naturelles » situées au-devant de ces enjeux ; et (v) évolution de la protection des enjeux, en l'occurrence des ouvrages de défense massifs puisqu'ils sont les seuls à pouvoir être appréhendés à partir des photographies aériennes anciennes.

Enfin, la partie 3 traite des trajectoires de vulnérabilité d'une manière plus analytique. Elle expose 6 cas concrets reflétant des situations à la fois représentatives et contrastées à partir de l'analyse combinée des facteurs précédents, de sorte à faire émerger des trajectoires d'ensemble. Cette partie 3 s'achève en discutant, sur un mode comparatif, ces différentes trajectoires de vulnérabilité. La conclusion rassemble ces 6 trajectoires de vulnérabilité au travers d'une discussion sur le rôle des différents facteurs en jeu dans l'évolution de la vulnérabilité

entre 1950 et 2011 : d'un cas à un autre, un ou plusieurs facteurs dominants émergent-ils, et quelles spécificités locales peuvent être repérées ? Répondre à cette question, sur la base d'analyses empiriques, est fondamentale pour ensuite se tourner vers le futur et identifier des leviers d'actions concrets pour engager des démarches d'adaptation au changement climatique. Cette ouverture vers le futur ne sera pas traitée dans ce rapport et fait l'objet d'un document spécifique³.

1. CADRE CONCEPTUEL

De nombreuses études ont pour but d'évaluer la vulnérabilité d'un territoire à un instant « *t* », à partir de l'analyse d'indicateurs naturels et/ou anthropiques (Noble *et al.*, 2014). Si ces évaluations permettent d'identifier les zones, secteurs ou populations les plus vulnérables, elles ne permettent ni l'analyse approfondie des facteurs qui contrôlent la vulnérabilité, ni l'appréhension de leur évolution dans le temps. Dans ces conditions, il apparaît difficile, voire spéculatif, de prévoir comment la vulnérabilité de telle ou telle portion de côte, par exemple, sera affectée par le changement climatique. Se projeter dans le futur nécessite de déterminer les tendances évolutives futures les plus probables de ces facteurs de vulnérabilité et de leurs interactions. Seule cette approche dynamique, si elle repose sur des connaissances empiriques solides, permettra de dégager des actions concrètes pour renforcer la résilience d'un territoire et promouvoir son adaptation au changement climatique. Cette première partie vise, à partir d'exemples tirés de la littérature scientifique, à expliquer l'intérêt d'appréhender une approche la vulnérabilité de manière dynamique, en dressant un état de l'art des méthodes et outils déjà utilisés, et des principaux résultats obtenus.

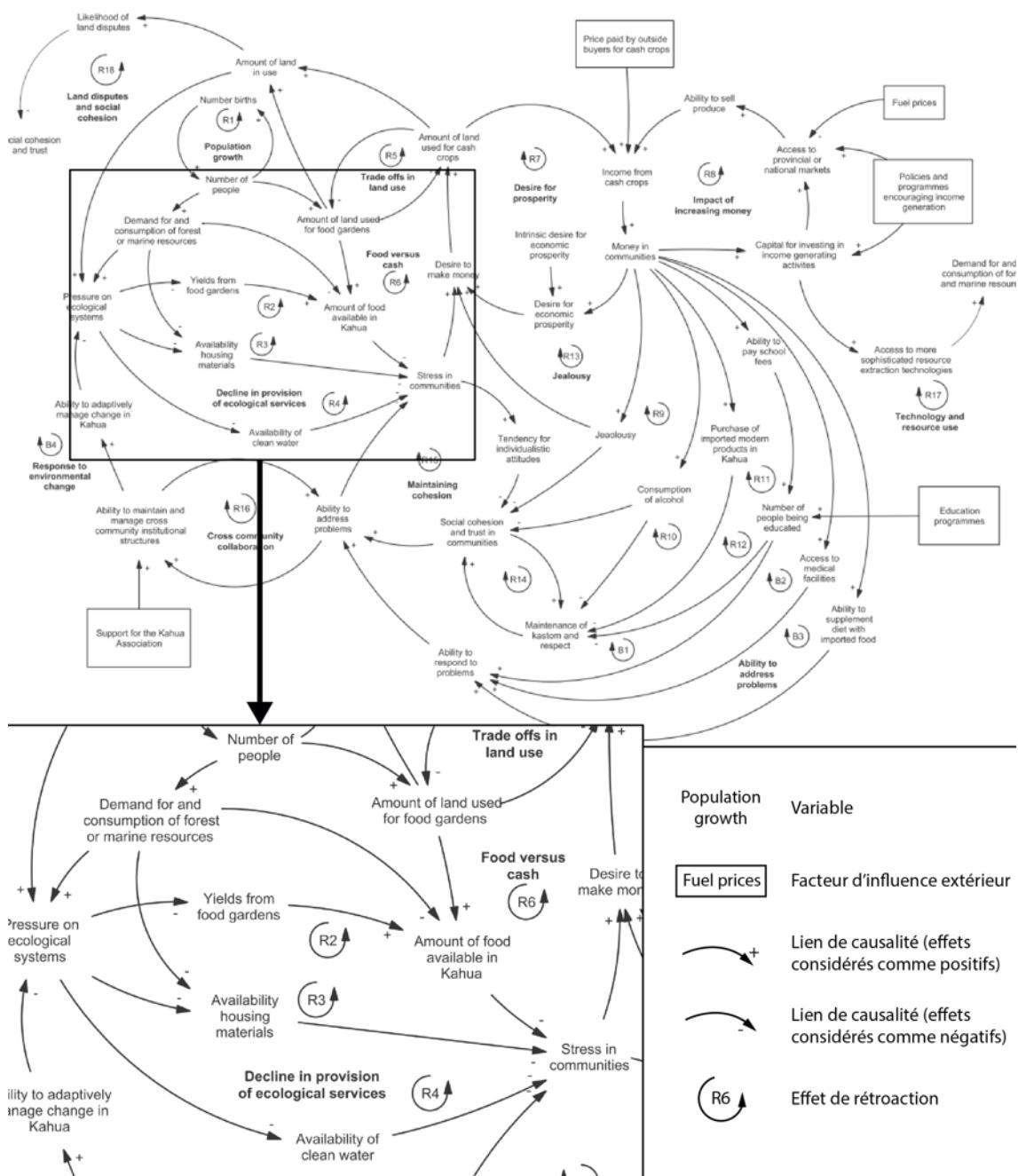
Un premier constat est que l'état de l'art sur cette approche dynamique de la vulnérabilité, qui fait référence à l'idée développée ici de « trajectoires de vulnérabilité », reste relativement limité. Néanmoins, certaines études s'en rapprochent en étudiant les changements qui ont opéré sur un territoire et qui expliquent la vulnérabilité actuelle. Ils offrent un premier regard sur les facteurs d'influence de la vulnérabilité. Compte tenu du domaine d'application du projet VulneraRe, qui est résolument littoral, nous nous concentrerons ici sur les études qui ont porté sur les côtes et sur les îles.

3. Magnan, A.K., Duvat, V.K.E (2016). Trajectoires de vulnérabilité et adaptation au changement climatique à la Réunion, Iddri, *Policy Brief* N°08/16.

Les sciences sociales, qui prennent de plus en plus d'ampleur aujourd'hui dans l'analyse de la vulnérabilité, font généralement appel aux enquêtes, entretiens et « focus groups », techniques qui permettent de recueillir de précieuses informations sur les modes de vie des communautés exposées, et donc sur les racines sociales de la vulnérabilité. Fazey *et al.* (2011) par exemple, ont analysé les changements récents qui affectent la communauté de Kahua aux îles Salomon. Suite à la réalisation de « focus groups » pour identifier les changements perçus par la population, ils ont pu développer un modèle théorique visant à expliquer précisément les processus en jeu et leurs interactions (Figure 2). L'augmentation de population que connaît cette communauté entraîne une augmentation des besoins (en terres pour cultiver ou en ressources marines et forestières). Ainsi, une pression de plus en plus forte s'exerce sur les milieux naturels et certaines ressources se raréfient, telles que l'eau, ce qui crée des tensions au sein de la communauté et favorise des comportements individualistes affaiblissant à terme la cohésion sociale. D'autres facteurs, notamment extérieurs, contribuent à expliquer cette baisse de cohésion sociale, comme l'apparition des revenus monétaires : un désir de prospérité et de réussite économique s'est installé dans les esprits, et une concurrence et des tensions ont émergé au sein des villageois. Mais le modèle montre également les effets positifs que l'apparition de revenus monétaires a produits, en termes d'accès aux services de soin et d'éducation notamment. Même si cette approche ne porte pas sur les risques liés à la mer et le changement climatique, elle permet de comprendre le jeu des facteurs explicatifs des changements dans l'accès aux ressources et les conditions de vie, et apporte par là même des éléments de compréhension majeurs sur la trajectoire de vulnérabilité de la communauté étudiée.

D'autres travaux, en se basant sur des connaissances sociologiques, historiques et parfois même archéologiques, cherchent à construire des modèles théoriques sur la relation entre les sociétés et les pressions et menaces qu'elles subissent (le changement climatique, par exemple). L'idée est de parvenir à renseigner les crises contemporaines à partir d'une analyse des dynamiques passées, en remontant plus ou moins loin dans le temps. Par exemple, Orlove (2005) a analysé les réponses de sociétés ancestrales face à des contraintes environnementales, en étudiant les cas des Mayas en Amérique Centrale et des Vikings au Groenland. Il a ainsi montré que l'influence de l'homme sur l'environnement est ancienne et qu'elle a déjà été à l'origine de grandes crises pour ces sociétés. Malgré un environnement relativement contraignant

Figure 2. Modèle développé par Fazey *et al.* (2011) pour représenter le système socio- environnemental de la communauté de Kahua, îles Salomon



(peu fertile ici), la civilisation Maya a réussi à rayonner pendant plusieurs siècles sur une partie de l'Amérique centrale. L'essor s'est produit surtout au début de la période dite classique (environ 250-900 après J.-C.) avec une croissance démographique forte, la construction de villes et de pyramides, l'extension de l'agriculture et enfin la mise en place d'un système d'irrigation et de stockage d'eau élaboré. Mais peu à peu les grands centres

urbains ont été abandonnés et la population a décrue. Les enregistrements sédimentologiques ont permis de révéler l'importance de la déforestation et de l'érosion des sols, ainsi que des épisodes de sécheresse de plus en plus importants. Combinés à des pressions sociales internes et au déclin de l'État voisin de Teotihuacan, avec lequel existaient des échanges majeurs, ces facteurs ont contribué à la disparition de la civilisation Maya. Quant aux

Vikings, ils se sont installés au Groenland – dans un environnement isolé et très rude – et ont vécu de l'élevage et de la chasse pendant une vingtaine de générations jusqu'à la fin du XIV^e siècle avant de disparaître. Des correspondances avec l'exemple précédent ressortent, puisqu'un ensemble de facteurs variés ont contribué à leur disparition : des traces de surpâturage et d'érosion des sols ont été relevées, des tensions avec les populations indigènes ont vu le jour, les échanges commerciaux avec l'Europe ont cessé, et les paléoclimatologues nous indiquent que les hivers sont devenus de plus en plus froids au cours du XIV^e siècle.

Ces exemples montrent non seulement que des fluctuations climatiques peuvent menacer l'existence de sociétés, mais également que les sociétés elles-mêmes influencent leur environnement à l'échelle locale en ne laissant généralement pas le temps à la nature de se régénérer. Ils sont intéressants, mais présentent des limites pour appréhender ce que doit être l'adaptation aujourd'hui, comme le souligne d'ailleurs Orlove : la complexité des situations prises en exemples (divisions sociales fortes, modifications environnementales et sociétales variées, etc.) rend difficile l'établissement d'une corrélation entre la variabilité climatique et l'adaptation de ces sociétés historiques, puisqu'il nous est impossible de dire quelles actions d'adaptation ont été tentées, et si ces actions ont eu à un moment donné des effets bénéfiques. Sans compter, par ailleurs, qu'il est vain de vouloir comparer les solutions déployées par des sociétés différentes à des époques différentes.

D'autres travaux reposent sur l'utilisation des statistiques pour mesurer, par exemple, les changements de densité et de répartition de la population, de conditions de vie et d'organisation de l'économie. Ces travaux montrent, comme d'autres (Cardona *et al.*, 2012 ; Duvat et Magnan, 2014), que ces changements ont une influence certaine sur la vulnérabilité des sociétés aux aléas météo-marins. La construction de frises chronologiques, notamment, permet d'inscrire dans le temps l'empreinte de différents facteurs qui ont pu influencer la trajectoire de vulnérabilité d'une société, comme dans les travaux de Reenberg *et al.* (2008), par exemple (Figure 3).

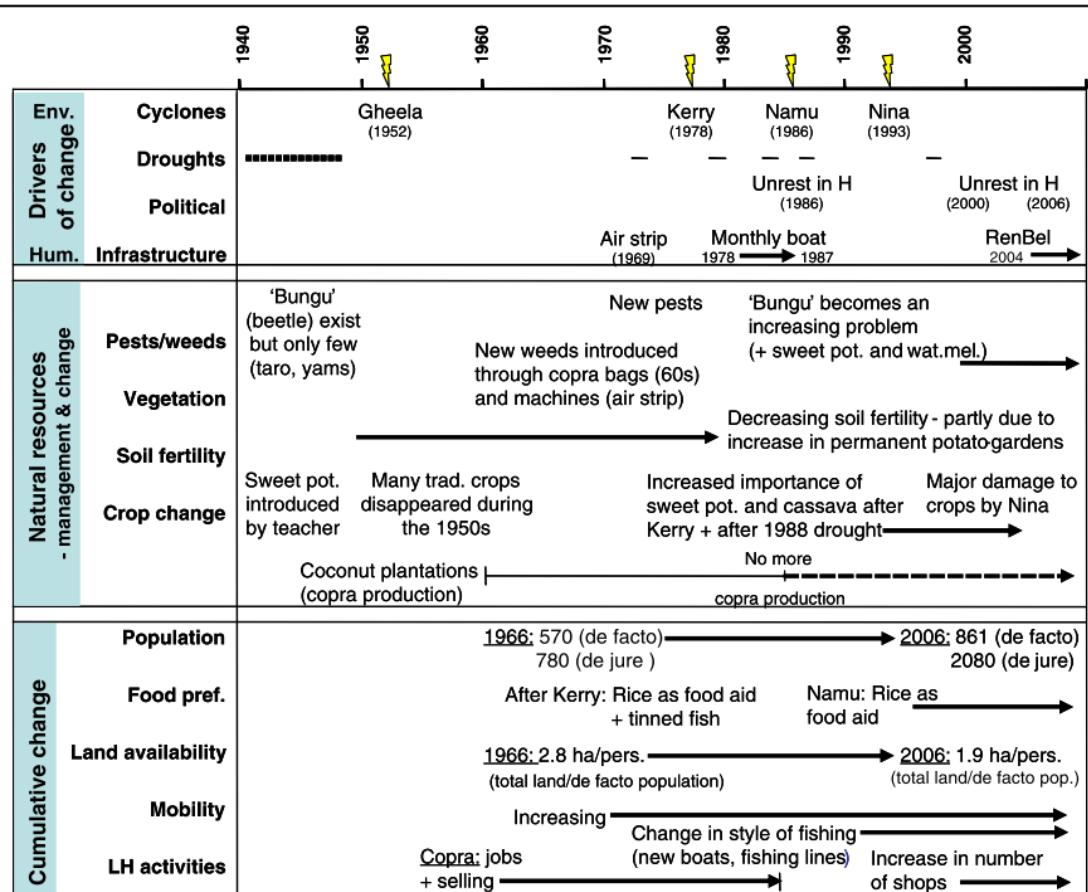
À partir de données provenant de sources variées (enquêtes auprès des foyers, focus groups, revue de la littérature, photo-interprétation et relevés terrain, étude historique), les auteurs ont construit ces frises thématiques qui permettent de mettre en perspective les événements. Des événements naturels ont frappé l'île de Bellona, notamment quatre cyclones depuis 1950, causant des dommages importants sur les habitations, les cultures ou encore les réserves d'eau. Des épisodes

de sécheresse ont pu précéder ou suivre un cyclone, aggravant ainsi la situation de vulnérabilité. Ensuite, ce sont des facteurs humains qui vont faire changer en profondeur la communauté de Bellona. L'île est reliée à la capitale par voie aérienne (1969), puis également maritime (1978), ce qui modifie les flux migratoires et favorise son intégration dans une économie plus mondialisée. Une partie des habitants quitte l'île et s'installe à Honiara, la capitale, pour améliorer ses conditions de vie mais des tensions ethniques dans les années 1980 et 2000 entraînent leur retour pour une grande partie d'entre eux. La population et la densité augmentent de manière importante, et quelques effets négatifs s'en font ressentir sur l'environnement, comme une baisse de la fertilité des sols à cause de leur surexploitation. Les pratiques évoluent : la part des cultures traditionnelles, comme le taro ou l'igname, dans l'alimentation baisse considérablement au profit du riz et des pâtes (alimentation plus sûre en cas de cyclone, car non sujette à la destruction), des emplois se créent (beaucoup de fonctionnaires : infirmiers, instituteurs, etc.). Néanmoins, les auteurs observent également des facteurs de continuité pendant cette période : la surface agricole reste stable, l'identité culturelle forte s'est maintenue et a permis à la communauté de s'adapter à ces changements (les liens restent forts entre la communauté présente à Bellona et les habitants d'Honiara, la capitale, qui leur apportent un soutien financier). Cet exemple illustre l'importance des interactions entre changements politiques, économiques et environnement, d'une part, et entre les phénomènes climatiques, le mode de vie et la vulnérabilité de la population, d'autre part.

L'analyse des photographies aériennes anciennes et des images satellites génère encore d'autres types de données, et elle nous apparaît être fondamentale pour reconstituer les changements passés d'un territoire et éventuellement les quantifier (taux d'évolution, évolution de surfaces, rythmes des changements, etc.). L'outil « système d'information géographique » (SIG) est alors essentiel en support à l'analyse. De nombreuses études utilisent ce matériau qui, par ailleurs, permet, en fonction des sites étudiés, de distinguer les dynamiques naturelles (évolution du trait de côte dans les milieux peu ou pas influencés par l'homme, par exemple) et anthropiques (évolution de l'occupation du sol et de l'aménagement du territoire, par exemple).

Certains de ces travaux s'attachent à analyser l'évolution des îles corallines, et notamment des îles basses des atolls du Pacifique et de l'océan Indien. Par exemple, Yamano *et al.* (2007) ont réalisé une étude sur l'évolution de l'exposition

Figure 3. Chronologies couplant les dynamiques environnementales et anthropiques qui s'opèrent à Bellona aux îles Salomon (Reenberg *et al.*, 2008)

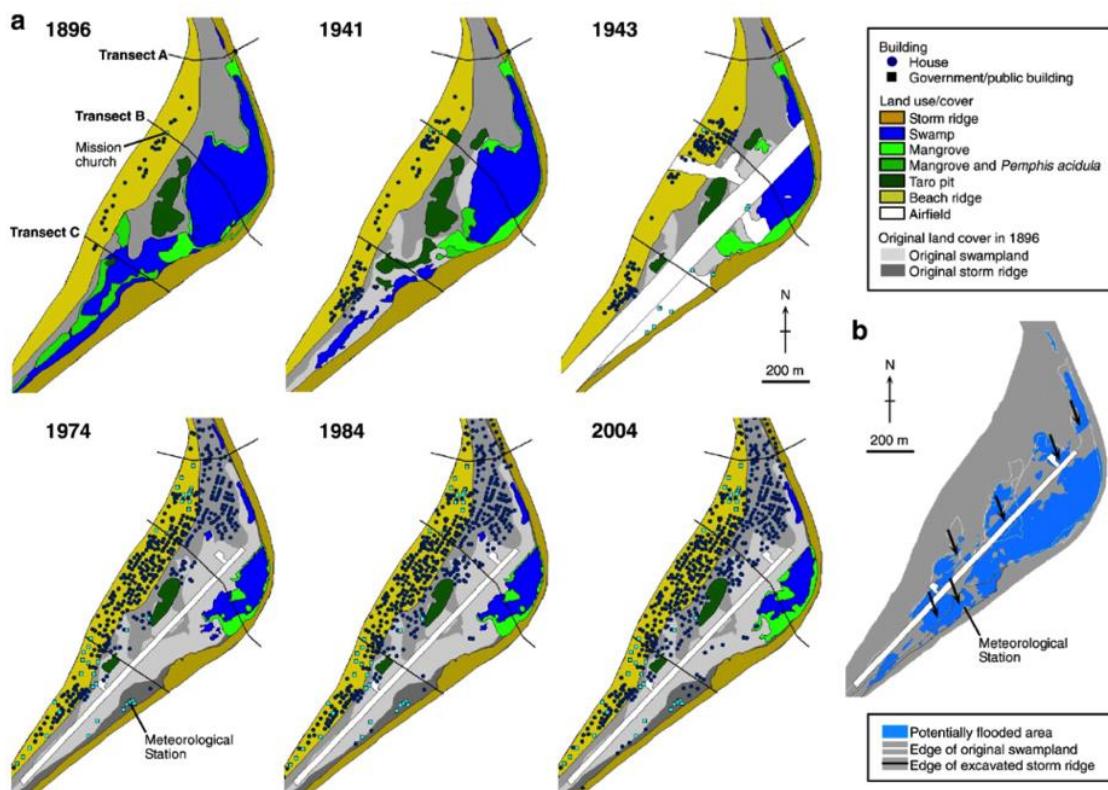


des enjeux dans l'archipel corallien de Tuvalu. Ils partent du constat que la zone centrale de l'île-capitale, Fongafale (située dans l'atoll de Funafuti), est régulièrement inondée du fait de sa très faible altitude pendant les grandes marées (« king tides »), situation qui interroge sur les impacts à attendre de l'élévation future du niveau de la mer. En reconstruisant l'évolution de la topographie et de l'occupation du sol depuis 1896, ils ont mis en évidence les changements morphologiques majeurs qu'a connus cet îlot et l'urbanisation récente de sa partie marécageuse centrale, en partie comblée avec des matériaux extraits sur les côtes depuis la construction d'une piste d'atterrissement en 1943. Ils ont également mis en exergue l'augmentation rapide de la population au cours des dernières décennies du fait de la combinaison de plusieurs facteurs : le déclin de l'activité minière dans les îles de Banaba et Nauru où de nombreux Tuvaluans travaillaient, l'indépendance de Tuvalu et de Kiribati en 1979, l'attractivité nouvelle de Fongafale en tant que capitale, etc. À partir de là, ils ont mis en évidence le rôle majeur des facteurs humains (forte concentration d'enjeux dans un espace exigu, situé

à très faible altitude et dont l'environnement est fortement dégradé et perturbé) dans l'augmentation de la vulnérabilité de cette île corallienne. La Figure 4 reproduit les séries cartographiques de Yamano *et al.* (2007) qui illustrent clairement cette trajectoire territoriale.

La SOPAC⁴, organisme qui apporte un appui scientifique aux États et territoires du Pacifique, a également utilisé l'outil SIG pour réaliser des diagnostics sur l'origine de situations de vulnérabilité. Webb (2006) a par exemple analysé l'évolution du village de Tebunginako dans l'atoll d'Abaiang à Kiribati. Ce village était présenté par les médias et le gouvernement de Kiribati comme le premier village déplacé à cause du changement climatique. Les travaux de Webb ont permis de reconstruire l'évolution morphologique du site, élément déterminant pour expliquer l'importance de l'érosion qui l'affecte. À partir de photographies aériennes anciennes, de relevés de terrain et de la réalisation d'entretiens auprès des anciens du village, il a

4. SOuth PACific Applied Geosciences Commission : <http://gsd.spc.int/>

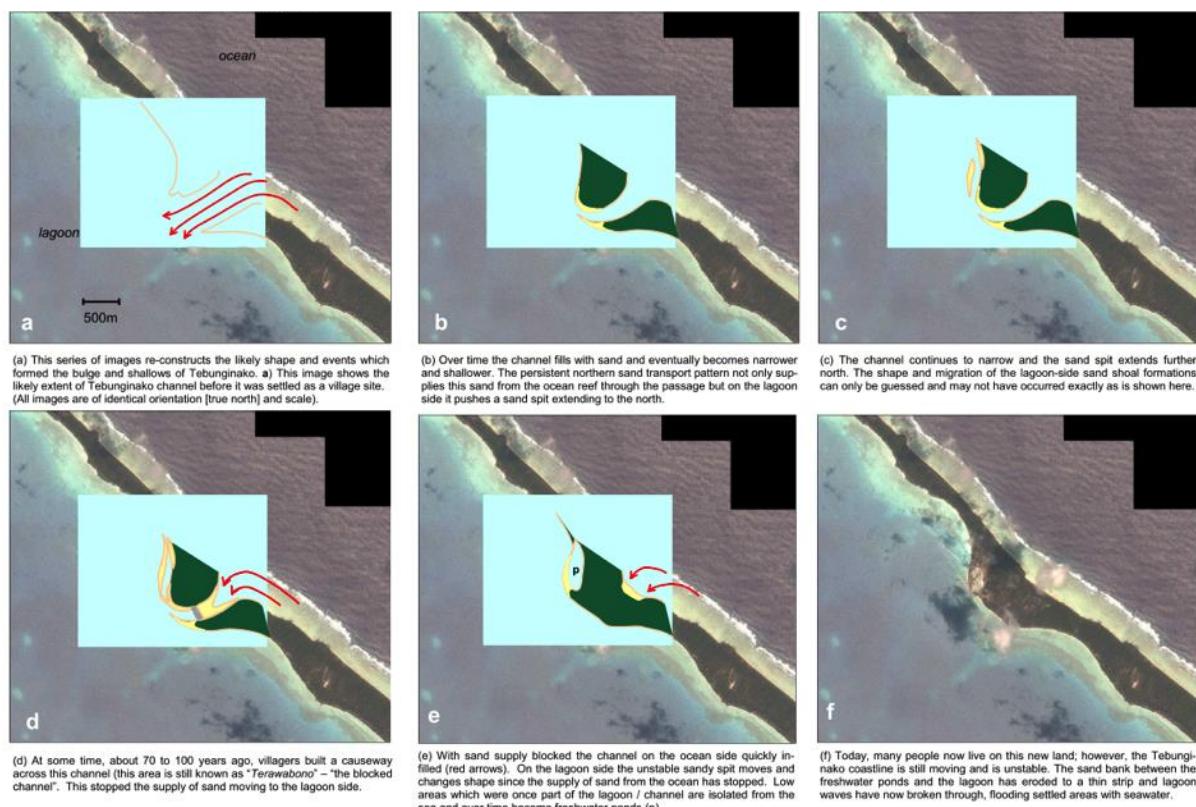
Figure 4. Exemple de sorties cartographiques possibles, à partir du cas de Fongafale, Tuvalu (Yamano *et al.*, 2007)

pu démontrer l'existence dans le passé, au sud du village, d'un chenal qui s'est récemment obstrué sous l'effet de l'accumulation de sédiments provenant de la côte océanique de l'atoll (Figure 5). Au résultat, le site lagunaire sur lequel le village de Tebunginako a été implanté n'a plus été alimenté en matériaux, ce qui y a déclenché une forte érosion. À cela, s'ajoute un autre facteur : alors que les maisons traditionnelles étaient constituées de matériaux légers (bois de cocotier et pandanus), et que la mobilité des communautés insulaires leur permettait de réduire leur vulnérabilité en cas de besoin, le béton a fait son apparition et de nouveaux bâtiments en dur ont été implantés (comme les églises) sur les côtes, ce qui nécessite leur protection par des ouvrages de protection. Cette évolution a marqué, pour ces communautés, la fin d'une vie « au rythme de la nature » consistant à déplacer les villages quand les conditions environnementales l'imposaient. Cette étude montre ainsi le rôle de l'évolution récente des modalités d'occupation de l'espace dans l'émergence de la situation de vulnérabilité actuelle. Sans ce type d'analyse, l'on pourrait croire que seul le facteur « changement climatique » est à l'œuvre aujourd'hui. Des travaux similaires ont été réalisés sur la flèche d'Eita-Bangantebure à Tarawa-Sud, atoll-capitale

de Kiribati (Duvat *et al.*, 2013). Ils mettent en avant la déstructuration de cette flèche sableuse, naturellement très mobile, par diverses activités anthropiques, notamment la déforestation de la mangrove, l'extraction de sable et de corail, la construction de remblais et d'ouvrages de défense, et l'extension du bâti dans des zones marécageuses (Figure 6). Les pressions et dégradations d'origine anthropique ont déclenché l'érosion sur la face lagunaire de cette flèche qui avait jusque-là progressé. Le recul du trait de côte a fini par engendrer l'ouverture par les vagues de deux brèches dans cette flèche, qui expliquent la submersion de zones basses habitées. C'est ce secteur qui est régulièrement pris en exemple par les médias pour illustrer les impacts du changement climatique, alors que des études comme celles de Duvat *et al.* (2013) démontrent que les facteurs anthropiques expliquent la vulnérabilité actuelle des habitants de ce secteur.

D'autres travaux s'intéressent à l'évolution du trait de côte (Webb et Kench, 2010 ; Ford, 2012 ; Ford, 2013, Biribo et Woodroffe, 2013 ; Ford et Kench, 2014) et cherchent à quantifier les processus, mais plus rarement à expliquer les changements. McLean & Kench (2015) proposent une revue des études existantes sur l'évolution

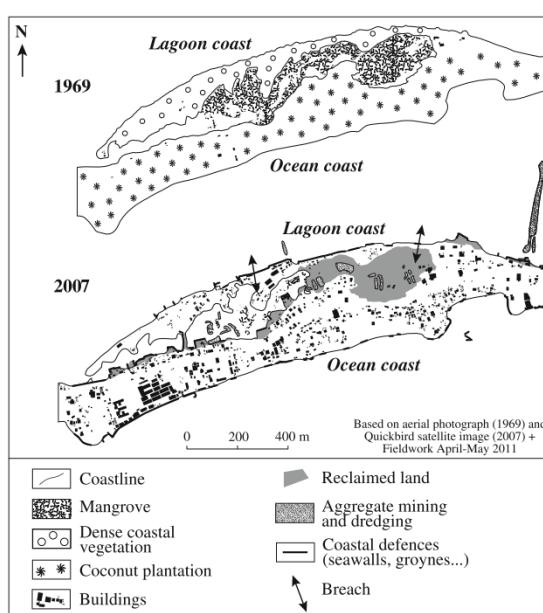
Figure 5. Reconstruction schématique des changements morphologiques à proximité du village de Tebunginako, atoll d'Abaiang, Kiribati (Webb, 2006)



de la surface des îles corallines des atolls de l'océan Pacifique au cours du dernier siècle, et démontrent, contrairement à une idée reçue, que l'élévation du niveau marin n'a jusque-là pas entraîné de perte de surface généralisée de ces îles qui annoncerait leur disparition. Si certaines connaissent des réajustements morphologiques importants, ces derniers n'affectent en rien leur superficie. Certaines ont d'ailleurs connu des gains de surface qui s'expliquent par la présence de trois conditions en particulier : 1) l'existence de réserves sédimentaires mobilisables par les vagues et les courants associés ; 2) un hydrodynamisme suffisant pour transférer des sédiments jusqu'à la côte ; 3) le maintien d'un espace libre de construction et « ouvert » (permettant les échanges sédimentaires) sur le platier récifal et le littoral pour que les matériaux se déposent et puissent s'accumuler. La connaissance de ces processus naturels est indispensable pour identifier l'origine d'une perturbation et favoriser la résilience du système considéré face à cette perturbation.

Mais ces territoires subissent également les effets de la modernisation et de l'occidentalisation. Les îles-capitales, « créées » récemment et ex-nihilo, font l'objet d'une forte attractivité :

Figure 6. Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol sur la flèche d'Eita-Bangantebure à Tarawa-Sud, district « capitale » de Kiribati (Duvat *et al.*, 2013)



comme les villages d'Europe de l'Ouest se sont vidés au profit des villes au cours des xix^e et xx^e siècles, les îles rurales des archipels de Kiribati et de Tuvalu, par exemple, tendent à se vider depuis quelques décennies (notamment depuis leur indépendance, qui date de 1979 dans le cas présent) au profit des îles-capitales (Tarawa-Sud à Kiribati et Fongafale à Tuvalu). Celles-ci concentrent désormais la plupart de la population et de l'activité (économique comme politique) du pays, et le boom démographique qu'elles ont connu depuis les années 1960-1970 s'est produit dans un contexte de « mal-développement » (Duvat *et al.*, 2013 ; Magnan *et al.*, 2013), qui a contribué à la dégradation forte des milieux et des conditions de vie. C'est ce processus de développement brutal dans un environnement très sensible aux pressions anthropiques qui explique la forte vulnérabilité actuelle de la population des îles-capitales.

Tous ces exemples proposent des échelles d'analyse – temporelles et spatiales – variées, certains dégageant des mécanismes généraux à partir de l'étude de l'effondrement des Mayas quand d'autres s'intéressent aux changements des dernières décennies. Ces différentes échelles d'analyse de la vulnérabilité s'appuient sur différents types de données. Les échelles temporelle et spatiale qui sont privilégiées sont aussi pour partie déterminées par l'existence de données fiables (séries de photographies aériennes, existence de cartes historiques, archives complètes, etc.), qui est variable d'un territoire à un autre. Plus on remonte dans le temps, moins les données sont en général complètes et précises.

2. RÉSULTATS PAR INDICATEUR

2.1. Évolution de la position du trait de côte

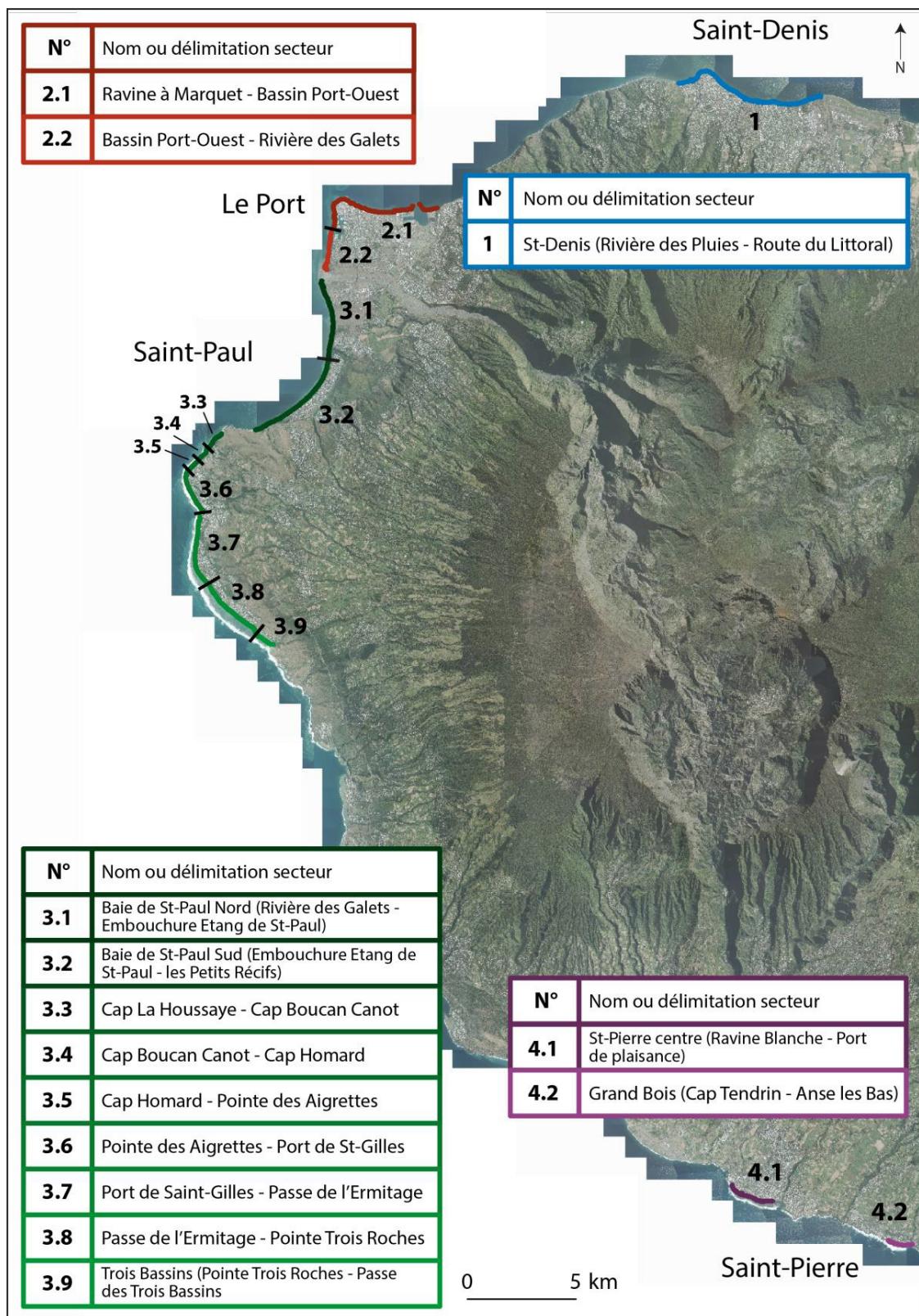
Éléments généraux de définition et de méthode

L'objectif est de renseigner l'évolution de la position du trait de côte en distinguant trois types de situations : les situations d'érosion (perte de matériaux engendrant un recul du trait de côte vers l'intérieur des terres) ; les situations de progradation (avancée du trait de côte vers la mer sous l'effet de l'accréation ou d'interventions anthropiques) ; et les situations de stabilité relative (maintien de la position du trait de côte à l'échelle pluri-décennale). L'étude porte sur les côtes meubles, alluvionnaires et sédimentaires, dont la faible résistance morphologique explique la mobilité. Sur cette base, les communes étudiées ont été divisées en 14 secteurs, qui correspondent à des cellules

(Saint-Denis, Saint-Pierre) ou sous cellules sédimentaires (Le Port, Saint-Paul), en général séparées par des sections de côte rocheuse (Figure 7).

Deux indicateurs de trait de côte ont été retenus pour cette étude : le pied de plage et la ligne de stabilité. Le pied de plage constitue une limite morpho-sédimentaire majeure entre les parties immergée et émergée du système littoral, bien qu'elle soit fluctuante et parfois floue dans l'espace. En milieu corallien, le pied de plage marque en général le passage du platier sableux à la plage. Il est facilement repérable sur les images aériennes, sauf lorsque l'image a été prise dans des conditions hydrodynamiques actives : dans ce cas, la zone de déferlement peut être très large et masquer le pied de plage, en particulier là où les récifs coralliens sont étroits (bancs récifaux et plateformes récifales) et sur les secteurs de côte fortement exposés au déferlement (sud de l'île face aux houles australes, par exemple). En milieu alluvionnaire, le pied de plage correspond à une limite en général moins nette qu'en milieu récifal (absence de platier, donc de rupture topographique) et il se matérialise par la ligne de déferlement des vagues. Quant à la « ligne de stabilité », elle marque la limite entre la zone active de la plage, dont les matériaux sont remaniés au quotidien sous l'effet des agents marins et éoliens qui commandent la dynamique du littoral, et la zone dite stabilisée du système sédimentaire, dont les matériaux ne sont remobilisés qu'exceptionnellement lorsque survient un événement tempétueux (cyclone ou houle australe). Sur les côtes « naturelles », c'est-à-dire non fixées par l'homme, cette ligne correspond à la limite inférieure de la végétation qui occupe le haut de plage ou la dune, constituée selon les cas d'espèces indigènes (*Ipomoea pes caprae*, *Tournefortia argentea*, *Scaevola taccada*/*sericea*) ou introduites, comme le filao (*Casuarina equisetifolia*). Sur les côtes artificialisées, la ligne de stabilité correspond à la limite des aménagements réalisés au plus près de la mer (ex. : base du mur de soutènement d'un bâtiment) et des ouvrages de défense (pied de ces ouvrages). Ces deux indicateurs sont complémentaires car le pied de plage est un trait de côte en général naturel, par opposition à la ligne de stabilité qui a été rigidifiée par des ouvrages de défense ou modifiée par des travaux de remblaiement sur une part non négligeable du linéaire côtier de La Réunion. L'évolution de la position du pied de plage renseigne donc sur l'état de santé des systèmes sédimentaires et alluvionnaires côtiers, et sur l'évolution en cours des niveaux de risque (aggravation en cas d'érosion vs. réduction en cas de progradation), alors que l'évolution de la position de la ligne de stabilité peut apporter des informations complémentaires sur la protection et l'aménagement des côtes.

Figure 7. Segmentation du littoral en 14 secteurs



Les données ont été générées à partir d'images aériennes prises à différentes dates (photographies aériennes IGN 1950 et 1978, ortho-photographie IGN 2011). Les photographies aériennes ont été géoréférencées à partir de points de calage pris au sol suivant une transformation spline. La précision obtenue est en général de l'ordre du mètre dans la bande côtière, zone sur laquelle porte l'étude. Le trait de côte a ensuite été numérisé manuellement, pour une précision comprise entre 1 et 4 m suivant les secteurs (imprécision de saisie de la ligne de stabilité là où elle est masquée par la frondaison des filaos, en particulier). L'incertitude totale (géoréférencement + saisie du trait de côte) est donc estimée à 5 m maximum. Les calculs d'évolution ont ensuite été réalisés à l'aide de l'extension DSAS, à partir de transects générés tous les 100 m : ces transects croisent les différents traits de côte et mesurent la distance qui les sépare (résultats appelés NSM ou Net Movement Shoreline). Le logiciel génère également les valeurs d'EPR (End Point Rate), soit la vitesse des changements en m/an.

Principaux résultats

De 1950 à 2011, si l'on prend l'indicateur pied de plage et une marge d'erreur de 5 m (les changements inférieurs à 5 m n'étant pas considérés comme significatifs), l'évolution du linéaire côtier étudié, constitué de 39,7 km de côtes meubles, est dominée par l'érosion, qui concerne 49,5 % du trait de côte. Pendant la même période, 22,5 % de ce linéaire côtier a connu une situation de progradation et 28 % est resté stable. Les résultats s'inversent si l'on considère la ligne de stabilité : l'érosion ne concerne plus que 18,4 % du linéaire côtier, la progradation 53 %, et la stabilité 28,6 %. Les Figure 8 et Figure 9 détaillent ces résultats pour l'ensemble des secteurs étudiés, en partant de l'est de Saint-Denis au nord pour arriver au secteur de Grand Bois à Saint-Pierre à l'extrême sud de la zone d'étude. Le numéro des transects est présenté en abscisse et les valeurs de changement en m en ordonnée. Globalement, on observe des changements contrastés, à la fois entre les communes et les compartiments sédimentaires considérés. Les valeurs d'érosion et de progradation les plus fortes s'observent dans les communes de Saint-Denis et du Port, avec un recul maximal de 162 m au Port, à la Pointe des Galets (pour le pied de plage) et une avancée maximale de 137 m au débouché de la Rivière des Pluies à Saint-Denis (pour la ligne de stabilité). La prédominance de l'érosion se confirme quand il s'agit du pied de plage (Figure 8), même si on note localement des avancées notables du trait de côte. Ces avancées significatives sont liées : 1) à la présence des embouchures des rivières, l'endiguement de ces dernières

ayant favorisé des phénomènes de progradation marquée, mais très localisée (ex. : ravine du Butor à Saint-Denis) ; 2) aux impacts des aménagements, qu'ils soient directs (remblaiement pour l'extension du terminal de conteneurs au Port-Est, Baie de la Possession) ou indirects (blocage du transit sédimentaire par la jetée sud du port de Saint-Gilles, qui a entraîné l'élargissement de la plage des Brisants). L'accrétion peut également être d'origine naturelle, mais les valeurs sont dans ce cas moins élevées (ex. : plage de la Saline).

L'évolution de la ligne de stabilité est différente de celle du pied de plage, car les valeurs positives prédominent. Globalement, trois secteurs ont connu un recul (le nord et le centre de la baie de Saint-Paul, l'Ermitage et le centre-ville de Saint-Pierre) alors qu'ailleurs la ligne de stabilité a avancé. Les valeurs les plus élevées s'observent à Saint-Denis et au Port et elles s'expliquent le plus souvent par des travaux de remblaiement. Plus rarement, l'accrétion est naturelle, comme à la Saline.

Les résultats sont également présentés sous la forme de diagrammes de secteur ou camemberts (Figure 10). Les données pour les périodes intermédiaires 1950-1978 et 1978-2011 sont également indiquées afin de montrer la variabilité temporelle des évolutions observées. La Figure 10 permet de comparer les résultats obtenus pour les deux indicateurs retenus : ils sont concordants dans certains cas (secteurs 2.2, 3.1 ou 3.7 pour la période 1950-2011, correspondant respectivement au sud du Port-Ouest, à la partie nord de la baie de Saint-Paul et à l'Ermitage), et très différents, voire opposés dans d'autres (secteur 3.2 correspondant à la partie sud de la baie de Saint-Paul, secteur 3.5 situé entre le cap Homard et la pointe des Aigrettes). Des différences de tendance s'observent également en fonction des périodes : le secteur 3.1 a vu son pied de plage avancer sur plus de 50% de son linéaire côtier entre 1950 et 1978 (alors que le recul ne concerne que 25% du linéaire côtier), puis la tendance s'est inversée entre 1978 et 2011, avec 80 % du linéaire côtier en recul.

Les évolutions respectives des positions du pied de plage et de la ligne de stabilité entre 1950 et 2011 ont globalement engendré une réduction de la largeur des plages (importante sur le littoral de Saint-Denis et de Saint-Pierre, en particulier), sauf dans de rares secteurs où celle-ci s'est maintenue en dépit du recul du trait de côte (baie de Saint-Paul) ou a au contraire augmenté suite à l'avancée du trait de côte (plage située au sud de la jetée sud du Port-Ouest, plage des Brisants, plage de la Saline). Là où elle s'observe, la contraction de la zone d'amortissement naturelle qu'est la plage a pour effet une augmentation de l'exposition des enjeux situés à faible distance du trait de côte (cf. indicateur 3).

Figure 8. Évolution de la position du trait de côte (pied de plage) entre 1950 et 2011. La moyenne et les valeurs min et max sont indiquées pour chaque secteur.

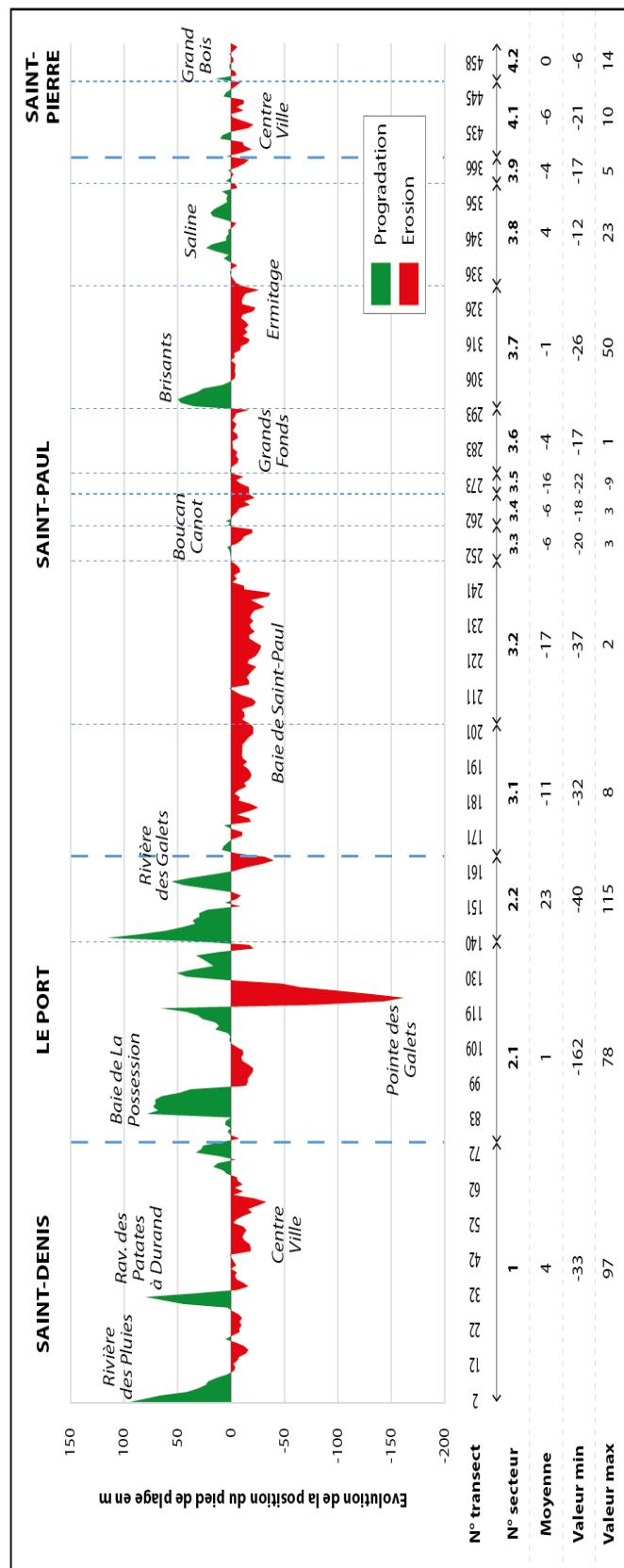


Figure 9. Évolution de la position du trait de côte (ligne de stabilité) entre 1950 et 2011. La moyenne et les valeurs min et max sont indiquées pour chaque secteur.

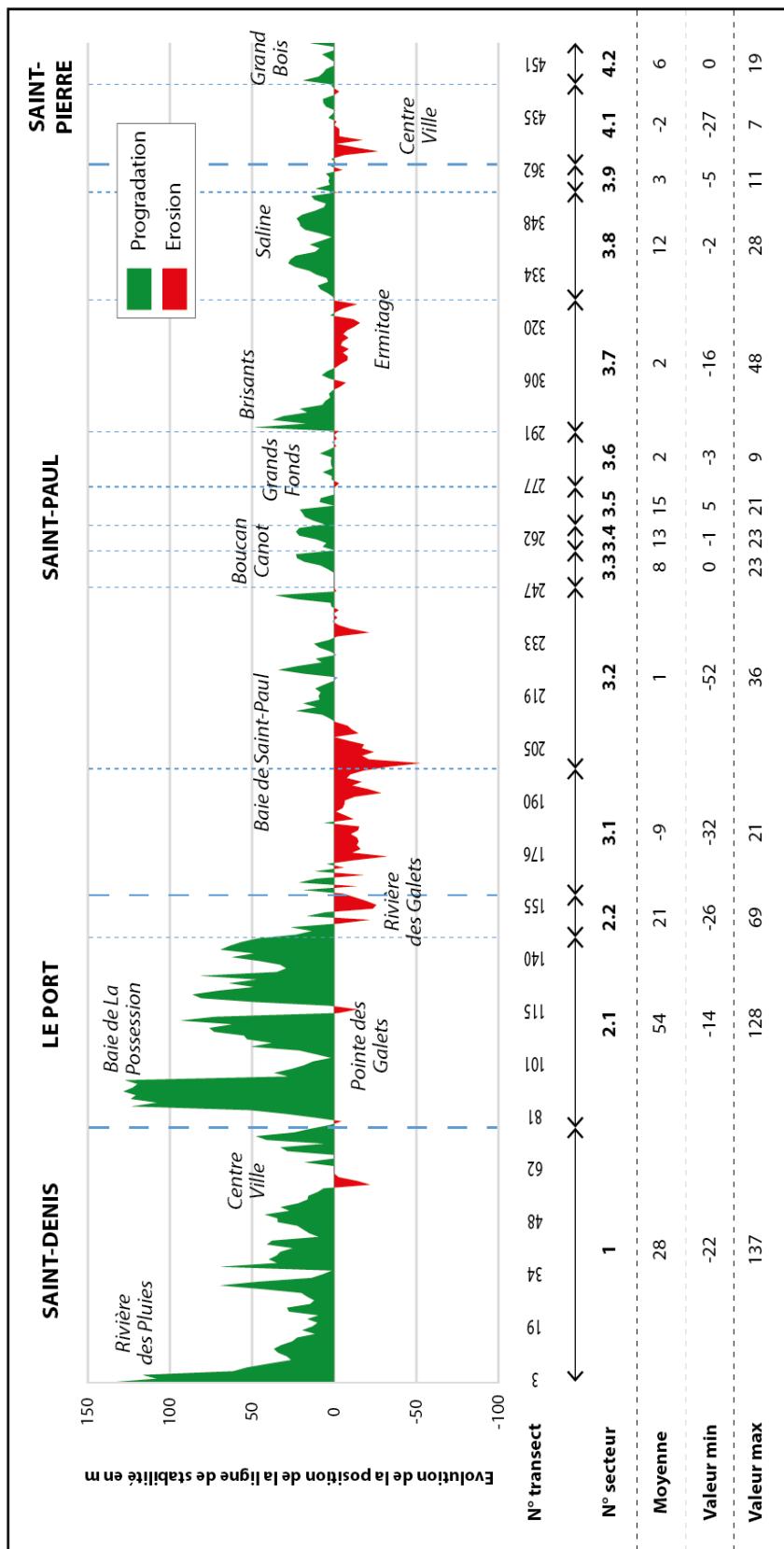
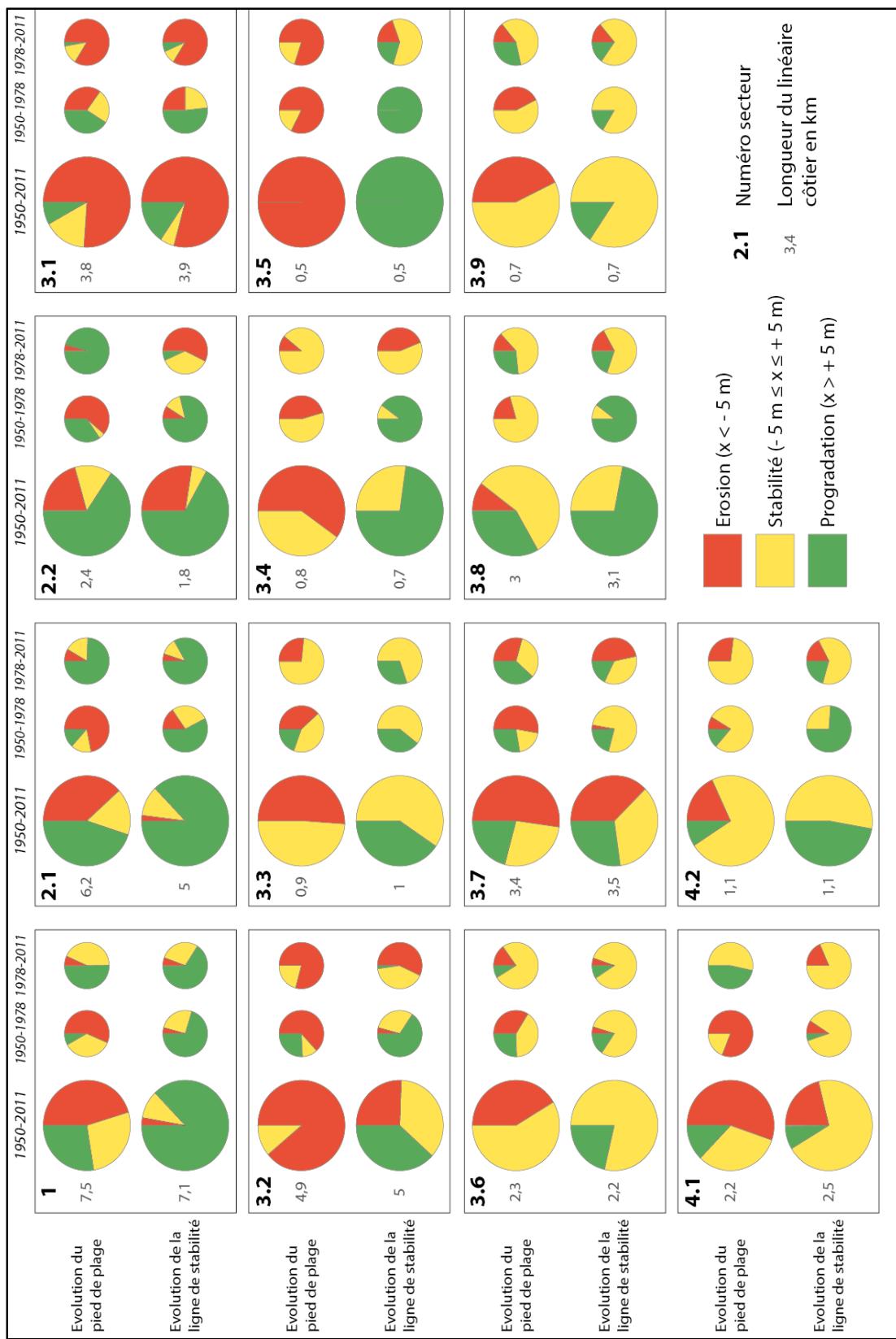


Figure 10. Évolution du trait de côte par secteur et par période (N.B. : la longueur du linéaire varie légèrement en fonction des périodes)



2.2. Évolution des enjeux humains dans la bande côtière des 100 m de 1950 à 2011

Éléments généraux de définition et de méthode

Deux types d'enjeux humains sont pris en compte dans cette étude, le bâti et les routes. Au sein du bâti, l'on distingue les bâtiments résidentiels et collectifs⁵⁵ (ces derniers correspondent aux bâtiments industriels, commerciaux, publics, etc.). Ces informations ont été numérisées à partir des photographies aériennes de 1950 et 1978, en partant des données de la BD TOPO® V2 (IGN, 2011) : les données de 2011 ont été dupliquées et mises à jour (suppression ou ajout d'entités) pour produire les situations de 1950 et 1978. Seuls les enjeux présents dans la bande côtière des 100 m ont été numérisés, sauf sur le littoral corallien de Saint-Paul où le bâti a été numérisé jusqu'à 200 m du trait de côte afin de mettre en évidence la forte urbanisation récente de la bande côtière dans cette commune. Le trait de côte utilisé pour déterminer cette bande côtière est la « ligne de stabilité », qui correspond à la ligne de végétation dans les secteurs « naturels » et à la face interne des ouvrages de défense dans les secteurs aménagés (cf. supra). Mais ce trait de côte a été complété afin d'intégrer les sections de côte rocheuse et de couvrir ainsi la totalité du littoral pour chaque commune. En effet, l'étude de l'évolution des enjeux en dur dans la bande côtière des 100 m a été réalisée à l'échelle communale, sauf dans le cas de Saint-Denis dans lequel la partie occidentale de la commune, qui correspond à la route du littoral, n'a pas été intégrée (peu d'enjeux à basse altitude en dehors de cette route). Quelques écueils ont été rencontrés lors de ce travail de numérisation : le couvert arboré principalement constitué de filaos à Saint-Paul a constitué une contrainte pour la numérisation exhaustive des enjeux dans la bande côtière de cette commune. La difficulté rencontrée pour numériser les routes côtières en 1978 explique probablement en partie la diminution de la longueur du réseau routier en 1978 par rapport à 1950. Toujours en 1978, dans le quartier de Terre Sainte à Saint-Pierre, il est impossible de distinguer clairement les limites de chaque habitation : les unités qui ont été numérisées représentent dans ce cas-là de petits pâtés de maison et non des maisons distinctes, d'où l'intérêt de considérer la surface bâtie plutôt que le nombre d'unités pour l'étude de l'évolution des enjeux.

55. Lorsqu'il est inutile de faire cette distinction, nous parlerons simplement de bâti.

Évolution à l'échelle de l'ensemble des communes d'étude

Comme l'illustrent les cartes d'occupation du sol réalisées pour les trois dates (Figure 12, Figure 13, Figure 14, Figure 15), l'on observe à l'échelle des 60 dernières années une urbanisation littorale importante, qui se manifeste globalement :

- Par une densification du bâti dans les zones littorales déjà urbanisées, comme on peut l'observer en particulier à Saint-Denis et à Saint-Pierre où la pression foncière est forte (Figure 12) ;
- Par l'extension du bâti (et des routes) des centres urbains historiques vers les zones périphériques (périurbanisation), marquée dans ces deux mêmes communes ;
- Par le développement de l'habitat et des fonctions balnéaires (Saint-Gilles) le long du littoral corallien, en résultat de l'ouverture de la route du littoral en 1963 et de l'essor du tourisme balnéaire dans les années 1970, respectivement. Ce phénomène concerne la commune de Saint-Paul.

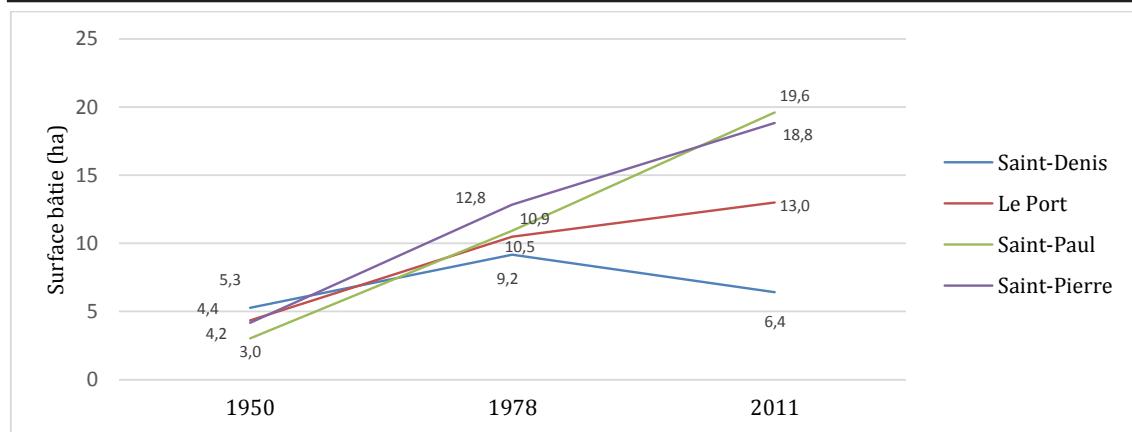
Sur l'ensemble de la zone d'étude, l'on recense dans la bande côtière des 100 m 960 bâtiments en 1950, 1 667 bâtiments en 1978, et 3 158 bâtiments en 2011, soit une augmentation de 228 % entre 1950 et 2011. En résultat, la surface bâtie est passée de 16,8 ha en 1950 à 57,8 ha en 2011 (+ 243 %). Le réseau routier situé dans la bande côtière des 100 m s'est également densifié, sa longueur passant de 48,8 km en 1950 à 122 km en 2011.

Évolution de l'occupation du sol par commune entre 1950 et 2011

L'urbanisation de la bande côtière des 100 m entre 1950 et 2011 a été très inégale d'une commune à l'autre.

Saint-Denis

À Saint-Denis, l'urbanisation littorale a schématiquement connu deux phases successives, une phase d'étalement urbain vers l'est jusqu'en 1978 sous l'effet de la pression démographique, puis une phase de densification de l'habitat depuis 1978 (Figure 12). En 1950, la ravine du Butor constituait la limite orientale de la zone urbanisée. En l'espace de trente ans, entre 1950 et 1978, Saint-Denis a pris sa configuration actuelle, avec une urbanisation pratiquement continue jusqu'à la ravine des Pluies à l'est. Ce processus d'étalement urbain a abouti à l'occupation de zones basses alluvionnaires exposées aux risques d'inondation (d'où l'endiguement des ravines) et de submersion marine. Au cours d'une seconde phase, entre 1978 et 2011, l'espace urbain s'est fortement densifié, comme l'illustrent les cartes d'occupation du sol

Figure 11. Évolution de la surface bâtie par commune dans la bande côtière des 100 m entre 1950 et 2011

à ces deux dates. Il est intéressant de noter qu'en dépit de cette forte urbanisation, peu de bâtiments ont été construits dans la bande côtière des 100 m : le nombre d'unités bâties y est passé de 124 à 249 entre 1950 et 2011 et la surface bâtie a même baissé entre 1978 et 2011, passant de 9,2 à 6,4 ha (Figure 11). Ce taux de croissance relativement faible pour une commune littorale (le plus faible à l'échelle des quatre communes) fait que cette commune présente, comparativement aux autres communes, une plus faible exposition de son bâti aux risques liés à la mer. Les enjeux humains les plus exposés aux aléas météo-marins sont à Saint-Denis les routes côtières dont la longueur est passée de 10,3 km en 1978 à 25,5 km en 2011 (Tableau 1).

Le Port

L'aménagement en 1886 du premier bassin portuaire sur la face occidentale du cône-delta de la rivière des Galets influencera longtemps la configuration de la commune du Port. En effet, en 1950, la zone bâtie jouxte toujours ce bassin, bien qu'elle commence à s'étendre le long des axes routiers qui partent vers Saint-Denis à l'est et vers Saint-Paul au sud. Les deux décennies suivantes se caractérisent par une importante extension urbaine dans ces deux directions, qui s'accompagne du développement de routes et de zones industrielles et commerciales. Pendant cette période, l'habitat se densifie. Ces deux tendances (extension et densification urbaines) se poursuivent des années 1980 à aujourd'hui, soutenues par la création du Port-Est en 1986 (Figure 13).

Tableau 1. Longueur du réseau routier situé dans la bande côtière des 100 m

Commune	1950	1978	2011
	Longueur (km)	Longueur (km)	Longueur (km)
Saint-Denis	10,26	10,51	25,46
Le Port	3,54	9,58	25,56
Saint-Paul	23,04	18,62	41,85
Saint-Pierre	11,96	14,90	29,15
TOTAL	48,80	53,61	122,02

Cette ville qui est née de son port lui reste aujourd'hui adossée : peu de bâtiments ont été construits dans la bande côtière des 100 m. Alors que l'on en compte 97 en 1950 (couvrant une surface bâtie de 4,4 ha), l'on en recense 214 aujourd'hui (pour 13 ha), dont 117 ont une vocation industrielle (couvrant une surface de 11,8 ha) (Tableau 2), ce qui explique pourquoi les valeurs de surface sont élevées. En revanche, le réseau routier, qui était très peu développé dans la bande côtière des 100 m en 1950 avec seulement 3,5 km de routes, s'est depuis lors densifié pour atteindre une longueur de 25,6 km en 2011.

Saint-Paul

La commune de Saint-Paul se distingue par la forte urbanisation, à partir des années 1970, de secteurs de côte largement naturels en 1950. En effet, en 1950, seule la baie de Saint-Paul était urbanisée (Figure 14). Sur le littoral corallien qui s'étire entre la pointe des Aigrettes et le port de Saint-Gilles, il n'existe alors qu'une dizaine de maisons, construites sur la dune. Celles-ci étaient très espacées et pour la plupart situées à l'arrière de la formation végétale littorale. Il en était de même au sud du petit port de pêche de Saint-Gilles. Plus au sud, dans les secteurs de l'Ermitage et de la Saline, il n'existe sur le littoral que quelques habitations éparses.

Figure 12. Évolution de l'urbanisation du littoral de Saint-Denis entre 1950 et 2011



Un phénomène rapide d'urbanisation au plus près de la mer s'impose à partir des années 1970 en résultat de la construction de la route du littoral. En effet, une à trois lignes d'habitations occupent déjà la dune en 1978. Souvent, les habitations de première ligne ont été construites en haut de plage ou en bordure de dune. Seuls quelques secteurs restent non bâties ici et là le long du littoral.

Entre 1978 et 2011, on assiste à l'occupation des dernières portions de côte libres d'habitat et à une forte densification du bâti dans la bande côtière. Au total, le nombre de bâtiments y passe de 253 unités en 1950 à 732 unités en 1978, puis à 1 548 unités en 2011 (Tableau 2). L'habitat résidentiel est largement prédominant dans ces totaux, le bâti collectif ne représentant que 3 bâtiments en 1950, 33 bâtiments en 1978 et 56 bâtiments en 2011. Au résultat, la surface bâtie dans la bande des 100 m passe de 3 ha en 1950 à 10,9 ha en 1978 et 19,6 ha en 2011.

Tableau 2. Nature et évolution du bâti situé dans la bande côtière des 100 m par commune entre 1950 et 2011

Commune	Bâtiments collectifs	Bâtiments individuels	Total			
	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)
1950						
Saint-Denis	9	0,73	115	4,55	124	5,28
Le Port	51	3,69	46	0,67	97	4,36
Saint-Paul	3	0,07	250	2,95	253	3,02
Saint-Pierre	17	0,95	469	3,21	486	4,16
TOTAL	80	5,44	880	11,38	960	16,82
1978						
Saint-Denis	37	2,93	167	6,25	204	9,18
Le Port	93	9,76	45	0,72	138	10,48
Saint-Paul	33	0,65	699	10,28	732	10,93
Saint-Pierre	33	2,61	560	10,23	593	12,84
TOTAL	196	15,95	1 471	27,48	1 667	43,43
2011						
Saint-Denis	31	2,06	218	4,35	249	6,41
Le Port	117	11,79	97	1,20	214	12,99
Saint-Paul	56	1,04	1 492	18,56	1548	19,60
Saint-Pierre	58	3,51	1 089	15,31	1147	18,82
TOTAL	262	18,40	2 896	39,42	3158	57,82

Ces chiffres traduisent bien la course à la mer qui débute dans les années 1960 et 1970, et se poursuivra avec un rythme encore plus soutenu au cours des décennies suivantes : dans la bande côtière des 100 m, le rythme des constructions passe de + 17,1 unités/an entre 1950 à 1978 à + 24,7 unités/an entre 1978 et 2011. Ce taux d'urbanisation est le plus élevé des quatre communes étudiées (Tableau 3). Le réseau routier, qui était déjà bien implanté dans la bande côtière des 100 m en 1950

avec 23 km de routes a continué à se développer pour atteindre une longueur de 41,9 km en 2011.

Si l'on considère une bande côtière plus large, celle des 200 m, entre le cap La Houssaye et Trois Bassins (soit le littoral corallien de Saint-Paul), on constate que le nombre de bâtiments y est passé de 350 en 1950, à 1 046 en 1978, et 2 511 en 2011, ce qui donne une croissance de 617 % entre 1950 et 2011. Au résultat, la surface bâtie a augmenté de 857 % en passant de 3 ha en 1950 à 29,1 ha en 2011.

Tableau 3. Évolution et rythme de l'urbanisation par commune entre 1950 et 2011

Période	Évolution nette	Rythme d'urbanisation		
	Nombre	Surface (ha)	unité/an	ha/an
Saint-Denis				
1950-1978	80	3,90	2,9	0,14
1978-2011	45	-2,77	-1,4	-0,08
1950-2011	125	1,13	2,0	0,02
Le Port				
1950-1978	41	6,12	1,5	0,22
1978-2011	76	2,51	2,3	0,08
1950-2011	117	8,63	1,9	0,14
Saint-Paul				
1950-1978	479	7,91	17,1	0,28
1978-2011	816	8,67	24,7	0,26
1950-2011	1295	16,58	21,2	0,27
Saint-Pierre				
1950-1978	107	8,68	3,8	0,31
1978-2011	554	5,98	16,8	0,18
1950-2011	661	14,66	10,8	0,24

Saint-Pierre

La commune de Saint-Pierre a également connu une forte progression de l'urbanisation sur son littoral corallien au cours des 60 dernières années. À l'ouest de la rivière d'Abord, au droit du centre-ville, il n'existe en 1950 qu'un petit quartier urbain de bord de mer. On trouve aussi quelques habitations dispersées sur la dune, entre le port et la ravine Blanche (Figure 15). En 1978, l'habitat s'est densifié et la plage a disparu en deux endroits au devant des habitations les plus proches de la mer, qui sont protégées de l'attaque des vagues par des murs de protection. Si l'on considère l'emprise et les impacts du bâti sur le système plage-dune, les situations de 1978 et de 2011 sont tout à fait comparables. La plage située à l'ouest du port a été équipée d'aires de stationnement. Au total, le littoral corallien de Saint-Pierre était déjà fortement dégradé et artificialisé à la fin des années 1970.

Sur l'ensemble de la commune, le bâti situé dans la bande côtière des 100 m est passé de 486 unités en 1950 (valeur la plus forte à l'échelle des quatre communes étudiées) à 593 unités en 1978, puis à 1 147 en 2011.

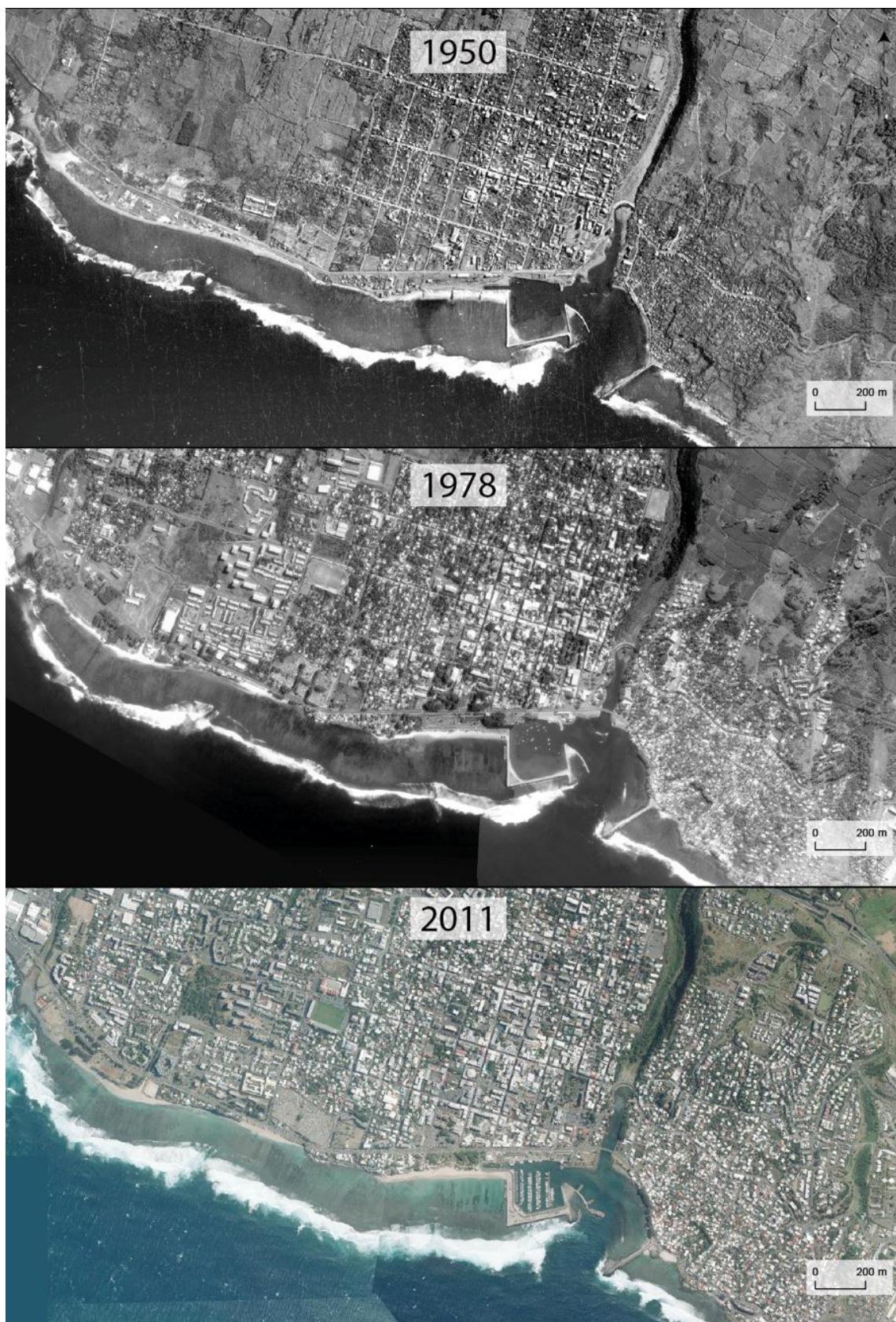
Figure 13. Évolution de l'urbanisation de la commune du Port entre 1950 et 2011



Figure 14. Évolution de l'urbanisation de la Baie de Saint-Paul entre 1950 et 2011



Figure 15. Évolution de l'urbanisation du littoral de Saint-Pierre entre 1950 et 2011



La surface bâtie est passée de 4,2 ha en 1950 à 18,8 ha en 2011. Seul le secteur de la ravine Blanche est resté non bâti. Dans cette même bande côtière, la longueur du réseau routier est passée de 12 km en 1950 à 29,2 km en 2011.

1. Synthèse

Trois types de trajectoires d'urbanisation se distinguent : (1) celle des villes anciennes de Saint-Denis et de Saint-Pierre, qui ont connu au cours des 60 dernières années un phénomène d'étalement urbain vers des zones littorales basses plus exposées aux risques de submersion-inondation que le centre historique ; (2) celle de la ville du Port dont le fort développement urbain s'est effectué dans les espaces intérieurs et n'a par conséquent pas engendré de fort accroissement du bâti dans la bande côtière des 100 m (construction de vastes bâtiments à vocation industrielle, principalement) ; (3) celle de la commune de Saint-Paul, qui se distingue par l'urbanisation rapide et au plus près de la mer de l'ensemble de son littoral corallien à partir des années 1970.

Les résultats obtenus dans la bande côtière des 100 m permettent d'apporter des informations sur les rythmes et les périodes de changement : en termes d'évolution de la surface bâtie, les quatre communes ont subi les mêmes tendances entre 1950 et 1978. Si l'on reprend la Figure 11, l'on voit que les courbes démarrent globalement au même niveau et qu'elles restent relativement proches en 1978, même si à cette date, la surface bâtie de Saint-Pierre est légèrement plus élevée que celle des autres communes. En revanche, après 1978, trois tendances nettes se dégagent : 1) une augmentation soutenue de la surface bâtie dans la bande des 100 m à Saint-Paul et à Saint-Pierre (respectivement + 8,7 ha et + 6 ha) ; 2) une légère hausse dans la commune du Port (+ 2,5 ha) et ; 3) une baisse significative dans la commune de Saint-Denis (- 2,8 ha).

Le développement du réseau routier est moins important, étant donné que dans plusieurs cas, il s'agit d'élargir et de mettre aux normes des routes préexistantes. L'aménagement routier le plus impactant a été la construction de la route du Littoral qui explique l'explosion urbaine qui s'est produite dans les communes du Port et de Saint-Paul.

2.3. Évolution de l'exposition des enjeux humains de 1950 à 2011

En fonction de leur distance au trait de côte

Éléments généraux de définition et de méthode

Sont considérés comme étant potentiellement exposés aux aléas météo-marins les enjeux situés

dans la bande côtière des 100 m, qui constitue la bande côtière de référence dans le cadre de la loi Littoral du 1^{er} janvier 1986. La distance de chaque enjeu au trait de côte a été calculée sous ArcGis⁶ et six niveaux d'exposition ont été distingués par ordre décroissant : extrêmement fort (< 10 m du trait de côte), très fort (10 à 20 m du trait de côte), fort (20 à 30 m du trait de côte), moyen (30 à 40 m du trait de côte) et relativement faible (40 à 50 m du trait de côte). Les enjeux situés à une distance comprise entre 50 et 100 m du trait de côte sont considérés comme étant faiblement exposés aux aléas météo-marins.

Degré d'exposition du bâti

Sur l'ensemble de la zone d'étude, l'augmentation de l'exposition du bâti est significative. La surface bâtie située à moins de 30 m du trait de côte (exposition forte à extrêmement forte), est passée de 5,9 ha en 1950 (pour 297 bâtiments) à 15,9 ha en 2011 (pour 730 bâtiments). La surface bâtie située à moins de 10 m du trait de côte (exposition extrêmement forte), est passée de 1,4 ha en 1950 (pour 63 bâtiments) à 3,9 ha en 2011 (pour 161 bâtiments). Cette augmentation de l'exposition a été plus importante entre 1950 et 1978 qu'entre 1978 et 2011 (Figure 16).

Si l'on reprend cette bande côtière des 30 m pour évaluer l'exposition du bâti, une analyse par commune fait apparaître trois tendances distinctes : 1) Au Port et à Saint-Paul, la surface bâtie située dans la bande côtière des 30 m ne cesse d'augmenter entre 1950 et 2011 (Figure 17). Cette augmentation est globalement linéaire pour Saint-Paul (+ 1,9 ha entre 1950 et 1978 et + 2 ha entre 1978 et 2011) alors que deux phases se dégagent au Port : une forte hausse entre 1950 et 1978 (+ 3,1 ha) suivie d'un ralentissement entre 1978 et 2011 (+ 0,8 ha) ; 2) la surface bâtie à Saint-Pierre connaît la même hausse qu'au Port entre 1950 et 1978 (+ 3,1 ha) pour ensuite subir une légère baisse entre 1978 et 2011 (- 0,3 ha) ; 3) la surface bâtie à Saint-Denis diminue entre 1950 et 1978 (- 0,7 ha) pour ensuite se stabiliser jusqu'en 2011 (+ 0,1 ha).

Si l'on considère la distance du bâti au trait de côte, c'est la commune du Port qui apparaît comme étant la plus exposée, devant celles de Saint-Paul et de Saint-Pierre. Mais les bâtiments exposés sont principalement de grands bâtiments industriels et commerciaux (cf. Tableau 2) situés à proximité des bassins portuaires. La situation du Port (qui indique une faible vulnérabilité des bâtiments résidentiels) est donc très différente de celle de la commune de Saint-Paul dans laquelle

6. L'outil « near », qui permet de calculer les distances les plus courtes entre deux entités, a été utilisé.

Figure 16. Degré d'exposition du bâti (en surface) aux aléas météo-marins en fonction de sa distance au trait de côte entre 1950 et 2011 sur l'ensemble de la zone d'étude

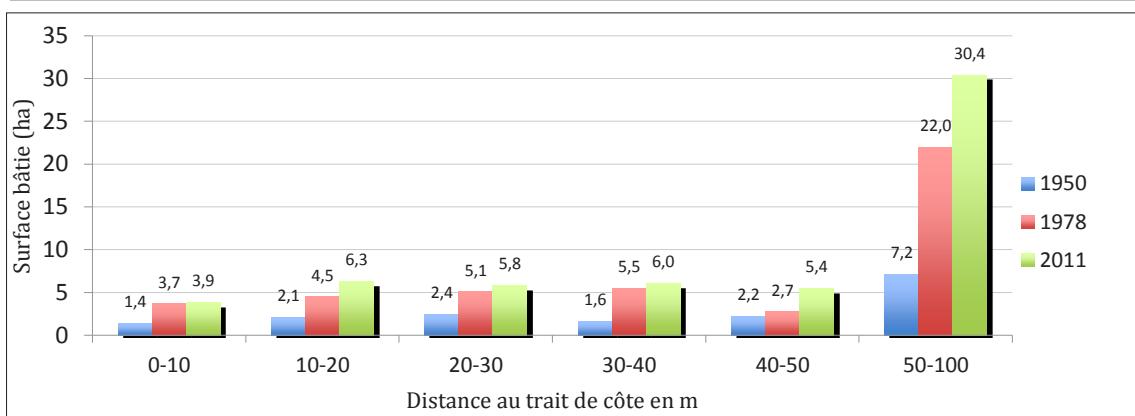


Figure 17. Évolution de la surface bâtie située dans la bande côtière des 30 m par commune entre 1950 et 2011

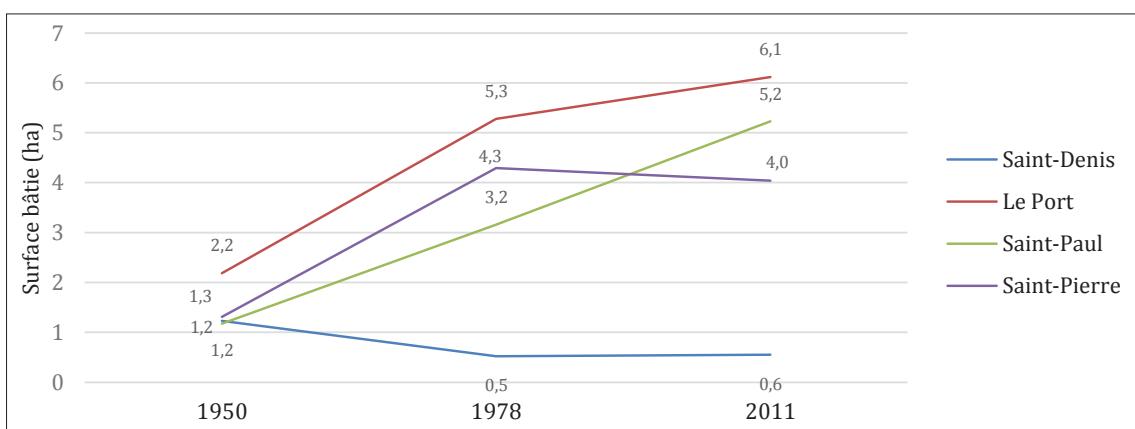


Tableau 4. Degré d'exposition du bâti aux aléas météo-marins (unités + surface bâtie) en fonction de sa distance au trait de côte par commune entre 1950 à 2011

	Saint-Denis	Le Port	Saint-Paul	Saint-Pierre	Total					
Distance au trait de côte	Nb	Surf. (ha)	Nb	Surf. (ha)	Nb	Surface (ha)	Nb	Surface (ha)	Nb	Surface (ha)
1950										
x < 10 m	6	0,31	8	0,74	15	0,17	34	0,19	63	1,41
10 m ≤ x < 20 m	7	0,25	10	0,78	49	0,60	42	0,44	108	2,07
20 m ≤ x < 30 m	11	0,67	15	0,67	36	0,40	64	0,68	126	2,42
30 m ≤ x < 40 m	8	0,34	12	0,36	37	0,50	58	0,39	115	1,59
40 m ≤ x < 50 m	12	0,59	9	0,98	23	0,31	49	0,29	93	2,17
50 m ≤ x < 100 m	80	3,12	43	0,83	93	1,04	239	2,17	455	7,16
Total	124	5,28	97	4,36	253	3,02	486	4,16	960	16,82
1978										
x < 10 m	2	0,14	9	1,19	18	0,52	46	1,83	75	3,68
10 m ≤ x < 20 m	3	0,07	13	1,63	80	1,25	53	1,53	149	4,48
20 m ≤ x < 30 m	10	0,31	22	2,46	93	1,39	46	0,92	171	5,08
30 m ≤ x < 40 m	20	1,31	15	1,49	79	1,39	71	1,28	185	5,47
40 m ≤ x < 50 m	19	0,51	14	0,26	73	1,06	64	0,89	170	2,72
50 m ≤ x < 100 m	150	6,84	65	3,45	389	5,32	313	6,39	917	22,00
Total	204	9,18	138	10,48	732	10,93	593	12,84	1667	43,43
2011										
x < 10 m	6	0,21	19	1,03	72	1,29	64	1,34	161	3,87
10 m ≤ x < 20 m	6	0,02	27	2,98	133	1,69	105	1,57	271	6,26
20 m ≤ x < 30 m	3	0,32	27	2,11	179	2,25	89	1,13	298	5,81
30 m ≤ x < 40 m	15	0,72	26	1,65	152	2,06	121	1,61	314	6,04
40 m ≤ x < 50 m	18	0,59	26	1,91	143	1,54	130	1,39	317	5,43
50 m ≤ x < 100 m	201	4,55	89	3,31	869	10,77	638	11,78	1797	30,41
Total	249	6,41	214	12,99	1548	19,60	1147	18,82	3158	57,82

les bâtiments exposés sont nombreux et majoritairement résidentiels.

L'évolution de la surface bâtie située à moins de 10 m du trait de côte (exposition extrêmement forte), est également inégale en fonction des communes. En 1950, Saint-Denis et Le Port comptaient respectivement 0,3 et 0,7 ha de surface bâtie dans la bande côtière des 10 m (Tableau 4). Cette surface a légèrement diminué à Saint-Denis et a légèrement augmenté au Port pour atteindre en 2011 respectivement 0,2 et 1 ha. Des changements plus marqués s'observent à Saint-Paul et Saint-Pierre : en 1950, la surface bâtie située à moins de 10 m du trait de côte couvrait 0,2 ha pour chacune des communes, contre 1,3 ha en 2011 (là-aussi les valeurs sont identiques dans les deux communes). Cette augmentation est plus récente à Saint-Paul puisque les changements les plus importants s'opèrent entre 1978 et 2011 (de 0,5 à 1,3 ha), contrairement à Saint-Pierre où c'est entre 1950 et 1978 que la hausse est la plus forte (de 0,2 à 1,8 ha). Le Tableau 4 apporte des résultats plus précis.

Degré d'exposition des routes

Les routes connaissent également une augmentation de leur exposition entre 1950 et 2011, puisque sur l'ensemble de la zone d'étude, la longueur du réseau routier exposée augmente pour les différents niveaux d'exposition retenus (Figure 18).

Une analyse par commune, toujours dans cette bande côtière des 30 m, fait apparaître des trajectoires qui globalement se ressemblent puisque toutes les communes voient leur réseau routier augmenter entre 1950 et 2011 (Figure 19). Une différence se dégage tout de même en 1978 : alors qu'au Port et Saint-Pierre le réseau routier augmente légèrement, il diminue à Saint-Denis et à Saint-Paul, pour ensuite largement se développer, et cela dans les quatre communes.

Le Tableau de résultats détaillés est fourni ci-dessous (Tableau 5) :

Figure 18. Degré d'exposition des routes aux aléas météo-marins en fonction de leur distance au trait de côte, sur l'ensemble des communes étudiées entre 1950 et 2011

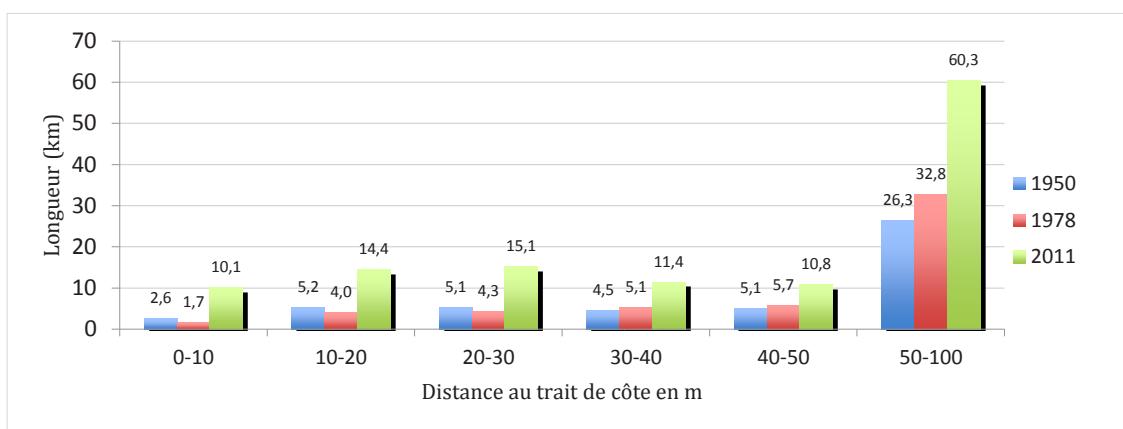


Figure 19. Évolution de la longueur des réseaux routiers situés dans la bande côtière des 30 m par commune entre 1950 et 2011

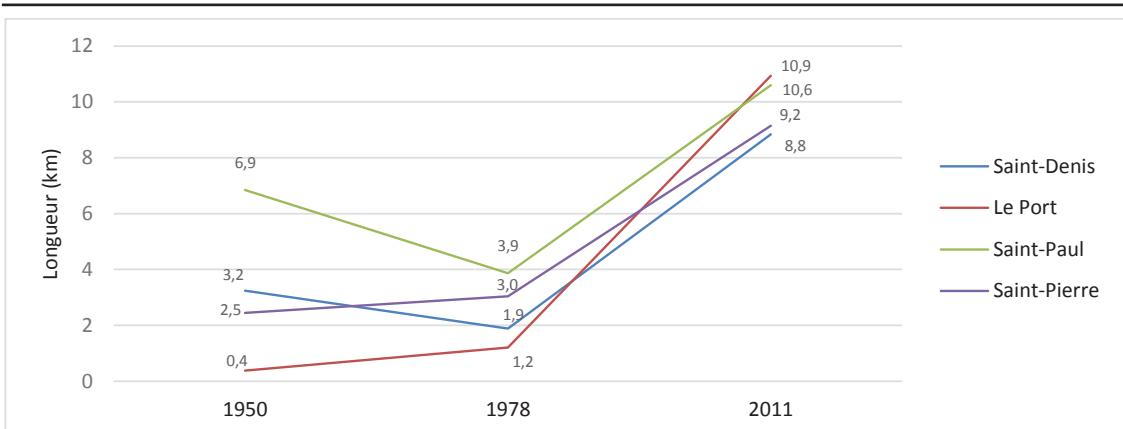


Tableau 5. Degré d'exposition des routes aux aléas météo-marins en fonction de leur distance au trait de côte par commune entre 1950 et 2011

Distance au trait de côte	Saint-Denis (km)	Le Port (km)	Saint-Paul (km)	Saint-Pierre (km)	Total (km)
1950					
x < 10 m	0,66	0,05	0,96	0,89	2,56
10 m ≤ x < 20 m	1,05	0,07	3,20	0,90	5,22
20 m ≤ x < 30 m	1,53	0,26	2,69	0,66	5,14
30 m ≤ x < 40 m	1,00	0,29	2,31	0,87	4,47
40 m ≤ x < 50 m	1,35	0,83	2,03	0,87	5,08
50 m ≤ x < 100 m	4,67	2,04	11,85	7,77	26,33
Total	10,26	3,54	23,04	11,96	48,80
1978					
x < 10 m	0,07	0,05	0,74	0,84	1,70
10 m ≤ x < 20 m	0,75	0,70	1,54	0,97	3,96
20 m ≤ x < 30 m	1,06	0,46	1,59	1,23	4,34
30 m ≤ x < 40 m	1,06	0,95	1,70	1,43	5,14
40 m ≤ x < 50 m	1,41	0,74	1,97	1,56	5,68
50 m ≤ x < 100 m	6,16	6,68	11,08	8,87	32,79
Total	10,51	9,58	18,62	14,90	53,61
2011					
x < 10 m	2,04	2,34	2,36	3,31	10,05
10 m ≤ x < 20 m	3,55	3,72	3,90	3,21	14,38
20 m ≤ x < 30 m	3,25	4,88	4,34	2,63	15,10
30 m ≤ x < 40 m	2,56	2,77	3,38	2,67	11,38
40 m ≤ x < 50 m	2,43	2,15	3,74	2,49	10,81
50 m ≤ x < 100 m	11,63	9,70	24,13	14,84	60,30
Total	25,46	25,56	41,85	29,15	122,02

2.3.2. En fonction de leur altitude

Éléments de méthode

L'altitude à laquelle sont situés le bâti et les voies routières contribue à déterminer leur exposition potentielle aux aléas inondation et submersion. En effet, la frange côtière basse et les abords des cours d'eau sont les zones les plus exposées aux risques de submersion marine et d'inondation par débordement des cours d'eau. L'altitude des bâtiments détermine également leur propension à être inondés en cas de pluies intenses, notamment en cas de dysfonctionnement des systèmes d'évacuation des eaux pluviales en milieu urbanisé caractérisé par une forte imperméabilité des sols.

Sont ici considérés comme étant potentiellement exposés à l'aléa submersion les enjeux situés à une altitude inférieure à 9 m. Si ce seuil a été retenu dans cette étude, il faut cependant noter que des enjeux situés à plus de 9 m d'altitude peuvent être atteints par la projection de paquets de mer ou de matériaux (sable, débris de corail, galets volcaniques) en cas d'événement météo-marin extrême de type cyclone. Sur la base de ce seuil altitudinal, trois degrés d'exposition potentielle ont été distingués :

- élevé pour les enjeux situés à moins de 3 m d'altitude ;
- moyen pour les enjeux situés entre 3 et 6 m d'altitude ;
- faible pour les enjeux situés entre 6 et 9 m d'altitude.

La source de données utilisée pour déterminer l'altitude des enjeux (bâtiments, routes) est le Lidar (RGE Alti IGN 2012). L'altitude du bâti a été calculée par rapport au centroïde de chaque bâtiment et celle des routes sur la base de tronçons de 10 m de longueur. Ainsi, nous partons du postulat que l'altitude n'a pas changé de manière significative entre 1950 et 2011, sauf dans les cas d'intervention humaine ayant modifié l'altitude, comme cela s'observe au Port, où de nombreux bassins ont été creusés à l'emplacement d'anciens bâtiments. Dans ce cas, les unités concernées n'ont pas fait l'objet de traitement et n'ont donc pas de valeur d'altitude.

Degré d'exposition du bâti

L'on compte 0,3 ha de surface bâtie (pour 21 bâtiments) située à moins de 3 m d'altitude en 1950, 2,9 ha (pour 102 bâtiments) en 1978, et enfin 4,2 ha

Figure 20. Degré d'exposition du bâti (en surface) aux aléas météo-marins en fonction de son altitude entre 1950 et 2011 sur l'ensemble de la zone d'étude

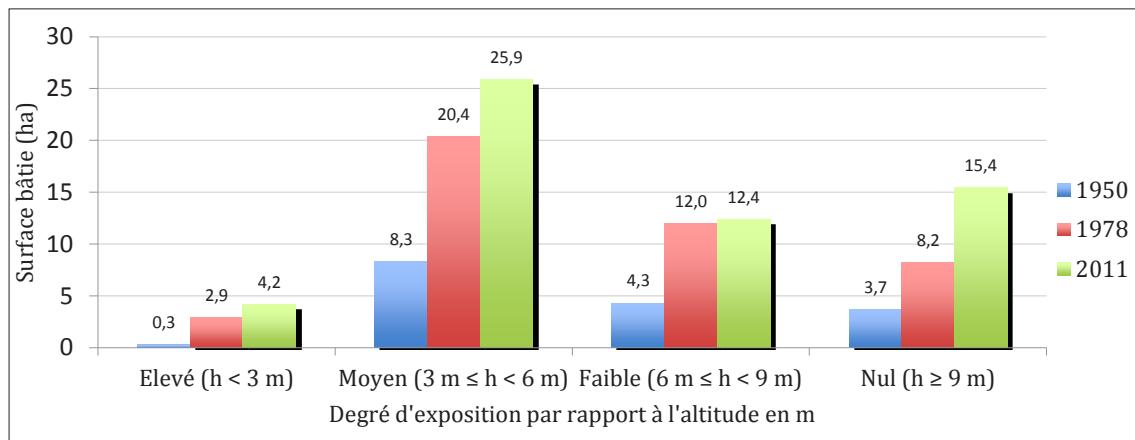
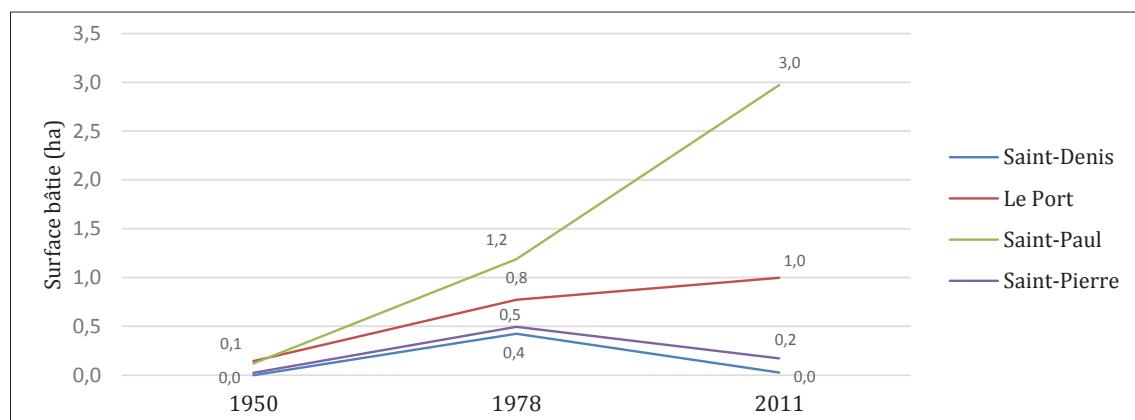


Figure 21. Évolution de la surface bâtie située à moins de 3 m d'altitude par commune entre 1950 et 2011



(pour 265 bâtiments) en 2011 (Figure 20). Cette augmentation de l'exposition du bâti se retrouve également entre 3 et 6 m d'altitude : la surface bâtie située dans cette tranche d'altitude passe en effet de 8,3 ha en 1950 (pour 533 bâtiments) à 25,9 ha en 2011 (pour 1 513 bâtiments).

La surface du bâti situé à moins de 3 m d'altitude a donc fortement augmenté. Une analyse par commune en prenant en compte ce critère (< 3 m d'altitude) permet de dégager trois trajectoires différentes (Figure 21), alors que les quatre communes ont en 1950 une surface bâtie quasi-identique, proche de zéro : 1) les communes de Saint-Denis et de Saint-Pierre connaissent une légère hausse en 1978, puis la courbe baisse pour se rapprocher de zéro ; 2) la commune du Port se caractérise par une légère augmentation, de 0,1 ha en 1950 à 1 ha en 2011 ; 3) enfin, la commune de Saint-Paul

se distingue par une hausse très forte, de 0,1 ha en 1950 (pour 13 bâtiments) à 3 ha en 2011 (pour 229 bâtiments).

L'évolution du bâti situé entre 3 et 6 m d'altitude est également inégale en fonction des communes (Tableau 6). Cette évolution est linéaire à Saint-Paul et c'est aussi la plus importante : la surface bâtie passe de 2,4 ha en 1950 (pour 188 bâtiments), à 7,3 ha en 1978 (pour 475 bâtiments) et à 12 ha en 2011 (pour 945 bâtiments). La surface bâtie augmente dans des proportions moindres au Port et à Saint-Pierre, avec respectivement 2,1 et 1,9 ha en 1950, puis 5,2 et 6,4 ha en 2011. Enfin à Saint-Denis, cette surface augmente dans un premier temps (1,9 ha en 1950 à 3,7 ha en 1978) pour ensuite diminuer et atteindre 2,3 ha en 2011. Le Tableau de résultats détaillés est fourni ci-après :

Tableau 6. Degré d'exposition du bâti (unités + surface bâtie) aux aléas météo-marins en fonction de leur altitude par commune entre 1950 et 2011

	Saint-Denis	Le Port	Saint-Paul	Saint-Pierre	Total					
Degré d'exposition	Nomb re	Surface (ha)	Nomb re	Surface (ha)	Nomb re	Surface (ha)	Nomb re	Surface (ha)	Nomb re	Surface (ha)
1950										
Elevé	0	0,00	2	0,14	13	0,12	6	0,02	21	0,28
Moyen	38	1,88	19	2,14	188	2,43	288	1,86	533	8,31
Faible	42	1,47	33	1,36	39	0,35	109	1,13	223	4,31
Nul	44	1,93	25	0,48	13	0,12	83	1,15	165	3,68
No Data	0	0,00	18	0,24	0	0,00	0	0,00	18	0,24
Total	124	5,28	97	4,36	253	3,02	486	4,16	960	16,82
1978										
Elevé	3	0,42	13	0,77	83	1,19	3	0,49	102	2,87
Moyen	90	3,69	28	4,37	475	7,27	180	5,03	773	20,36
Faible	77	3,01	35	3,66	134	2,01	137	3,32	383	12,00
Nul	34	2,06	62	1,68	40	0,46	273	4,00	409	8,20
Total	204	9,18	138	10,48	732	10,93	593	12,84	1 667	43,43
2011										
Elevé	3	0,03	23	1,00	229	2,97	10	0,17	265	4,17
Moyen	113	2,29	51	5,15	945	12,03	404	6,40	1 513	25,87
Faible	89	2,68	56	3,31	254	3,25	221	3,13	620	12,37
Nul	44	1,41	84	3,53	120	1,35	512	9,12	760	15,41
Total	249	6,41	214	12,99	1 548	19,60	1147	18,82	3 158	57,82

Degré d'exposition des routes

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la longueur du réseau routier a augmenté entre 1950 et 2011, quel que soit le niveau d'exposition retenu. Les routes situées à moins de 3 m d'altitude, donc les plus exposées, ont une longueur de 3,9 km en 1950 et de 12,6 km en 2011 (Figure 22). Le réseau routier situé entre 3 et 6 m d'altitude passe de 20,1 km en 1950 à 49,7 km en 2011.

L'analyse à l'échelle des communes fait apparaître la forte exposition des routes dans la commune de Saint-Paul. En 1950, la longueur du réseau routier

situé à moins de 3 m d'altitude atteint 3,6 km contre 9 km en 2011 (Figure 23). La commune du Port a connu également une augmentation importante de son réseau routier fortement exposé, avec 0,01 km en 1950 contre 2,4 km en 2011. Enfin, les communes de Saint-Denis et Saint-Pierre n'ont pas connu de changement majeur quant à l'exposition des routes : respectivement 0,4 et 0,8 km de routes sont situés à moins de 3 m d'altitude en 2011.

Le Tableau de résultats détaillés est fourni ci-dessous (Tableau 7) :

Figure 22. Degré d'exposition des routes (longueur du réseau routier en km) aux aléas météo-marins en fonction de leur altitude entre 1950 et 2011 sur l'ensemble de la zone d'étude

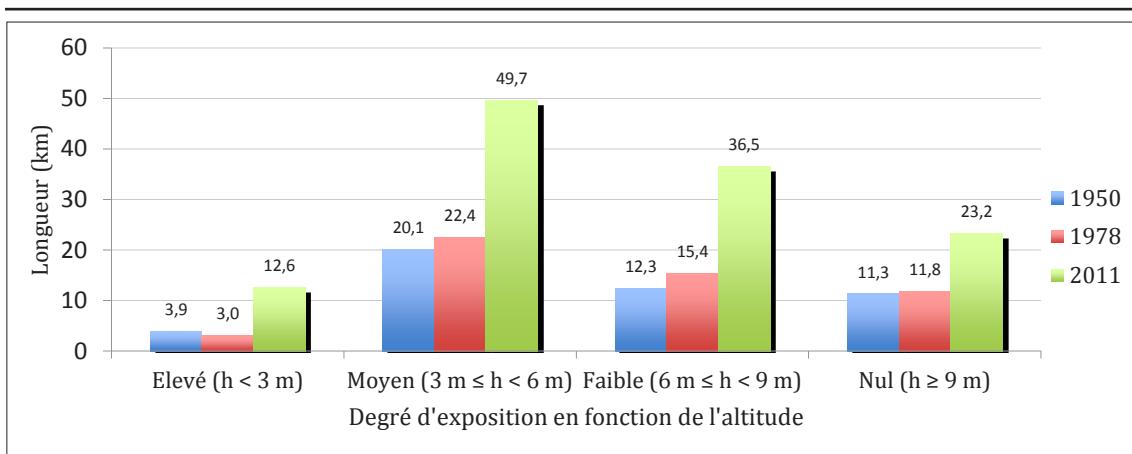
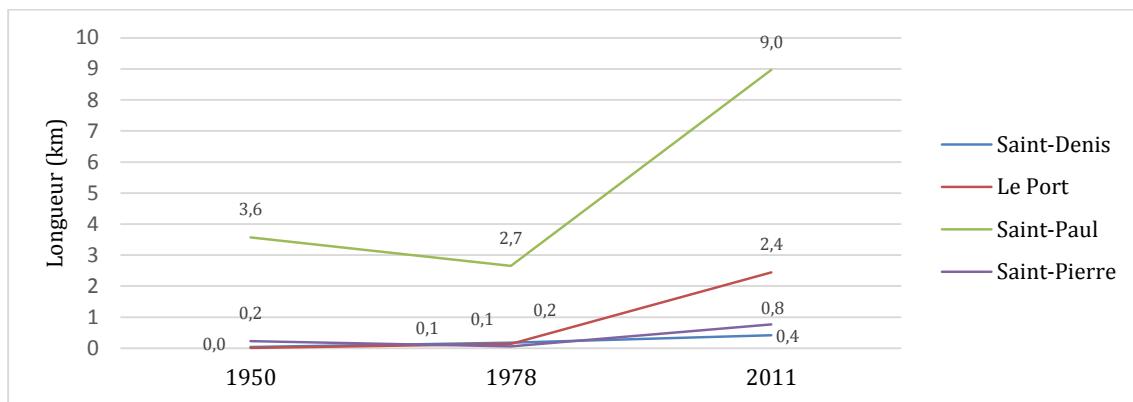


Figure 23 Évolution de la longueur des réseaux routiers situés à moins de 3 m d'altitude par commune entre 1950 et 2011**Tableau 7.** Degré d'exposition des routes aux aléas météo-marins en fonction de leur altitude par commune entre 1950 et 2011

Degré d'exposition	Saint-Denis (km)	Le Port (km)	Saint-Paul (km)	Saint-Pierre (km)	Total (km)
1950					
Elevé	0,04	0,01	3,57	0,23	3,85
Moyen	4,72	1,03	10,20	4,13	20,08
Faible	3,67	1,60	3,98	3,08	12,33
Nul	1,65	0,29	4,83	4,52	11,29
No Data	0,18	0,61	0,46	0,00	1,25
Total	10,26	3,54	23,04	11,96	48,80
1978					
Elevé	0,18	0,13	2,66	0,06	3,03
Moyen	5,22	3,10	7,51	6,60	22,43
Faible	3,45	4,53	3,84	3,53	15,35
Nul	1,65	1,04	4,36	4,71	11,76
No Data	0,01	0,78	0,25	0,00	1,04
Total	10,51	9,58	18,62	14,90	53,61
2011					
Elevé	0,41	2,44	8,97	0,77	12,59
Moyen	11,58	6,78	18,62	12,70	49,68
Faible	9,90	13,10	6,99	6,55	36,54
Nul	3,57	3,24	7,27	9,13	23,21
Total	25,46	25,56	41,85	29,15	122,02

1. En fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude

Degré d'exposition du bâti

Le croisement des paramètres distance au trait de côte et altitude permet de produire des données cartographiques et statistiques synthétiques sur le degré d'exposition aux aléas météo-marins des bâtiments situés dans la bande côtière des 100 m. Ces résultats permettent de déterminer le nombre et la surface totale des bâtiments dont on peut considérer qu'ils sont en situation critique : ici, cette situation est définie par une position inférieure à 30 m du trait de côte et une altitude inférieure à 6 m.

À l'échelle des quatre communes étudiées, la surface bâtie en situation critique est passée de 3,7 ha en 1950 (pour 218 bâtiments) à 9,7 ha en 1978 (pour 264 bâtiments) et à 12,8 ha en 2011 (pour 555 bâtiments). La surface bâtie en situation très critique (- de 30 m du trait de côte et - de 3 m d'altitude) a fortement augmenté depuis 1950 : alors qu'elle ne couvrait que 0,2 ha (pour 9 bâtiments), elle atteint en 2011 1,9 ha pour 74 bâtiments.

L'analyse à l'échelle des communes fait ressortir Le Port, puis Saint-Paul, avec respectivement 5,4 et 4,2 ha de surface bâtie en situation critique en 2011 (Figure 24). Leur évolution est quasi linéaire, contrairement à Saint-Pierre dont la surface bâtie augmente entre 1950 et 1978 pour ensuite stagner autour de 2,7 ha en 2011. Seule la commune de Saint-Denis connaît une baisse, même si celle-ci est très faible (de 0,6 ha en 1950 à 0,4 ha en 2011). Les figures 20 et 21 illustrent ces changements, à Grand Fond (Saint-Paul) et dans le centre-ville de Saint-Pierre.

Le Tableau de résultats détaillés est fourni ci-dessous (Tableau 8) :

Figure 24. Évolution de la surface bâtie en situation critique par commune entre 1950 et 2011

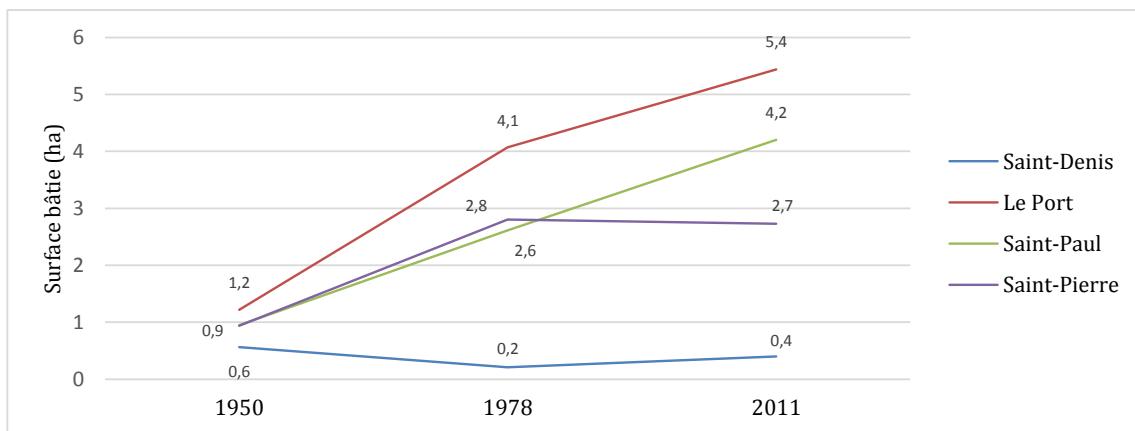


Tableau 8. Degré d'exposition du bâti (nombre d'unités et surface bâtie) en fonction de sa distance au trait de côte et de son altitude par commune entre 1950 et 2011

Commune	x < 30 m et x < 3 m d'altitude		x < 30 m et 3 m < x < 6 m d'altitude		Total au sein du parc résidentiel côtier (bande des 100 m)				
	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surf. (ha)	Nombre	%	Surf. (ha)	%	
1950									
St-Denis	0	0,00	7	0,56	7	6	0,56	11	
Le Port	2	0,14	11	1,08	13	13	1,22	28	
St-Paul	2	0,04	75	0,91	77	30	0,95	31	
St-Pierre	5	0,01	116	0,93	121	25	0,94	23	
Total	9	0,19	209	3,48	218	23	3,67	22	
1978									
St-Denis	0	0,00	10	0,21	10	5	0,21	2	
Le Port	9	0,73	16	3,34	25	18	4,07	39	
St-Paul	17	0,36	141	2,25	158	22	2,61	24	
St-Pierre	1	0,02	70	2,78	71	12	2,80	22	
Total	27	1,11	237	8,58	264	16	9,69	22	
2011									
St-Denis	1	0,00	12	0,40	13	5	0,40	6	
Le Port	19	0,92	34	4,52	53	25	5,44	42	
St-Paul	46	0,78	282	3,42	328	21	4,20	21	
St-Pierre	8	0,16	153	2,57	161	14	2,73	15	
Total	74	1,86	481	10,91	555	18	12,77	18	

Degré d'exposition des routes

À l'échelle des quatre communes étudiées, la longueur des réseaux routiers en situation critique est passée de 6,2 km en 1950, à 23,2 km en 2011. Le réseau routier en situation très critique passe quant à lui de 0,2 km en 1950 à 5,3 km en 2011 (Tableau 9).

Les quatre communes montrent une augmentation de l'exposition des routes depuis 1950 (Figure 27). Cette augmentation est importante

dans la commune du Port, avec 0,1 km de routes en situation critique en 1950 et 5,8 km en 2011. Dans l'ensemble, deux périodes se distinguent clairement: 1) la période 1950-1978 connaît soit une faible hausse (Le Port et Saint-Pierre), soit une baisse (Saint-Denis et Saint-Paul); 2) alors que la période 1978-2011 fait apparaître une forte augmentation.

Le tableau de résultats détaillés est fourni ci-dessous (Tableau 9, page 39) :

Figure 25. Évolution de la bande côtière à Grand Fond et Saint-Gilles, et notamment de l'exposition des enjeux en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude

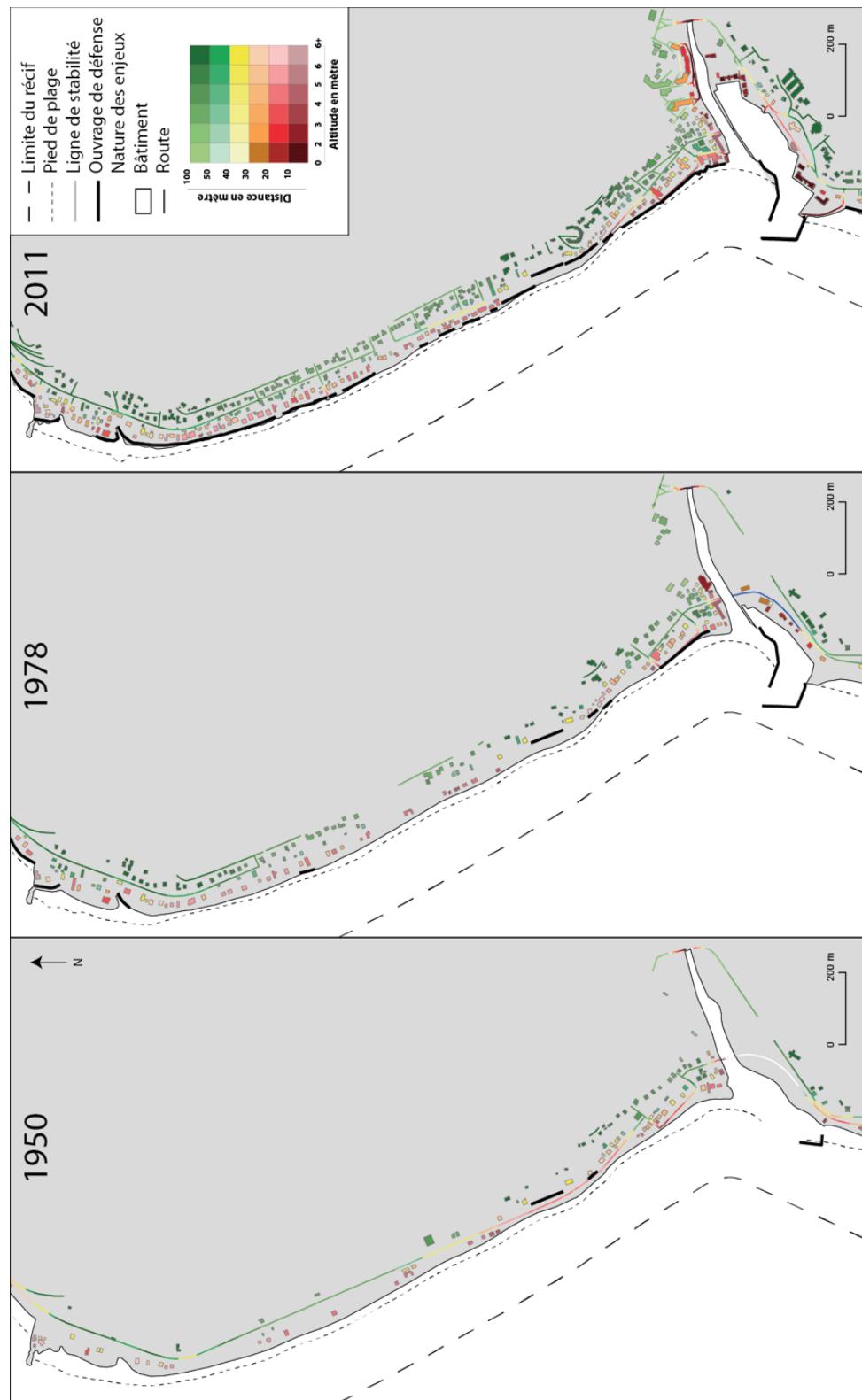


Figure 26. Évolution de la bande côtière au centre-ville de Saint-Pierre et notamment de l'exposition des enjeux en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude

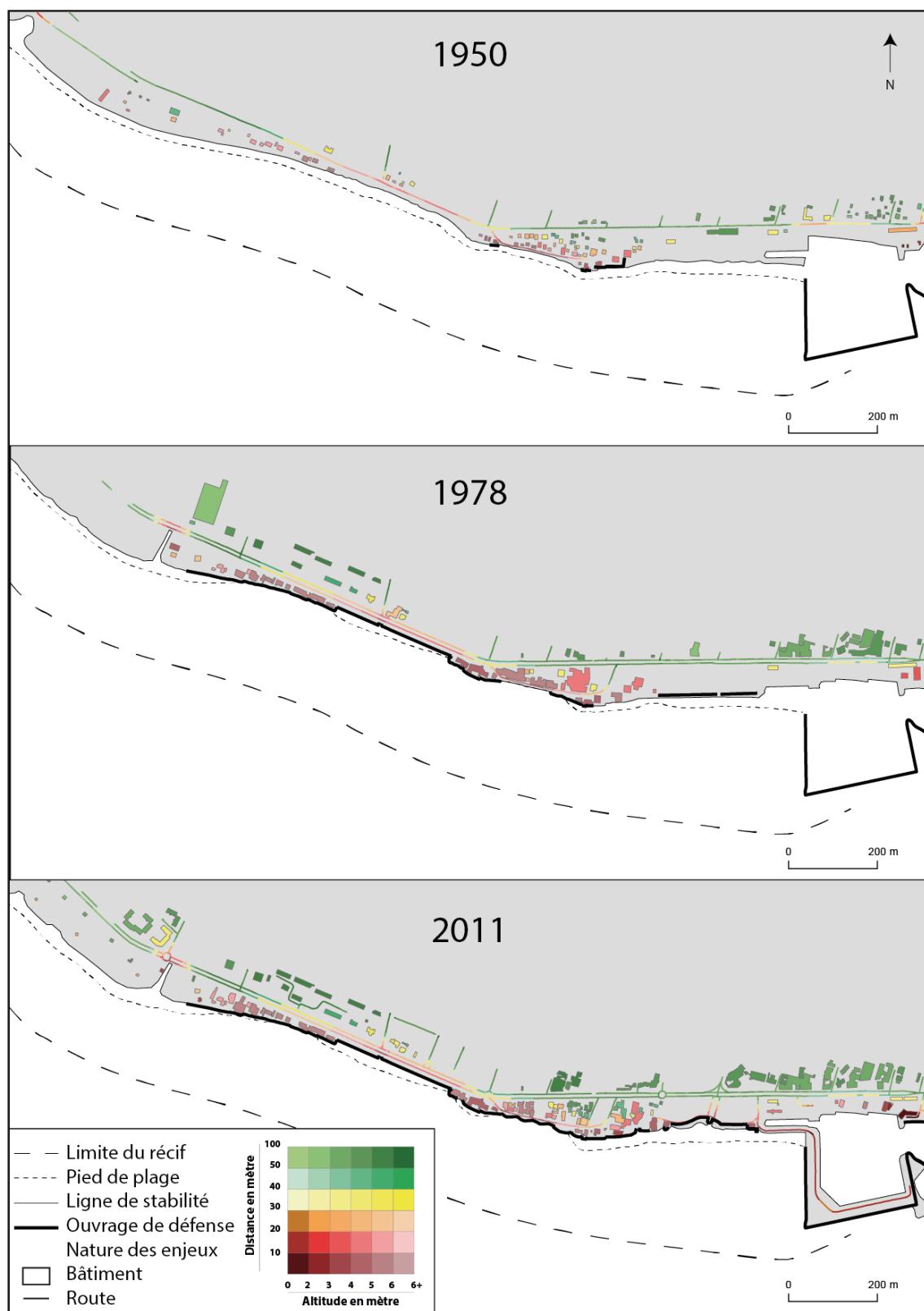
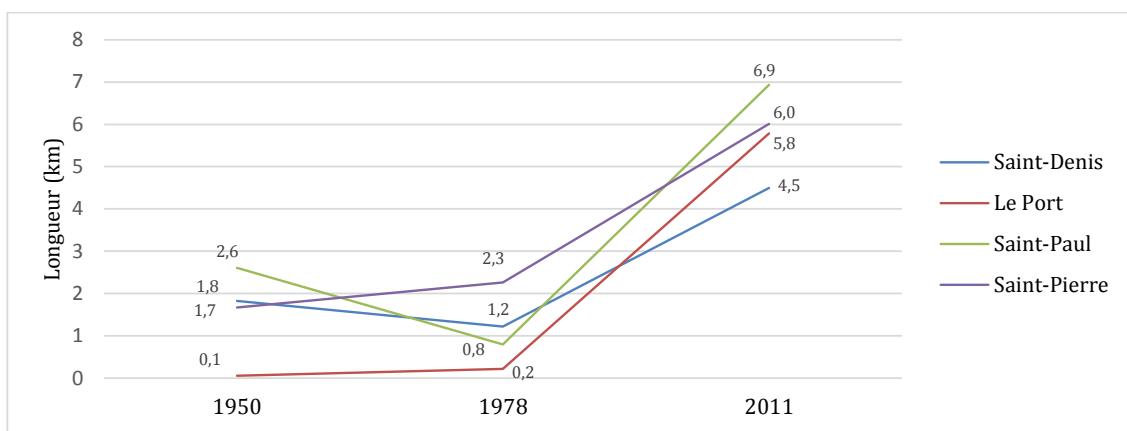


Figure 27. Évolution de la longueur du réseau routier en situation critique par commune entre 1950 et 2011**Tableau 9.** Degré d'exposition des routes en fonction de leur distance au trait de côte et de leur altitude par commune entre 1950 et 2011

Exposition	Saint-Denis (km)	Le Port (km)	Saint-Paul (km)	Saint-Pierre (km)	Total (km)
1950					
x < 30 m et x < 3 m d'altitude	0,01	0,00	0,11	0,06	0,18
x < 30 m et 3 m < x < 6 m d'altitude	1,82	0,05	2,50	1,61	5,98
Total	1,83	0,05	2,61	1,67	6,16
1978					
x < 30 m et x < 3 m d'altitude	0,07	0,02	0,11	0,03	0,23
x < 30 m et 3 m < x < 6 m d'altitude	1,15	0,20	0,69	2,23	4,27
Total	1,22	0,22	0,80	2,26	4,50
2011					
x < 30 m et x < 3 m d'altitude	0,26	1,90	2,48	0,62	5,26
x < 30 m et 3 m < x < 6 m d'altitude	4,24	3,88	4,46	5,39	17,97
Total	4,50	5,78	6,94	6,01	23,23

2.4. Évolution des zones tampon terrestres naturelles

Eléments généraux de définition et de méthode

La zone tampon terrestre « naturelle » (ZTTN) correspond aux espaces non bâtis qui s'étendent entre le pied de plage et les premiers enjeux en dur (route côtière, bâtiments et ouvrages de défense massifs) (Figure 29) implantés sur le littoral (Duvat et Salmon, 2015c). Elle correspond donc aux unités morphologiques littorales émergées qui, parce qu'elles jouent un rôle « tampon » entre les facteurs de pression météo-marins (vagues, principalement) et les enjeux humains (biens et personnes), contribuent à amortir les impacts potentiellement destructeurs des événements météo-marins intenses.

Logiquement, le rôle protecteur de la zone tampon est d'autant plus important que celle-ci est large et qu'elle est peu dégradée par l'homme.

Sur les côtes alluvionnaires et sédimentaires sur lesquelles se concentre cette étude, les unités

morphologiques qui jouent le rôle de zone tampon ont principalement une origine naturelle, et secondairement une origine anthropique. Elles présentent une diversité relativement faible au sein de l'échantillon des 4 communes étudiées et sont principalement constituées de plages de sables et de matériaux plus grossiers de type galets ou débris coralliens (Figure 28) :

- sur le littoral de Saint-Denis, la ZTTN est principalement constituée de plages de galets volcaniques, et la zone tampon anthropique de talus et remblais;
- sur le littoral du Port, la ZTTN correspond à des plages de sables et galets volcaniques. Sur la côte nord du Port, la zone tampon est pour partie artificielle, les plages s'adossant aux buttes de déblai issues de l'aménagement du Port-Est. Au sud du Port-Ouest, la plage s'adosse à un talus de protection qui est également d'origine anthropique;
- sur le littoral de Saint-Paul, la ZTTN est respectivement constituée, au nord et au sud du cap la Houssaye, de plages et de cordons de sables

- et galets volcaniques, et de plages, cordons et dunes de sables et débris coralliens ;
- sur le littoral de Saint-Pierre, la ZTTN prend également la forme de plages de sable et débris coralliens.

Les caractéristiques (nature, largeur, altitude, stabilité, etc.) et le degré d'anthropisation et de perturbation de la ZTTN par l'homme (aménagements, fragmentation, etc.), sont des paramètres majeurs pour appréhender son état à un instant t et l'évolution prévisible de sa fonction de protection.

Plusieurs types de travaux réalisés dans le cadre du projet VulnераRe permettent de rendre compte de l'état et de la fonction de protection de la ZTTN :

- sa cartographie permet d'appréhender sa nature et son degré de développement au devant des enjeux humains exposés aux aléas météo-marins ;
- la cartographie des pressions anthropiques qui s'exercent sur la ZTTN fournit des éléments sur le risque de dégradation de celle-ci et d'affaiblissement de sa fonction de protection ;
- la réalisation de profils topographiques de la ZTTN permet de mettre en évidence ses variations de largeur, d'altitude et de volume. Elle permet à ce titre d'apprécier la variation spatiale de la fonction de protection qu'elle fournit ;
- l'analyse de l'évolution de la ZTTN à partir de travaux cartographiques et de traitements statistiques fournit des éléments sur l'évolution de sa fonction d'amortissement. Une telle analyse est par ailleurs complémentaire de la mesure de l'évolution de la position du trait de côte pour appréhender l'évolution de l'exposition des enjeux humains côtiers.

L'analyse de la ZTTN s'est appuyée sur une caractérisation fine de ses composantes pour l'actuel (localisation, nature, dimensions, état – voir Duvat et Salmon, 2015b), puis a consisté en un travail de photo-interprétation basé sur le traitement des photographies aériennes de 1950 et de 1978. La méthode utilisée pour délimiter la ZTTN a consisté, sur la base des cellules sédimentaires retenues dans le cadre d'une analyse de l'évolution du trait de côte (Duvat et Salmon, 2015), à s'appuyer d'une part sur le pied de plage (schématiquement, le contact terre-mer), qui correspond à la limite inférieure de la zone tampon, et d'autre part sur la limite des enjeux en dur, qui constitue sa limite supérieure.

En largeur, la ZTTN a été divisée en deux entités, la zone active et la zone stabilisée. Ces deux entités sont séparées par la ligne de stabilité qui, comme on l'a vu dans la section 2.1, correspond à la limite de la végétation ou des ouvrages de défense, selon les cas (Figure 29). Là où ces ouvrages sont massifs

et ont pour fonction de protéger les enjeux face aux aléas (ce qui est le cas des ouvrages d'ingénierie construits « dans les règles de l'art »), ils ont été intégrés à la zone tampon stabilisée (cas des cordons de tétrapodes du Port, par exemple). La zone active, qui s'étend du pied de plage à la ligne de stabilité, correspond à la partie du système alluvionnaire ou sédimentaire qui est remaniée au quotidien sous l'effet des vagues, des courants côtiers, de la marée et du vent. Elle n'est pas végétalisée et elle inclut, en termes morphologiques, le bas de plage et la plage. La zone stabilisée, là où elle est naturelle, est en général végétalisée et correspond au haut de plage ou à la dune. Ses matériaux ne sont remis en mouvement que pendant les événements météo-marins intenses, tels que les houles australes et les cyclones. Sur les sites fortement anthropisés et qui concentrent des enjeux majeurs (zones industrialo- portuaires, par exemple), la zone tampon stabilisée peut être constituée d'ouvrages de défense massifs, comme on peut l'observer au Port (cordons de tétrapodes). Distinguer ces deux composantes morphologiques et écologiques de la ZTTN permet de mettre en évidence d'une part, sa structure, et d'autre part, l'importance des pressions anthropiques qu'elle subit – très fortes dans le cas où la ZTTN n'est plus constituée que de la partie active et dans celui où elle est intégralement constituée d'un ouvrage de défense massif.

Figure 28. Exemples d'unités morphologiques jouant le rôle de zone tampon à la Réunion. A) Plage de galets volcaniques sur laquelle un talus a été édifié par l'homme et fixé par un cordon d'encochemement, à Saint-Denis. B) Plage de sables et galets volcaniques au-devant des buttes de déblai issues du creusement des bassins du Port-Est. C) Cordons de sables et de galets volcaniques situé dans la partie centrale de la baie de Saint-Paul. D) Plage de sables et débris coralliens situé au sud du cap Homard. E) Plage de sables et débris coralliens adossée à une petite dune végétalisée à la Ravine Blanche à Saint-Pierre.

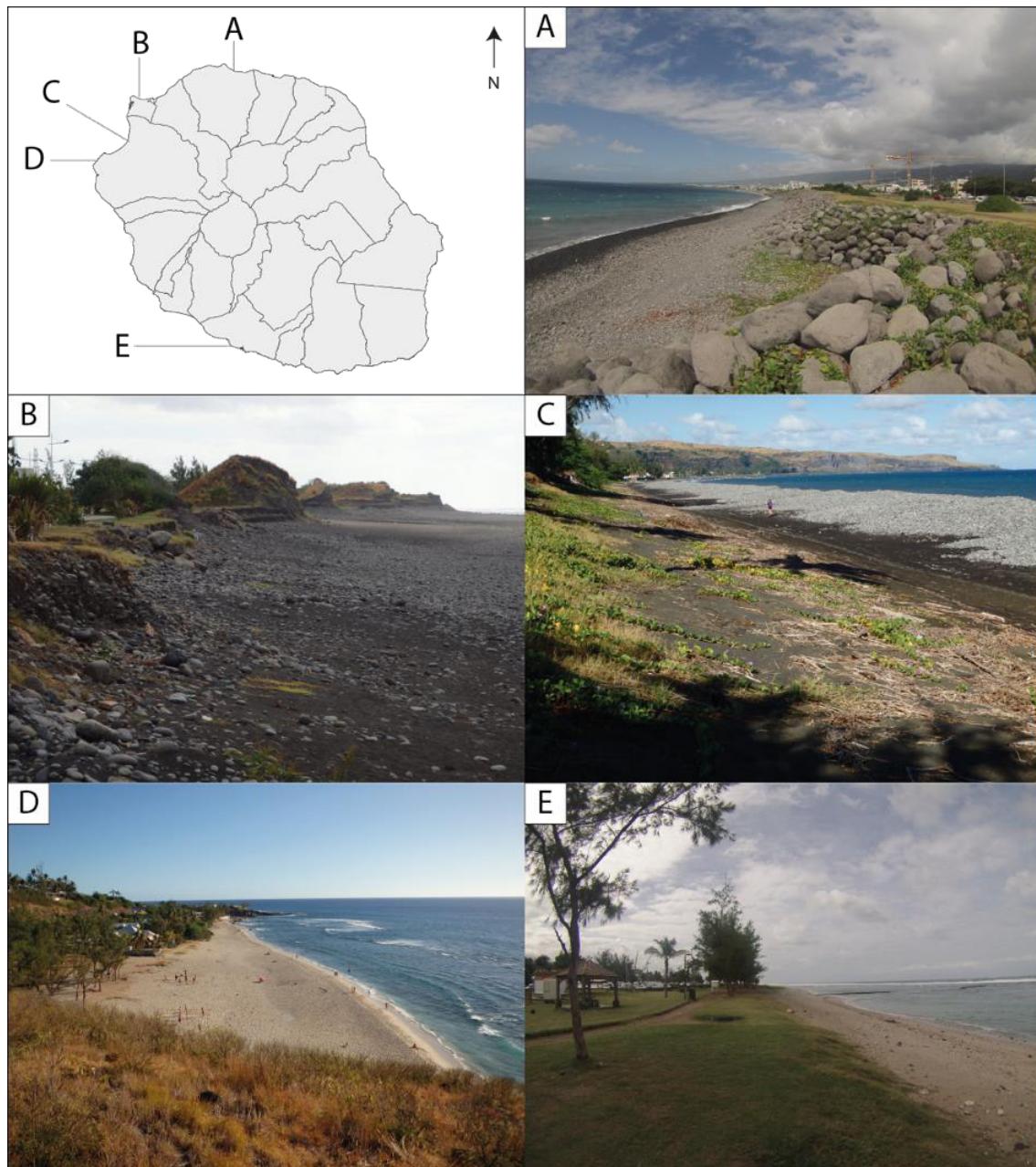
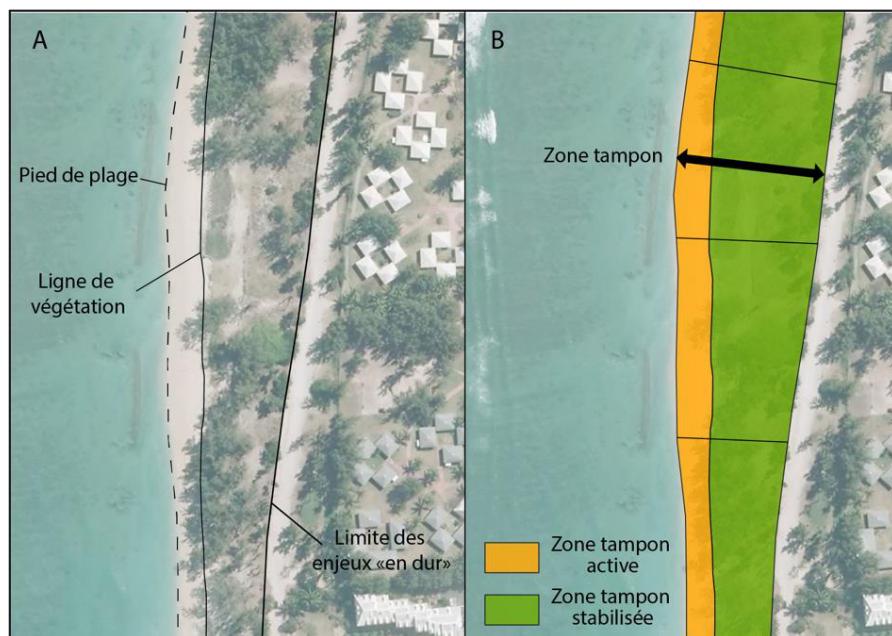


Figure 29. À partir des indicateurs de trait de côte et de la limite des enjeux en dur (A), les zones tampons ont été créées (B)



2.4.1. Résultats généraux

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la surface de la ZTTN a considérablement diminué, passant de 673,3 ha en 1950 à 208,4 ha en 2011 (Tableau 10), ce qui représente une perte nette de 465 ha (- 69 %) soit 7,6 ha/an (Tableau 11). Cette baisse s'est opérée principalement au détriment de la zone tampon stabilisée dont la surface est passée de 465,7 ha en 1950 à 110,3 ha en 2011 (Figure 30), ce qui représente une perte de 355,4 ha (-76%). La perte affectant la zone tampon active s'élève à 46,5 ha. En 1950, la surface de la zone tampon stabilisée représentait 69 % de la surface totale des ZTTN, contre 53 % en 2011. Entre 1950 et 2011, 5,8 ha de zone tampon stabilisée disparaissaient chaque année, contre 0,8 ha de zone tampon active.

Le Tableau 10 de résultats détaillés est fourni ci-après.

L'érosion de la zone tampon s'est opérée principalement entre 1950 et 1978, période au cours de laquelle 400 ha de ZTTN (395,8 ha) ont disparu (Tableau 11), qui représentent les trois quarts des pertes observées sur la période 1950-2011. Entre 1950 et 1978, la surface totale de ZTTN diminue à une vitesse de 14,1 ha/an, contre 2,8 ha/an entre 1978 et 2011. La zone tampon active s'est également fortement contractée entre 1950 et 1978, puisque 91 % des changements mesurés entre 1950 et 2011 se sont produits pendant cette période.

Figure 30. Évolution de la surface et de la structure des zones tampons sur l'ensemble de la zone d'étude entre 1950 et 2011

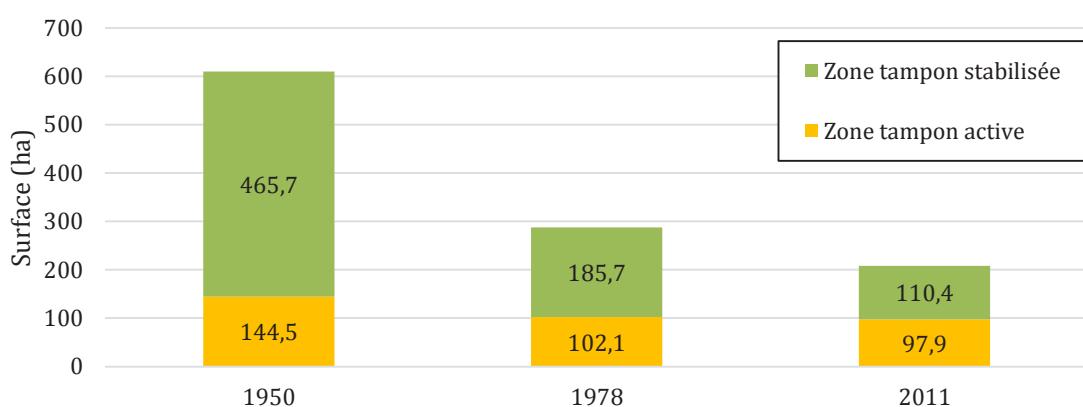


Tableau 10. Évolution de la surface des zones tampons sur l'ensemble de la zone d'étude entre 1950 et 2011

	Zone tampon active	Zone tampon stabilisée	Non déterminé*	Total					
Année	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
1950	144,46	22	465,71	69	63,15	9	673,32	100	
1978	102,07	35	185,66	65	/	/	287,73	100	
2011	97,92	47	110,43	53	/	/	208,35	100	

*La ligne de stabilité qui sépare la zone tampon active de la zone tampon stabilisée n'a pas pu être tracée en 1950 dans l'un des secteurs étudiés de la commune du Port (à proximité de la pointe des Galets), ce qui explique pourquoi nous avons 63,2 ha de zone tampon non déterminée.

Tableau 11. Évolution de la surface des zones tampons et vitesse des changements en ha/an par période.

	Zone tampon active	Zone tampon stabilisée	Total					
Période	Évolution (ha)	Taux d'évolution (ha/an)	Évolution (ha)	Taux d'évolution (ha/an)	Évolution (ha)	Taux d'évolution (ha/an)		
1950-1978	- 42,39	- 1,51	- 280,05	- 10	- 385,59	- 13,77		
1978-2011	- 4,15	- 0,13	- 75,23	- 2,28	- 79,38	- 2,41		
1950-2011	- 46,54	- 0,76	- 355,28	- 5,82	- 464,96	- 7,62		

NB. La zone tampon non déterminée de 1950 n'est pas détaillée dans les deux premières colonnes, mais comptabilisée dans le total.

Cette contraction de la zone tampon se traduit également par une baisse significative de la largeur maximale observée, qui passe de 1 505 m en 1950 (valeur mesurée dans la commune de Saint-Paul) à 291 m en 2011 (toujours dans la commune de Saint-Paul).

Ces résultats montrent donc, d'une part, que c'est entre 1950 et 1978 que les changements ont été les plus marqués et, d'autre part, que c'est la zone tampon stabilisée qui a perdu le plus de surface.

2.4.2. Résultats par commune

Saint-Denis

Saint-Denis, dont l'emprise spatiale retenue s'étend de l'embouchure de la rivière des Pluies à celle de la rivière Saint-Denis (ce qui correspond à 6,2 km de linéaire côtier), a connu une baisse de surface de sa zone tampon de 10,4 ha entre 1950 et 2011. Les espaces naturels littoraux couvraient donc une faible superficie dès 1950, puisque seulement 36,6 ha de zone tampon sont recensés à cette date. Cette constatation se confirme quand on regarde l'évolution de l'indice de zone tampon (= la surface de zone tampon divisée par la longueur de côte étudiée), qui n'était que de 5,9 ha/km de côte en 1950 et qui est passé à 4,2 ha/km de côte en 2011.

La structure de la ZTTN a fortement évolué : la zone tampon active a perdu le plus de surface, passant de 26,4 ha en 1950 à 9,6 ha en 2011, alors que sur la même période la surface de la zone tampon stabilisée est passée de 10,2 ha à 16,6 ha (Figure 31A). En 1950, la ZTTN dans son ensemble

était composée à 72 % de zone tampon active, contre 28 % en 2011.

Enfin, l'on constate à Saint-Denis une augmentation de la largeur maximale de la zone tampon. Alors que celle-ci était de 110 m en 1950, elle atteint en 2011 plus de 160 m (Tableau 12).

Le Port

L'emprise spatiale retenue pour le Port s'étend du cordon d'enrochement du terminal de conteneurs (exclu) à l'embouchure de la rivière des Galets (exclue), ce qui donne un linéaire côtier de 5,7 km de long. Cette commune a connu d'importants changements au cours des dernières décennies, qui se répercutent sur l'évolution de sa ZTTN. La surface de cette dernière a diminué de 127,1 ha entre 1950 et 2011, passant de 242,6 ha à 42,5 ha, ce qui représente une baisse de 82 % et une perte de 3,3 ha/an (Tableau 13). L'indice de zone tampon a très largement diminué, puisqu'il est passé de 43,3 ha/km en 1950 à 13,8 ha/km en 1978, puis à 7,5 ha/km en 2011.

L'évolution de la largeur minimale de la zone tampon traduit bien ce phénomène de contraction, celle-ci passant de 63 m en 1950 à 14 m en 1978. La largeur maximale mesurée est de 1 218 m en 1950, de 1 425 m en 1978 et de 223 m en 2011.

On observe par ailleurs dans ce secteur un changement de la structure de la ZTTN. En 1950, la zone tampon stabilisée représentait 58 % de la ZTTN avec 140,5 ha, alors que la zone tampon active possédait une surface de 38,9 ha (Figure 31B). En 2011, la zone tampon stabilisée représente 32 % de la surface totale avec 13,4 ha, ce qui représente une

Tableau 12. Évolution de la structure de la zone tampon par commune entre 1950 et 2011

	Linéaire côtier concerné	ZTTN	Zone tampon active	Zone tampon stabilisée	Largeur minimale	Largeur maximale	Indice de zone tampon		
Commune	km	ha	ha	%	ha	%	m	m	ha/km de côte
1950									
Saint-Denis	6,2	36,57	26,38	72	10,19	28	10	107	5,9
Le Port	5,6	242,56	38,90	16	140,51	58	63	1218	43,3
Saint-Paul	18,7	376,25	71,90	19	304,35	81	5	1505	20,1
Saint-Pierre	3,2	17,94	7,28	41	10,66	59	9	104	5,6
Total	33,7	673,32	144,46	21	465,71	69	5	1505	20,0
1978									
Saint-Denis	6,2	32,63	12,40	38	20,23	62	6	172	5,3
Le Port	5,6	77,10	31,25	41	45,85	59	30	1425	13,8
Saint-Paul	18,7	161,11	53,70	33	107,41	67	12	810	8,6
Saint-Pierre	3,2	16,89	4,72	28	12,17	72	3	173	5,3
Total	33,7	287,73	102,07	35	185,66	65	3	1425	8,5
2011									
Saint-Denis	6,2	26,20	9,56	36	16,64	64	4	165	4,2
Le Port	5,7	42,52	29,11	68	13,41	32	14	223	7,5
Saint-Paul	18,7	130,21	53,38	41	76,83	59	4	291	7,0
Saint-Pierre	3,3	9,42	5,87	62	3,55	38	0	85	2,9
Total	33,9	208,35	97,92	47	110,43	53	0	291	6,1

NB. La zone tampon non déterminée de 1950 n'est pas incluse dans ces calculs.

perte de 127,1 ha (- 90 %). C'est également pendant la période 1950-1978 que la contraction de la ZTTN a été la plus marquée (- 5,9 ha/an).

Saint-Paul

C'est dans la commune de Saint-Paul, dont le linéaire côtier étudié est le plus long de notre échantillon (18,8 km), que l'on trouve les plus grandes superficies de ZTTN, et ce aux trois dates considérées. On y observe cependant également la plus forte réduction de surface, puisqu'on compte 376,3 ha de ZTTN en 1950, contre 130,2 ha en 2011, ce qui représente une perte de 246 ha et de 65 %. La largeur maximale observée est passée de 1 505 m en 1950 à 291 m en 2011, illustrant ce phénomène de contraction. L'indice de zone tampon a largement diminué : il était de 20,1 ha/km en 1950, puis de 8,6 ha/km en 1978, pour atteindre 7 ha/km en 2011.

En 1950, Saint-Paul était constitué à 81 % de zone tampon stabilisée avec 304,4 ha (Figure 31C). Cette valeur a chuté de 75 % pour s'établir à 76,8 ha en 2011 et ne plus représenter que 59 % de la ZTTN dans son ensemble. Dans le même temps, la zone tampon active est passée de 71,9 ha à 53,5 ha (- 25 %). La baie de Saint-Paul, le secteur de Grand Fond ou encore la plage de la Saline, illustrent bien ce phénomène de contraction qui se traduit dans certains secteurs par une quasi-disparition de la zone tampon stabilisée (Figure 33).

Près de 80 % des changements observés se sont produits entre 1950 et 1978, période au cours

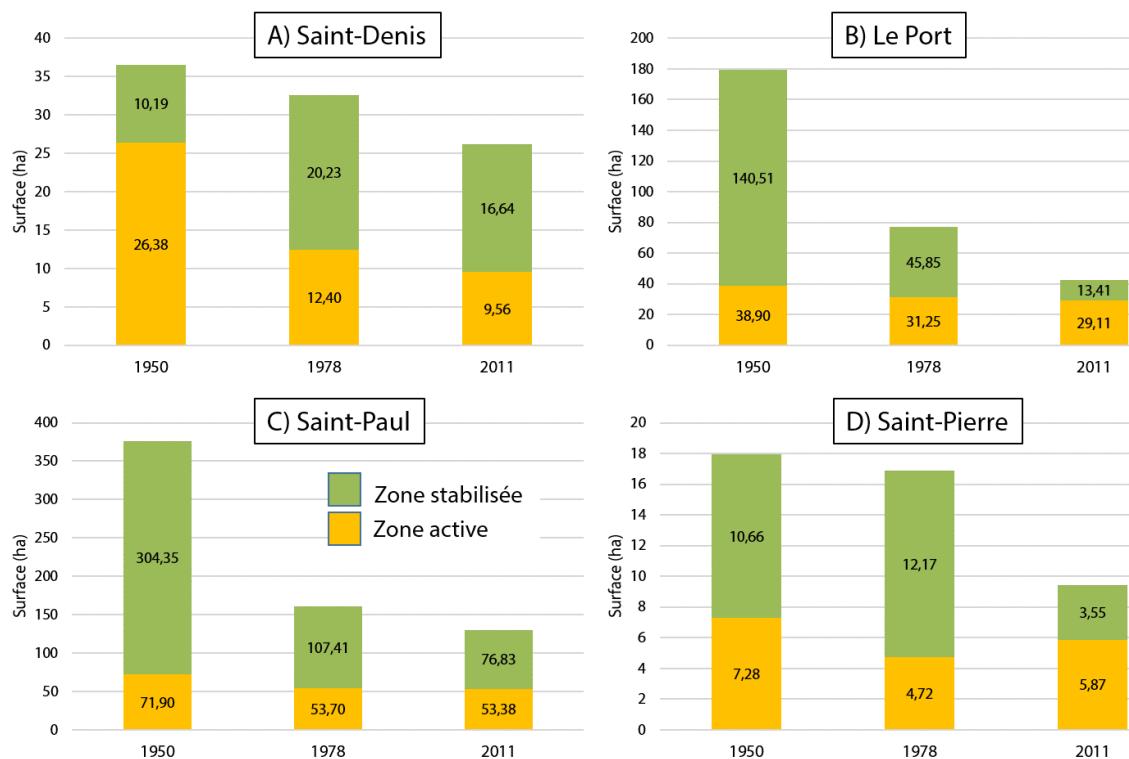
de laquelle la zone tampon passe de 376,3 ha à 161,1 ha, ce qui représente une perte de 215,2 ha (- 7,7 ha/an). La période 1978-2011 montre une évolution nettement moins rapide, avec 30,9 ha de perte équivalant à un taux de recul moyen de - 0,9 ha/an (Tableau 13).

Saint-Pierre

L'analyse de l'évolution de la zone tampon de la commune de Saint-Pierre a été effectuée pour un linéaire côtier de 3,3 km, comprenant le centre-ville de Saint-Pierre ainsi que le secteur de Grand Bois plus à l'est. La surface de la zone tampon passe de 18 ha en 1950 à 9,4 ha en 2011, ce qui représente une perte de 8,6 ha (- 48 %) et un taux de recul de 0,14 ha/an. Ce changement moins marqué qu'au Port ou à Saint-Paul s'explique par l'état de contraction déjà important de la zone tampon en 1950. En effet, l'indice de zone tampon y était déjà faible avec 5,6 ha/km. Cet indice passe à 5,3 ha/km en 1978 et atteint 2,9 ha/km en 2011, ce qui est le plus faible indice des quatre communes étudiées.

L'évolution des largeurs minimale et maximale conforte ce constat de changements modérés : de 9 à 7 m pour la largeur minimale mesurée en 1950 et 2011, respectivement, et de 104 à 85 m pour la largeur maximale.

L'évolution de la structure de la zone tampon (Figure 31D) fait apparaître un recul plus important de la zone tampon stabilisée, puisque celle-ci représentait 60 % de la surface de la ZTTN en 1950,

Figure 31. Évolution de la surface et de la structure de la zone tampon par commune entre 1950 et 2011

avec 10,7 ha, et n'en constitue plus que 38 % en 2011 (3,6 ha). Cette évolution n'a pas été linéaire, comme le montrent les valeurs de 1978, avec une zone tampon stabilisée atteignant les 12,2 ha.

2.4.3. Synthèse

Ainsi, deux grands types de situations se dessinent. La première caractérise les centres urbains anciens comme Saint-Pierre et Saint-Denis qui, dès 1950, présentent une forte emprise de l'urbanisation sur les espaces naturels littoraux. L'évolution qu'a connue la zone tampon entre 1950 et 2011 y est moins importante que sur les côtes plus récemment urbanisées, comme celles de Saint-Paul et du Port (Figure 33). En revanche, lorsque l'on étudie la structure de la ZTTN des vieux centres urbains de Saint-Denis et de Saint-Pierre, on observe des évolutions notables. La zone tampon stabilisée, par exemple, a vu sa surface augmenter à Saint-Denis du fait de travaux d'aménagement du front de mer ayant conduit à la création de remblais et de talus,

et ce au détriment de la zone tampon active. La zone tampon stabilisée de Saint-Denis constitue aujourd'hui une zone de loisirs en grande partie végétalisée et que l'on peut considérer comme étant pérenne, étant données les valeurs paysagère et fonctionnelle de ce type d'espace dans les centres urbains.

La seconde situation que l'on observe est celle du Port et de Saint-Paul, où la surface de la ZTTN, et en particulier celle de la zone tampon stabilisée, a connu une baisse considérable depuis 1950. Le développement des activités industrielo-portuaires et commerciales explique cet empiètement des activités humaines au Port. Dans le cas de Saint-Paul, c'est la forte attractivité résidentielle et le développement du tourisme qui expliquent l'érosion des zones tampons. La Figure 33 illustre ce phénomène de littoralisation contemporain, à travers un processus de compression côtière, c'est-à-dire de contraction, des espaces naturels.

Tableau 13. Évolution de la surface de la zone tampon par commune et par période

	1950-1978	1978-2011	1950-2011	ha	%	ha/an	ha	%	ha/an
	ha	%	ha/an						
Saint-Denis									
ZTTN-A	- 13,98	- 53	- 0,50	- 2,84	- 23	- 0,09	- 16,82	- 64	- 0,28
ZTTN-S	+ 10,04	+ 99	+ 0,36	- 3,59	- 18	- 0,12	+ 6,45	+ 63	+ 0,11
ZTTN	- 3,94	- 11	- 0,14	- 6,43	- 20	- 0,21	- 10,37	- 28	- 0,17
Le Port									
ZTTN-A	- 7,65	- 20	- 0,27	- 2,14	- 7	- 0,07	- 9,79	- 25	- 0,16
ZTTN-S	- 94,66	- 67	- 3,38	- 32,44	- 71	- 1,05	- 127,10	- 90	- 2,08
ND	- 63,15	/	- 2,26	/	/	/	/	/	/
ZTTN	- 165,46	- 68	- 5,91	- 34,58	- 45	- 1,12	- 200,04	- 82	- 3,28
Saint-Paul									
ZTTN-A	- 18,20	- 25	- 0,65	- 0,32	0	- 0,01	- 18,52	- 26	- 0,30
ZTTN-S	- 196,94	- 65	- 7,03	- 30,58	- 28	- 0,99	- 227,52	- 75	- 3,73
ZTTN	- 215,14	- 57	- 7,68	- 30,90	- 19	- 1,00	- 246,04	- 65	- 4,03
Saint-Pierre									
ZTTN-A	- 2,56	- 35	- 0,09	+ 1,15	+ 24	0,04	- 1,41	- 19	- 0,02
ZTTN-S	+ 1,51	+ 14	+ 0,05	- 8,62	- 71	- 0,28	- 7,11	- 67	- 0,12
ZTTN	- 1,05	- 6	- 0,04	- 7,47	- 44	- 0,24	- 8,52	- 47	- 0,14
TOTAL									
ZTTN-A	- 42,39	- 29	- 1,51	- 4,15	- 4	- 0,13	- 46,54	- 32	- 0,76
ZTTN-S	- 280,05	- 60	- 10,00	- 75,23	- 41	- 2,28	- 355,28	- 76	- 5,82
ZTTN	- 385,59	- 57	- 13,77	- 79,38	- 28	- 2,41	- 464,96	- 69	- 7,62

NB. La zone tampon non déterminée de 1950 n'est pas incluse dans ces calculs.

Figure 32. Évolution de l'indice de zone tampon par commune entre 1950 et 2011

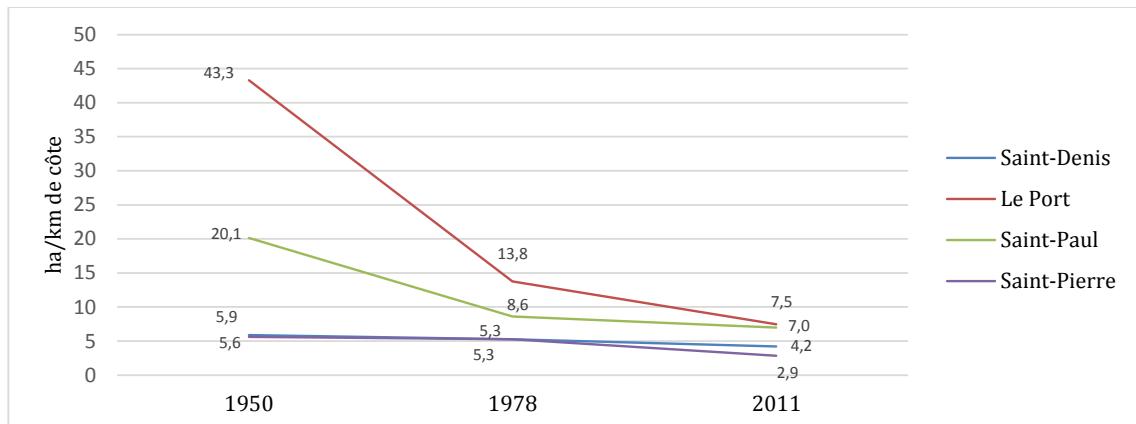
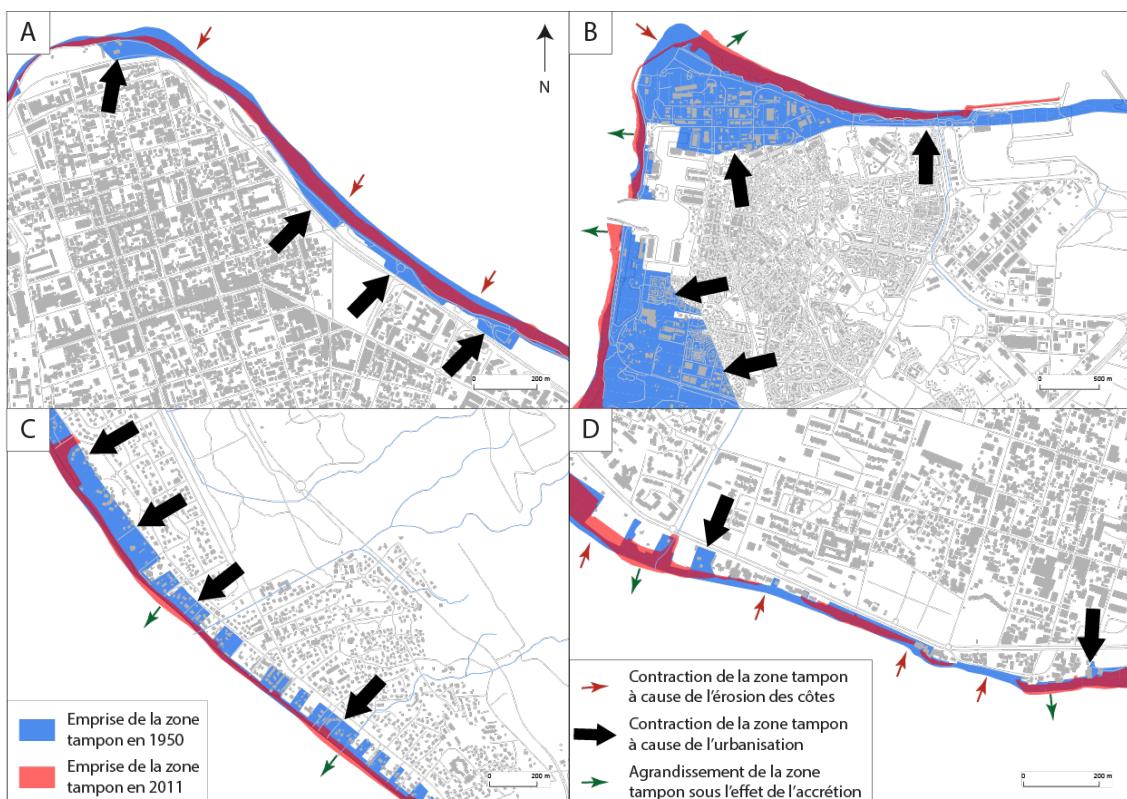


Figure 33. Évolution de la zone tampon entre 1950 et 2011. Exemples de cas de figures rencontrés à : A) Saint-Denis ; B) Le Port ; C) La Saline-les-Bains (Saint-Paul) ; D) Saint-Pierre, à proximité du centre-ville.



2.5. Évolution de la protection des enjeux

2.5.1. Éléments généraux de définition et de méthode

Est considéré comme ouvrage de défense tout ouvrage d'ingénierie ou de maçonnerie jouant un rôle protecteur pour les enjeux exposés aux aléas marins (érosion, submersion, destruction par les vagues de tempête) (Duvat et Salmon, 2015c). Sont par conséquent inclus les ouvrages de défense longitudinaux (cordons d'enrochements et de tétrapodes, murs de protection, etc.), les ouvrages d'ingénierie portuaire (jetées, en particulier) et des constructions ayant d'autres fonctions (murs et murets de limite de propriété, notamment), mais jouant un rôle protecteur au devant des biens exposés. Ces ouvrages ont été édifiés, selon les cas, par des acteurs publics et/ou privés.

La donnée actuelle (créeée à partir de relevés de terrain datant de 2013) a été dupliquée, puis mise à jour dans ArcGis pour produire les situations de 1950 et 1978. Il s'agissait de supprimer les ouvrages non visibles sur les photographies aériennes anciennes, et de numériser d'éventuels ouvrages présents dans le passé et qui n'existent plus en 2011. Seuls les ouvrages détectables ont été conservés.

ou créés. Le travail de photo-interprétation qui a été réalisé induit une sous-estimation globale du nombre total d'ouvrages, par omission des plus petits d'entre eux et de ceux qui sont masqués par la végétation côtière. Ceci étant, les principaux ouvrages d'ingénierie lourde sont facilement identifiables, ce qui permet de dégager quelques éléments de réflexion sur l'évolution de la protection des enjeux. Ces données ont été produites à l'échelle des côtes meubles des communes d'étude, sur un linéaire côtier total d'environ 41 km.

2.5.2. Résultats généraux

Sur l'ensemble de la zone d'étude, on recensait en 1950 23 ouvrages de défense pour une longueur de 3,6 km (Tableau 14). Si l'on défalque les ouvrages transversaux comme les épis et les jetées, cette longueur passe à 2,4 km, ce qui donne 5,9 % de linéaire côtier équipé d'ouvrages de défense. Le nombre d'ouvrages recensé en 1978 passe à 65 pour une longueur de 6,9 km. La part du linéaire côtier équipé d'ouvrages atteint 13,4 % (5,5 km). On observe ensuite une accélération du processus de protection des enjeux, 216 ouvrages protégeant 20,5 km de linéaire côtier ayant été recensés en 2013, ce qui donne un linéaire côtier équipé d'ouvrages de 18,3 km représentant 44,2 % du linéaire

côtier total. C'est donc pendant la période 1978-2011 que les changements relatifs à cet indicateur ont été les plus marqués. Mais l'augmentation du linéaire côtier équipé d'ouvrages d'ingénierie ne se traduit pas nécessairement par une réduction de la vulnérabilité, car dans certains cas (Saint-Paul surtout, Saint-Pierre également), les ouvrages de défense sont artisanaux et n'ont pas été calibrés pour résister aux pressions météo-marines auxquelles ils sont exposés. Ce point majeur, qui a été développé dans le diagnostic de vulnérabilité actuelle et l'Atlas de la vulnérabilité qui l'accompagne (Duvat et Salmon, 2015) sera pris en considération dans l'analyse qui suit, ainsi que dans la reconstruction des trajectoires de vulnérabilité qui fait l'objet de la section 3.

2.5.3. Résultats par commune

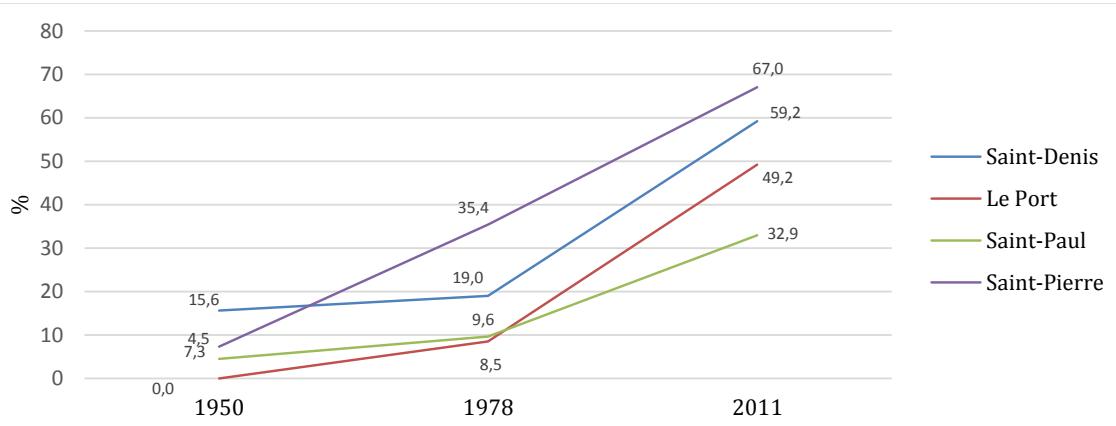
Le trait de côte a connu entre 1950 et 2011 une forte artificialisation qui se traduit par l'implantation d'ouvrages de défense de nature et de dimension variables, et qui protègent donc de manière plus ou moins efficace les enjeux exposés. Le littoral de Saint-Denis était le plus équipé d'ouvrages en 1950, avec 15,6 % de trait de côte équipé d'ouvrages (2 à cette date). En 1978, la situation a peu évolué, puisque l'on compte deux ouvrages de plus sur 0,3 km de côte supplémentaire. En 2011, plus de la moitié du linéaire côtier est fixée (59,2 %) par une dizaine d'ouvrages de défense, principalement des murs de protection et des cordons d'enrochements. La majeure partie de ces ouvrages ont un effet protecteur pour les enjeux qu'ils bordent.

Le Port a connu une évolution comparable (Figure 34), même si en 1950 son littoral était encore épargné par la construction d'ouvrages longitudinaux. Les seuls ouvrages lourds présents à cette date sont les deux jetées situées de part et d'autre du chenal d'entrée du Port-Ouest, dont la présence est ancienne puisque le Port-Ouest est en activité depuis 1886. Le trait de côte reste relativement naturel en 1978, seuls les pourtours du Port-Ouest faisant alors l'objet d'une protection par de premiers cordons d'enrochements. En 2011, la moitié du linéaire côtier de cette commune est équipée d'ouvrages lourds, principalement des cordons d'enrochements et de tétrapodes qui sont à l'origine d'une forte artificialisation du littoral. La déstabilisation progressive de la face occidentale du cône-delta suite à l'aménagement du Port-Ouest (interruption du transit côtier orienté vers le nord) et la construction du Port-Est en 1986 ont joué un rôle majeur dans cette évolution. La forte exposition des bassins portuaires et des activités attenantes aux houles cycloniques ont imposé de protéger ces enjeux, dont le rôle pour l'économie de la Réunion est crucial. Les ouvrages qui ont été implantés sur le littoral de la commune du Port sont des ouvrages d'ingénierie calibrés pour résister aux pressions météo-marines : ils assurent par conséquent de manière efficace la protection des enjeux présents dans la bande côtière, et réduisent donc leur vulnérabilité.

Saint-Paul est la commune dont le linéaire côtier étudié est le plus long, car il s'étire sur 21,6 km. La part du linéaire côtier équipé d'ouvrages est passée

Tableau 14. Évolution de la protection des enjeux côtiers de 1950 à 2011 par commune

	Linéaire côtier traité en km	Ouvrages de défense recensés		Linéaire côtier équipé d'ouvrages de défense	
		Nombre	Longueur totale (km)	km	%
1950					
Saint-Denis	7,64	2	1,19	1,19	15,6
Le Port	8,47	2 (jetées portuaires)	0,24	0,00	0
Saint-Paul	21,66	13 (dont 3 épis)	1,16	0,98	4,5
Saint-Pierre	3,56	6 (dont 1 jetée)	0,97	0,26	7,3
Total	41,33	23	3,56	2,43	5,9
1978					
Saint-Denis	7,94	4	1,52	1,51	19,0
Le Port	8,59	4 (dont 2 jetées)	1,09	0,73	8,5
Saint-Paul	20,86	39 (dont 3 jetées)	2,37	2,01	9,6
Saint-Pierre	3,50	18 (dont 1 jetée)	1,95	1,24	35,4
Total	40,89	65	6,93	5,49	13,4
2011					
Saint-Denis	7,90	11	4,68	4,68	59,2
Le Port	8,30	20 (dont 5 épis et jetées)	5,11	4,08	49,2
Saint-Paul	21,55	153 (dont 3 jetées)	7,45	7,09	32,9
Saint-Pierre	3,64	32 (dont 1 jetée)	3,24	2,44	67,0
Total	41,39	216	20,48	18,29	44,2

Figure 34. Évolution du linéaire côtier protégé par commune entre 1950 et 2011

de 4,5 % en 1950 à 9,6 % en 1978 et 32,9 % en 2011 (7,1 km, soit la longueur la plus importante). Contrairement à ce que l'on observe dans les communes de Saint-Denis et du Port, la plupart de ces ouvrages sont artisanaux et ont été édifiés par les riverains. Seuls, sortent de cette catégorie les murs de soutènement et cordons d'enrochements qui bordent la route côtière, en particulier à la sortie de la baie de Saint-Paul et dans le secteur du cap la Houssaye. On compte au total, dans cette commune, 13 ouvrages de défense en 1950, 39 en 1978 et 153 en 2011. Leur multiplication est directement liée à l'urbanisation littorale, qui encourage les particuliers à construire des murs de délimitation de leur propriété d'une part (comptabilisés dans les ouvrages), et des ouvrages de protection contre la mer d'autre part (cf. Figure 25). Ces ouvrages aux dimensions réduites et qui présentent pour la plupart un état moyen à mauvais n'assurent pas efficacement la protection des enjeux côtiers. Certains d'entre eux aggravent par ailleurs l'érosion des plages. Pour ces deux raisons, ces ouvrages accroissent la vulnérabilité du littoral.

Le cas de Saint-Pierre (seulement deux secteurs sont traités : le centre-ville et Grand Bois, qui représentent au total 3,6 km de linéaire côtier) est encore différent, car les ouvrages que l'on y observe (6 en 1950, 18 en 1978 et 32 en 2011) sont là pour protéger non seulement des biens privés,

mais aussi des enjeux d'intérêt général comme la route côtière. Le littoral corallien (et en particulier le centre-ville) était donc déjà fortement artificielisé en 1978 avec 35,4 % de linéaire côtier protégé, ce dernier atteignant 67 % en 2011 (cf. Figure 26).

2.5.4. Synthèse

Les résultats nous montrent que : (1) un nombre croissant d'enjeux humains sont situés dans des zones basses et à proximité du trait de côte ; (2) une forte contraction de la ZTTN s'est opérée depuis 60 ans, qui engendre une diminution de son rôle de protection. Des ouvrages de défense lourds ont été construits pour protéger les enjeux humains de l'érosion côtière et de la submersion marine. En fixant le trait de côte, ils génèrent des effets négatifs sur le fonctionnement naturel du littoral : les ouvrages longitudinaux verticaux comme les murs accroissent l'impact érosif des vagues en provoquant leur réflexion, et les épis et jetées interceptent le transit côtier. Les problèmes que ces ouvrages génèrent mènent le plus souvent à la construction de nouveaux ouvrages qui entraînent de nouvelles perturbations, illustrant le classique « effet domino ». Là où ils sont artisanaux, ces ouvrages non conformes aux exigences techniques ne protègent pas efficacement les enjeux côtiers et tendent par leurs effets négatifs à accroître la vulnérabilité du littoral.

3. SYNTHÈSE GÉNÉRALE : FACTEURS D'INFLUENCE DES TRAJECTOIRES DE VULNÉRABILITÉ ET ANALYSE DES PROCESSUS ASSOCIÉS

La partie précédente a présenté les résultats issus des traitements sur les trajectoires courtes, à l'échelle le plus souvent des communes. À partir de là, l'analyse des facteurs d'influence de la vulnérabilité peut désormais être réalisée. Elle s'appuiera sur l'étude de 6 figures territoriales allant de l'échelle communale à l'échelle micro-locale, qui permettront de dégager des conclusions valables l'échelle de la Réunion.

3.1. Quelques éléments de méthode

Cette section propose pour chaque étude de cas une carte schématique reprenant les principaux changements environnementaux et humains des dernières décennies, ainsi qu'une chronologie de l'implantation des aménagements/équipements et des ouvrages de protection. La frise chronologique a été réalisée sur la base des informations recueillies dans la littérature quand celle-ci existe (par exemple, pour le cas du Port), et de l'analyse de photographies aériennes à différentes dates. Il est à noter que pour certains aménagements, il est difficile d'obtenir des dates précises, les chantiers pouvant durer plusieurs années, s'interrompre avant de reprendre, etc. De la même manière, un ouvrage de protection a pu être détruit et reconstruit par la suite, suite à un événement tempétueux. Il est donc impossible de reconstruire une chronologie précise de l'implantation des aménagements et équipements. En dépit de ses limites, cet exercice permet cependant de mettre en évidence les grandes phases d'aménagement des littoraux et les effets d'enchaînements qui contrôlent les trajectoires de vulnérabilité.

Les résultats statistiques obtenus pour chaque secteur (cf. section 2) sont repris et agrégés en un indice de vulnérabilité. Malgré les nombreuses limites liées à la construction d'indices (problèmes d'interprétation des données, d'intégration des aspects qualitatifs, etc.), il apparaît tout de même intéressant de recourir à ce type de démarche pour reconstruire des trajectoires de vulnérabilité. Cette approche nécessite cependant de rester attentif à des questions complexes, telles que le choix des critères retenus et leur interprétation (fait qu'ils accroissent ou réduisent la vulnérabilité), le nombre de classes et le choix des seuils, la difficulté de saisir les interactions possibles entre des critères, etc.

Le Tableau 15 présente les quatre critères retenus ici pour l'analyse des trajectoires de vulnérabilité des différents cas d'étude, ainsi que les seuils appliqués. Ces critères ont été retenus en tant que facteurs de vulnérabilité, mais également en fonction de la possibilité, à partir de données concrètes et fiables (cf. section 2), de caractériser leur évolution dans le temps de manière quantitative (à partir d'indices), afin de pouvoir les comparer les uns avec les autres. Ainsi, des niveaux de vulnérabilité ont été attribués à diverses configurations et pour chacun des 4 critères présentés ci-dessous (Tableau 15). Plus le niveau de vulnérabilité est élevé (c'est-à-dire se rapproche de 5), plus le facteur contribue à la vulnérabilité. Appliqués à trois pas de temps principaux (1950, 1978, 2011), ces critères permettent de tracer non seulement une courbe d'évolution pour chaque critère (trajectoire de vulnérabilité thématique), mais aussi une courbe d'évolution globale (trajectoire de vulnérabilité globale agrégeant les différents critères). Encore une fois, bien que cette démarche comporte des limites méthodologiques et scientifiques (par ex., elle ne tient pas compte des interactions entre les facteurs), elle permet de faire émerger des trajectoires de vulnérabilité, qui sont utiles par les tendances qu'elles mettent en évidence. Ce travail doit donc être compris comme une première expérimentation de formalisation, par des courbes d'évolution, des trajectoires de vulnérabilité des territoires étudiés.

Les deux premiers critères concernent l'exposition des enjeux, qui est renseignée d'une part, par la surface bâtie dans la bande côtière des 100 m, et d'autre part, par la surface bâtie en situation « critique », c'est-à-dire située à moins de 30 m du trait de côte et de 6 m d'altitude. Le troisième critère concerne la surface des zones tampons, qui joue un rôle important comme on l'a vu dans l'évolution de la vulnérabilité. Enfin, le quatrième et dernier critère renseigne le niveau de protection des enjeux par les ouvrages de défense. Sur la base de la situation actuelle, qui a été renseignée de manière précise sur la base de levés de terrain, il s'agit de documenter le caractère protecteur (ouvrages massifs construits dans les règles de l'art) ou non (ouvrages artisanaux) des ouvrages de défense des différentes communes. Dans le premier cas, ces ouvrages réduisent la vulnérabilité, alors que dans le second, ils l'accroissent car leurs effets négatifs (accélération de l'érosion, perturbation des échanges transversaux et longitudinaux, principalement) ne sont pas compensés par une protection efficace des enjeux humains situés dans la bande côtière.

Tableau 15. Proposition d'un barème pour pouvoir comparer les données entre elles et générer des trajectoires de vulnérabilité

Degré de vulnérabilité	Surface bâtie dans la bande côtière des 100 m (ha/km)	Surface bâtie en situation critique (ha/km)	Surface des zones tampons (ha/km)	Niveau de protection du linéaire côtier
1	< 0,2	< 0,1	> 16	Fort à très fort
2	0,2 – 0,4	0,1 – 0,2	16 – 12	Moyen
3	0,4 – 0,6	0,2 – 0,3	12 – 8	Relativement faible
4	0,6 – 0,8	0,3 – 0,4	8 – 4	Faible
5	> 0,8	> 0,4	< 4	Très faible

À l'instar des données sur les zones tampons, les résultats sur l'exposition du bâti ont été rapportés à 1 km de linéaire côtier afin de permettre des comparaisons entre des secteurs de longueur différente. C'est pourquoi les valeurs présentées dans ce Tableau sont beaucoup plus faibles que celles présentées dans la section 2. Pour obtenir les trajectoires de vulnérabilité globale, les « scores » de chaque critère (de 1 à 5 donc) ont été additionnés, donnant ainsi une note finale sur 20. Les données à l'échelle de l'ensemble des secteurs étudiés seront également affichées pour servir de référence. Par commodité, on les appellera « Réunion » dans les légendes des figures. Annexe L2 = résultats complets par étude de cas.

3.2. Études de cas

Le Tableau 16 présente les études de cas choisies et leur délimitation, ainsi que le n° du secteur correspondant (cf. segmentation du littoral, Figure 7).

Tableau 16. Délimitation des secteurs correspondant aux études de cas

Études de cas	Délimitation	N° secteur
1. Saint-Denis	Rivière des Pluies – extrémité est de la route du Littoral	1
2. Le Port	Territoire communal (ravine à Marquet – rivière des Galets)	2.1 et 2.2
3. Baie de Saint-Paul	Embouchure de l'étang de Saint-Paul – les Petits Récifs (sud de la baie)	3.2
4. Boucan Canot	Cap La Houssaye – pointe des Aigrettes	3.3 à 3.5
5. Saint-Gilles	Pointe des Aigrettes – passe de l'Ermitage	3.6 et 3.7
6. La Saline	Passe de l'Ermitage – pointe des Trois-Bassins	3.8 et 3.9
7. Saint-Pierre	Ravine Blanche – port de plaisance (centre)	4.1

L'emprise des deux premiers sites choisis, Saint-Denis et Le Port, est la même que pour la

présentation des résultats de la section 2. Les trois sites suivants sont localisés dans la commune de Saint-Paul et le dernier à Saint-Pierre. Ces secteurs ont été choisis, car ils représentent une diversité de situations, à la fois naturelles et anthropiques. Ils sont le support d'histoires et de géographies différentes, ce qui permet de faire ressortir une grande variété de facteurs d'influence et de discuter de la contribution de ces derniers à l'évolution de la vulnérabilité.

3.2.1. Saint-Denis

Saint-Denis est aujourd'hui la plus grande agglomération de l'outre-mer, au cœur d'une aire urbaine qui compte près de 200 000 habitants. Elle est le principal bassin économique de l'île et concentre de nombreux services et administrations.

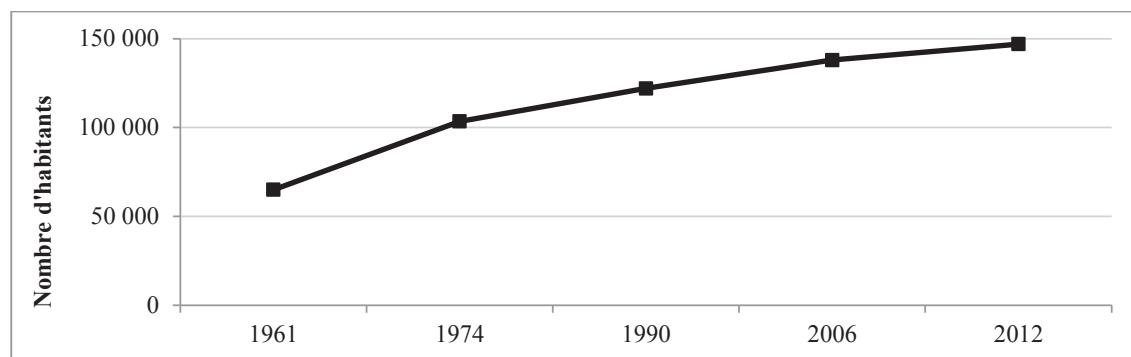
Sur une longueur d'environ 7,5 km, son littoral est constitué d'un cordon de galets volcaniques alimenté principalement par la rivière des Pluies, et dans une moindre mesure par les ravines non pérennes qui y débouchent (De la Torre *et al.*, 2009). Ce secteur connaît un courant de dérive littorale orienté d'est en ouest sous l'effet des houles d'alizé, et il est fortement exposé aux houles cycloniques de secteur nord à nord-est.

La ville de Saint-Denis a été fondée en 1666. Elle devient le chef-lieu de la Réunion au détriment de Saint-Paul en 1738. L'empreinte de l'homme sur le littoral est donc déjà forte en 1950, et principalement localisée à l'ouest : le cimetière, construit à moins de 50 m de la mer, borde le cordon de galets, d'où la construction de murs de protection ; la rivière Saint-Denis est déjà canalisée ; le Barachois est aménagé, certains murs de soutènement étant déjà présents ; les routes et bâtiments longent de près le littoral. Cela se traduit par une surface bâtie déjà très élevée dans la bande des 100 m, et en conséquence par un indice de zone tampon faible (5,9 ha/km de linéaire côtier).

Au cours des décennies suivantes, l'urbanisation s'étend vers l'est, en réponse à une croissance démographique très forte, la population de Saint-Denis passant de 65 275 habitants en 1961 à 145 238 habitants en 2012 (Figure 35).

De grands projets urbains voient le jour dans les années 1960 à 1980 pour mettre fin à l'extension d'un bâti précaire qui se développe dans les zones basses, à l'est du centre historique, les possibilités d'extension vers l'ouest étant limitées par le relief montagneux. Mais ces zones occupées par des bidonvilles sont inondables, ce qui oblige les pouvoirs publics à engager des travaux d'endiguement des ravines pour sécuriser les nouveaux quartiers urbains (Figure 36). Ces travaux ont été réalisés entre 1967 et 1976 pour les ravines Patates à Durand et Butor. Mais les digues ne mettent pas ces quartiers

Figure 35. Évolution démographique de la commune de Saint-Denis de 1961 à 2012 (sources : Insee et Ehess)



à l'abri des inondations, comme en témoignent les impacts des crues causées par les cyclones Clotilda en 1987 et Cécilia en 1993 : « la ravine du Butor déborda et inonda les quartiers d'habitations collectifs. Les digues ne furent jamais remises en cause (...). L'ensemble des quartiers est de Saint-Denis ont accru fortement leur vulnérabilité derrière des digues en béton, bien que l'on connaisse mal les limites de submersion pendant des crues torrentielles. » (Lorion, 2006). Et l'auteur de conclure : « Mais à la Réunion la construction de digues a été d'autant plus facile à justifier que l'île traversait pendant les années 1980 une période critique de transition démographique qui nécessitait de loger de nombreux couples nés 20 ans plus tôt. (...) L'absence de responsabilité face à des inondations torrentielles a conduit les générations futures à gérer de nouveaux risques bien plus graves car les densités de population ont augmenté dans ces zones dangereuses. » La partie est de Saint-Denis est la plus vulnérable de la commune, car en cas de cyclone deux phénomènes peuvent concorder : les inondations dues au débordement des ravines et la submersion marine.

Sur le long terme, l'endiguement des ravines, en les canalisant et en réduisant leur zone d'épannage, a eu des impacts sur l'évolution de la position du trait de côte. Il a globalement engendré des avancées au droit des principales embouchures et un recul dans les secteurs qui les séparent. La plus forte avancée du trait de côte (+ 130 m) s'observe au droit de la rivière des Pluies, sur la rive gauche, à proximité du centre de tri des déchets de la Jamaïque. Cet équipement est visible dès 1971, mais les travaux de terrassement réalisés plus à l'est se prolongent au cours des décennies suivantes. Toute une zone reste en friche, probablement comme zone d'expansion des crues de la rivière des Pluies, afin de limiter les dégâts éventuels sur les pistes d'atterrissage de l'aéroport Roland-Garros en rive droite. Le trait de côte a également avancé dans l'axe des ravines du Chaudron, Patates à Durand et Saint-Denis. Il a en revanche

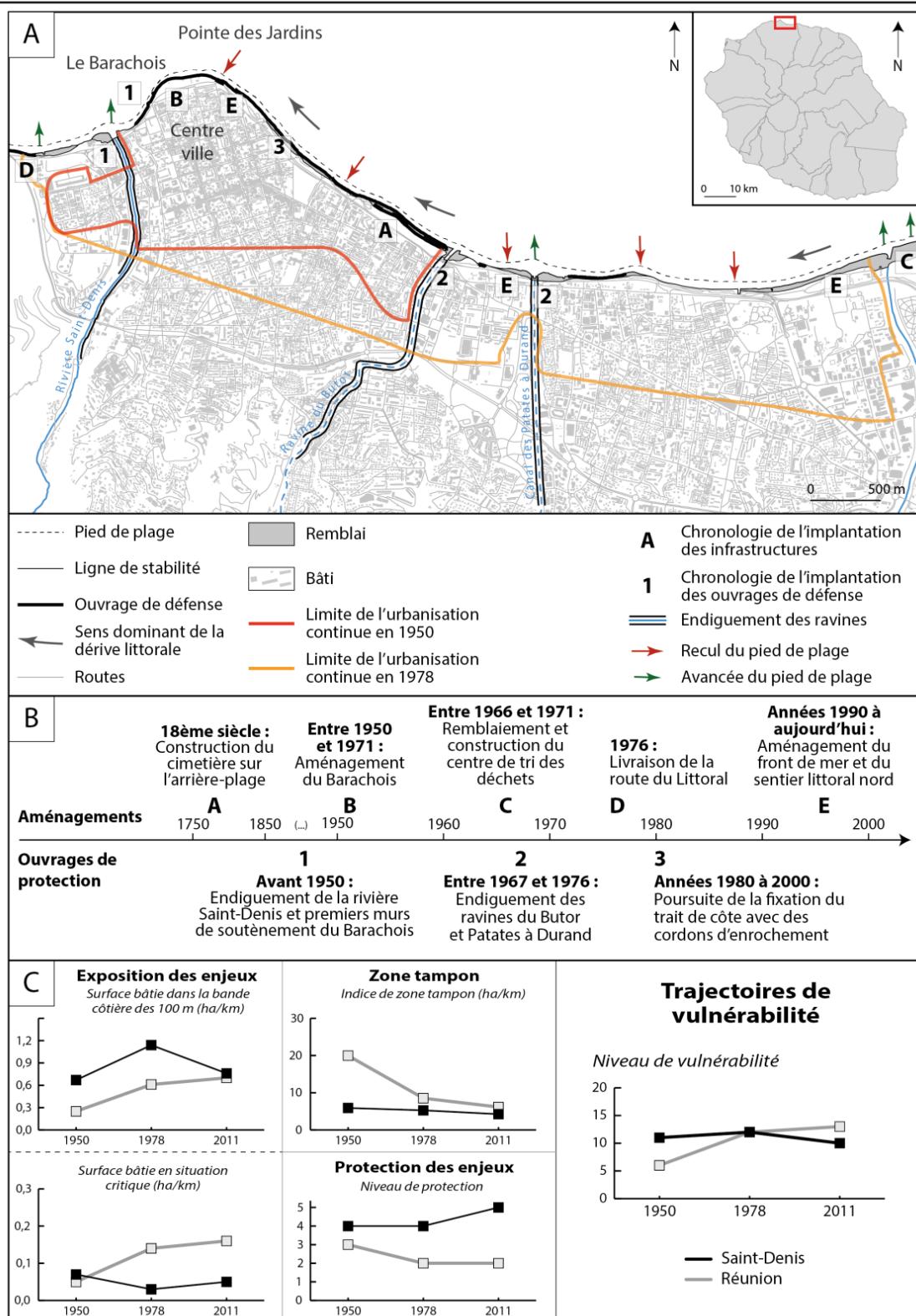
connu un recul significatif entre les embouchures des ravines Patates à Durand et du Butor. Le recul du trait de côte et la forte exposition de certains enjeux, comme la route côtière et le front de mer aménagé, expliquent que des cordons d'enrochement aient progressivement été implantés le long du littoral, à l'est du Barachois. Ces ouvrages sont relativement cohérents et résistants, et réduisent par conséquent la vulnérabilité.

En parallèle, une avancée de la ligne de stabilité s'observe sur la totalité du secteur, en résultat des travaux de terrassement et de remblaiement réalisés par la commune entre 1950 et 2011. À l'est, la plage de galets est par conséquent bordée par des talus, qui constituent une zone tampon artificielle réduisant la vulnérabilité de la route côtière et des quartiers d'habitation face aux houles cycloniques. Cette zone tampon artificielle a été aménagée en zone de loisirs. Un sentier longe le littoral, du Barachois à la Jamaïque, jalonné d'équipements sportifs et récréatifs, qui offre aux citadins la possibilité de se ressourcer.

La trajectoire de vulnérabilité de Saint-Denis (Figure 36C) montre une légère hausse de la vulnérabilité entre 1950 et 1978, puis une baisse entre 1978 et 2011⁷. Ainsi, elle se démarque de la tendance générale indiquée en gris, qui correspond à la moyenne obtenue pour l'ensemble des secteurs. Ce résultat illustre le fait qu'un niveau de vulnérabilité élevé (par rapport à la période) a été atteint dès les années 1950, et que la vulnérabilité a ensuite diminué entre 1978 et 2011. La construction d'ouvrages de défense (cordons d'enrochement) a contribué à la réduire, tout comme l'aménagement du front de mer (création des talus). Concernant l'évolution future de la vulnérabilité, il est fortement probable, au regard de l'évolution récente de la défense des côtes et des niveaux de risques côtiers actuels (en particulier d'érosion et de submersion, qui restent forts à l'est), que l'ensemble

7. Le problème évoqué concernant les ravines n'a pu être intégré dans cette évaluation.

Figure 36. Étude de cas : le littoral de la commune de Saint-Denis (secteur 1).



A) Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question ; B) Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense ; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude de cas.

du trait de côte soit fixé par des ouvrages de protection dans le futur.

3.2.2. Le Port

Le Port est la plus petite des communes étudiées et son linéaire côtier s'étire sur environ 8,5 km (20 km en incluant les bassins portuaires). L'ensemble du territoire communal est situé sur le cône-delta de la rivière des Galets, dont l'embouchure actuelle se situe au sud de la ville. Les apports en alluvions sont devenus très faibles en dehors des crues cycloniques⁸, suite à la modification des conditions climatiques entre la période de formation du cône-delta (il y a environ 20 000 ans) et aujourd'hui (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Cela explique la forte sensibilité de ce cône-delta à l'érosion et aux perturbations anthropiques de son fonctionnement morphodynamique. Bien que le profil bathymétrique du cône-delta, qui est abrupt, entraîne une perte d'alluvions vers les grandes profondeurs, la rivière des Galets alimente la baie de Saint-Paul sous l'effet du transit côtier orienté vers le sud. Elle n'alimente en revanche plus la pointe des Galets située au nord depuis que le Port-Ouest a été construit entre 1870 et 1886. Ce port a été le premier aménagement de grande ampleur implanté sur le cône-delta. En interceptant le transit côtier orienté vers la pointe des Galets située au nord, il a engendré la déstabilisation de cette pointe (recul du pied de plage de 160 m entre 1950 et 2011) et de l'ensemble du littoral situé en aval-dérive de la jetée sud du port (Figure 8 et Figure 9). Des ouvrages de protection massifs, constitués de cordons d'enrochements et de tétrapodes, ont été implantés dès le début des années 1970 le long du littoral pour protéger les bassins portuaires, d'abord au sud où une digue de protection massive de 750 m de long a été construite (ouvrage 1, Figure 37), puis au nord, en aval-dérive de la jetée sud du Port-Ouest (ouvrages 2, 3 entre 1973 et 1980, Figure 37). En 1996, 5,5 ha ont été gagnés par remblaiement au sud de la pointe des Galets afin d'étendre le dépôt d'hydrocarbures, et protégés par un cordon d'enrochements (ouvrage 7, Figure 37). Les derniers travaux de protection, toujours en cours en 2015, vont fixer le trait de côte sur toute sa longueur dans le secteur compris entre la jetée sud du Port-Ouest et la pointe des Galets.

La construction du Port-Est entre 1982 et 1986, et l'aménagement du terminal de conteneurs (remblaiement de 12 ha supplémentaires) en 1995-1996, constituent la seconde étape dans l'aménagement

et la transformation du littoral du Port. Afin de prévenir l'érosion qu'allait induire la construction du Port-Est en aval-dérive de ses jetées, c'est-à-dire à l'ouest, les matériaux extraits du cône-delta lors du creusement de ce port ont été disposés le long de la côte sous la forme d'une série de buttes de déblai massives destinées à alimenter la plage en sables et galets sous l'action des vagues et du courant de dérive littorale. Cette mesure de prévention de l'érosion a bien fonctionné et explique le maintien de la position du trait de côte au cours des dernières décennies en dépit des aménagements perturbateurs qui ont été réalisés. Ces buttes de déblai ont par ailleurs renforcé la protection de la route côtière et des bâtiments implantés dans la bande côtière face aux houles cycloniques. Et la stabilité du trait de côte a à son tour contribué au maintien d'un littoral naturel dans une commune à vocation industrielle dans laquelle les côtes ont été fortement transformées par les aménagements. Mais une fois que le stock d'alluvions contenu par les buttes de déblai, qui s'érodent rapidement, sera épuisé, le trait de côte reculera, et l'installation de cordons d'enrochements ou de tétrapodes sera requise pour le stabiliser et protéger les enjeux situés à proximité de la mer.

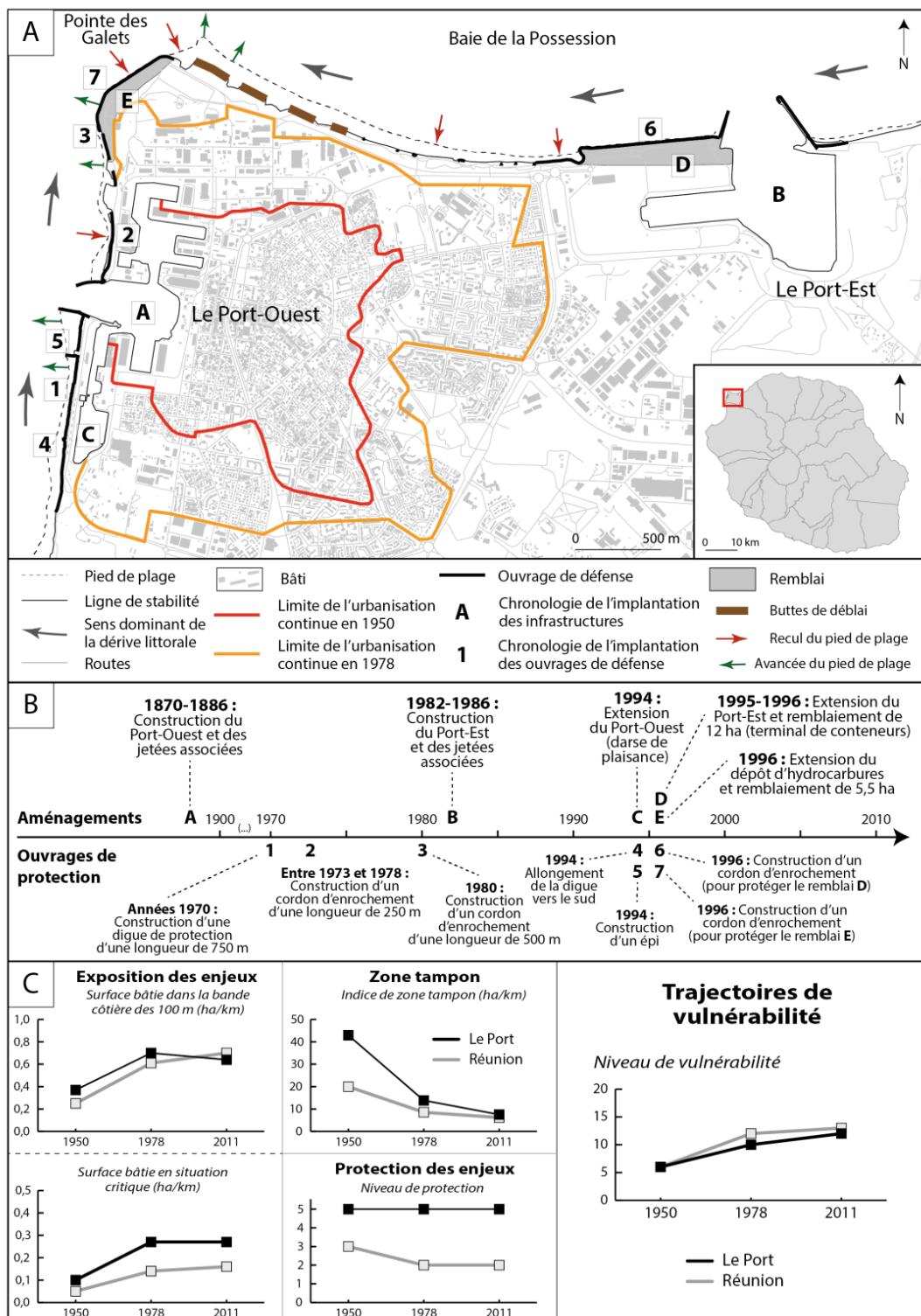
Dans cette commune portuaire, l'extension importante de la surface bâtie qui s'observe entre 1950 et 2011 correspond à la construction de bâtiments portuaires et industriels peu exposés aux risques liés à la mer puisqu'ils se trouvent à l'arrière d'ouvrages de protection massifs et, le plus souvent, des bassins portuaires. Parce qu'elle s'est développée à l'arrière du Port-Ouest, puis étendue en tâche d'huile vers le nord, le sud et l'est, la ville du Port est peu exposée aux risques liés à la mer. Bien que la zone tampon se soit contractée sous l'effet des aménagements, on a ici affaire à un cas original, dans lequel la nature même des enjeux exposés (bâtiments portuaires et industriels, principalement) et leur haut niveau de protection par des ouvrages de défense sont à l'origine de la faible vulnérabilité des enjeux urbains (bâti résidentiel et population) face aux risques liés à la mer.

Au résultat, la trajectoire de vulnérabilité de la commune du Port montre une augmentation soutenue de la vulnérabilité entre 1950 et 1978 (+ 4 points), puis cette augmentation s'affaiblit entre 1978 et 2011 (+ 2 points) suite à la fixation du trait de côte par des ouvrages massifs (Figure 37C). Globalement, bien que cette commune ait perdu la majeure partie de ses espaces naturels littoraux, elle peut être considérée comme relativement peu vulnérable au regard du niveau de protection élevé et de la nature des enjeux humains exposés.

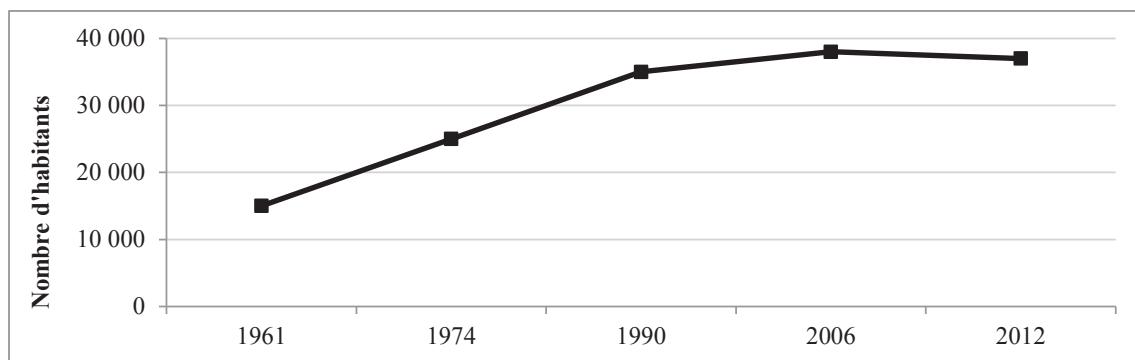
Des similitudes s'observent entre les situations du Port et de Saint-Denis : même si les trajectoires

8. Le lobe qui s'étend vers la mer à l'embouchure a progressé de 100 m correspondant à un volume d'alluvions de 850 000 m³ suite au passage du cyclone Hyacinthe en 1980 (SOGREAH, 1990, in Cazes-Duvat et Paskoff, 2004).

Figure 37. Étude de cas : le littoral de la commune du Port (secteurs 2.1 et 2.2)



A) Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question ; B) Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense ; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude de cas.

Figure 38. Évolution démographique de la commune du Port de 1961 à 2012 (Sources : Insee et Ehes)

restent différentes, ces deux secteurs se caractérisent par le fait que l'espace disponible pour accueillir de nouveaux enjeux côtiers se raréfie, sous l'effet de la contraction de la zone tampon. Ainsi, la tendance que l'on observe au Port (d'augmentation de la vulnérabilité) tend à se stopper pour parvenir à une sorte d'équilibre ou de stabilisation. Il est intéressant de noter que l'évolution démographique de la commune confirme cette idée de stabilisation de la vulnérabilité dans le futur proche, puisque le nombre d'habitants a baissé en 2012 (36 952 habitants) par rapport à 2006 (38 148 habitants) (Figure 38). Finalement, la trajectoire du Port est proche de celle de l'ensemble des quatre communes, indiquée en gris dans les graphiques (cf. Réunion).

3.2.3. Baie de Saint-Paul

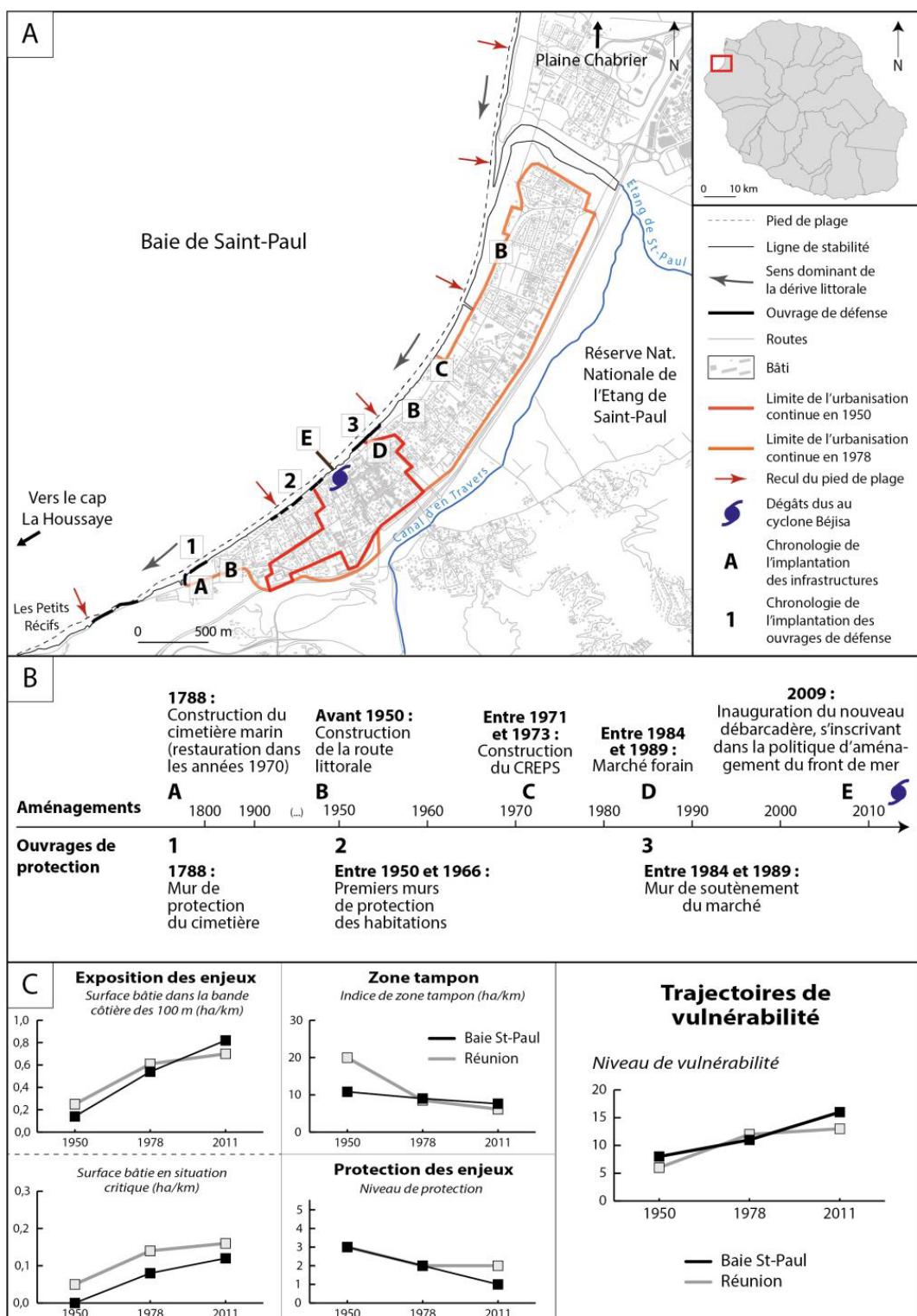
La baie de Saint-Paul est le premier site à avoir été occupé par l'homme à la Réunion dans la deuxième moitié du XVII^e siècle (« baie du meilleur ancrage »), et elle abrite la première commune de l'île par sa population. La ville de Saint-Paul s'est implantée sur un cordon littoral constitué de sable et de galets d'origine volcanique d'environ 8 km de long, qui s'étire entre la plaine Chabrier au nord et le cap La Houssaye au sud, et isole une lagune dont l'étang de Saint-Paul représente le résidu (Cazes- Duvat et Paskoff, 2004). Très tôt, des aménagements sont implantés sur le littoral, comme le cimetière marin, établi en 1788 sur la dune côtière. Si l'urbanisation est ancienne, elle reste très localisée jusqu'en 1950 (Figure 39). Entre 1950 et 1978, l'extension du bâti est importante le long du littoral, l'obstacle que représente l'étang de Saint-Paul empêchant sa progression vers l'intérieur des terres. Au milieu des années 1980, l'implantation du marché forain en bord de mer contribue à accroître les pressions humaines qui s'exercent sur la plage et la dune. La forte urbanisation littorale qui s'observe résulte de la hausse rapide de la population communale, qui triple en

50 ans, passant de 35 528 habitants en 1961 à 104 646 habitants en 2012 (Figure 40).

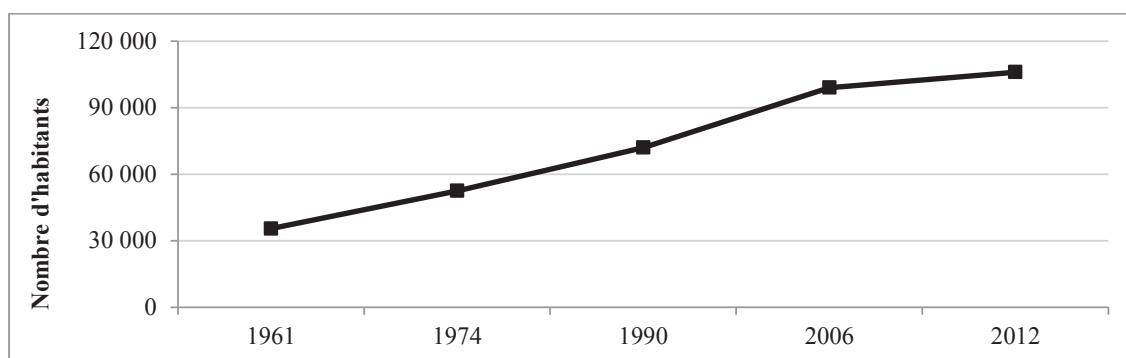
L'altitude est très faible, puisque le plus souvent inférieure à 6 m. La dérive littorale vient du nord et alimente la plage tout en procédant à un tri granulométrique : les galets présents dans la partie nord de la baie diminuent progressivement en taille jusqu'à laisser la place à des sables de plus en plus fins au sud de l'embouchure de l'étang, où la plage s'adosse à une dune. Ce transport d'alluvions vers le sud est repérable sur les photographies aériennes et les images satellites, sous la forme d'un panache qui longe la côte. Malgré cet approvisionnement en alluvions apportés à la mer par la rivière des Galets et remobilisés par la dérive littorale nord-sud d'une part, et issus de l'érosion du cône-delta ancien au niveau de la plaine Chambrier d'autre part, la plage de la baie de Saint-Paul s'érode. En effet, sur la période 1950-2011 le pied de plage est en recul dans la quasi-totalité du secteur (recul moyen de 11 m dans le nord et de 17 m dans le sud), et cette tendance s'est amplifiée depuis 1978. La contraction de la plage contribue à aggraver les impacts des vagues cycloniques sur les propriétés côtières, qui ont été successivement affectées par celles générées par les cyclones Gamède en 2007 et Bejisa en 2014. L'analyse de l'évolution de la ligne de stabilité montre que le site du CREPS (Centre de Ressources, d'Expertise et de Performance Sportives) marque la limite entre un recul important au nord et une situation de stabilité-progradation au sud. Le CREPS correspond également à la limite entre la zone littorale encore « naturelle » située au nord, couverte par la forêt domaniale de Saint-Paul, et celle aménagée au sud dans laquelle la zone tampon, qui comprend des talus et remblais au nord de la place du marché, n'est plus constituée que de la seule plage de sable volcanique plus au sud.

La synthèse des résultats statistiques sous forme de trajectoire (Figure 39C) indique une augmentation de la vulnérabilité depuis 1950. Cette

Figure 39. Étude de cas : la partie centre et sud de la baie de Saint-Paul (secteur 3.2).



A) Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question ; B) Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense ; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude de cas.

Figure 40. Évolution démographique de la commune de Saint-Paul de 1961 à 2012 (Sources : Insee et Ehess)

augmentation est plutôt lente dans la première partie du graphique (1950-1978), mais elle s'intensifie dans la seconde (1978-2011). Malgré l'occupation ancienne de ce secteur par l'homme, les dernières décennies ont joué un rôle majeur dans l'augmentation de la vulnérabilité en raison de la hausse continue du nombre des enjeux exposés et de la contraction associée de la zone tampon. Le faible niveau de protection des propriétés côtières, en particulier, contribue à la vulnérabilité.

Il est probable que la vulnérabilité globale de la commune de Saint-Paul aux risques liés à la mer continue à augmenter dans le futur, sous l'effet de la politique de densification urbaine qui est menée. Mais ce phénomène ne devrait pas affecter de manière importante le littoral, déjà aménagé sur sa partie constructible et concerné par une politique d'embellissement et de végétalisation qui devrait avoir pour effet de maintenir dans son état actuel la zone tampon.

3.2.4. Boucan Canot

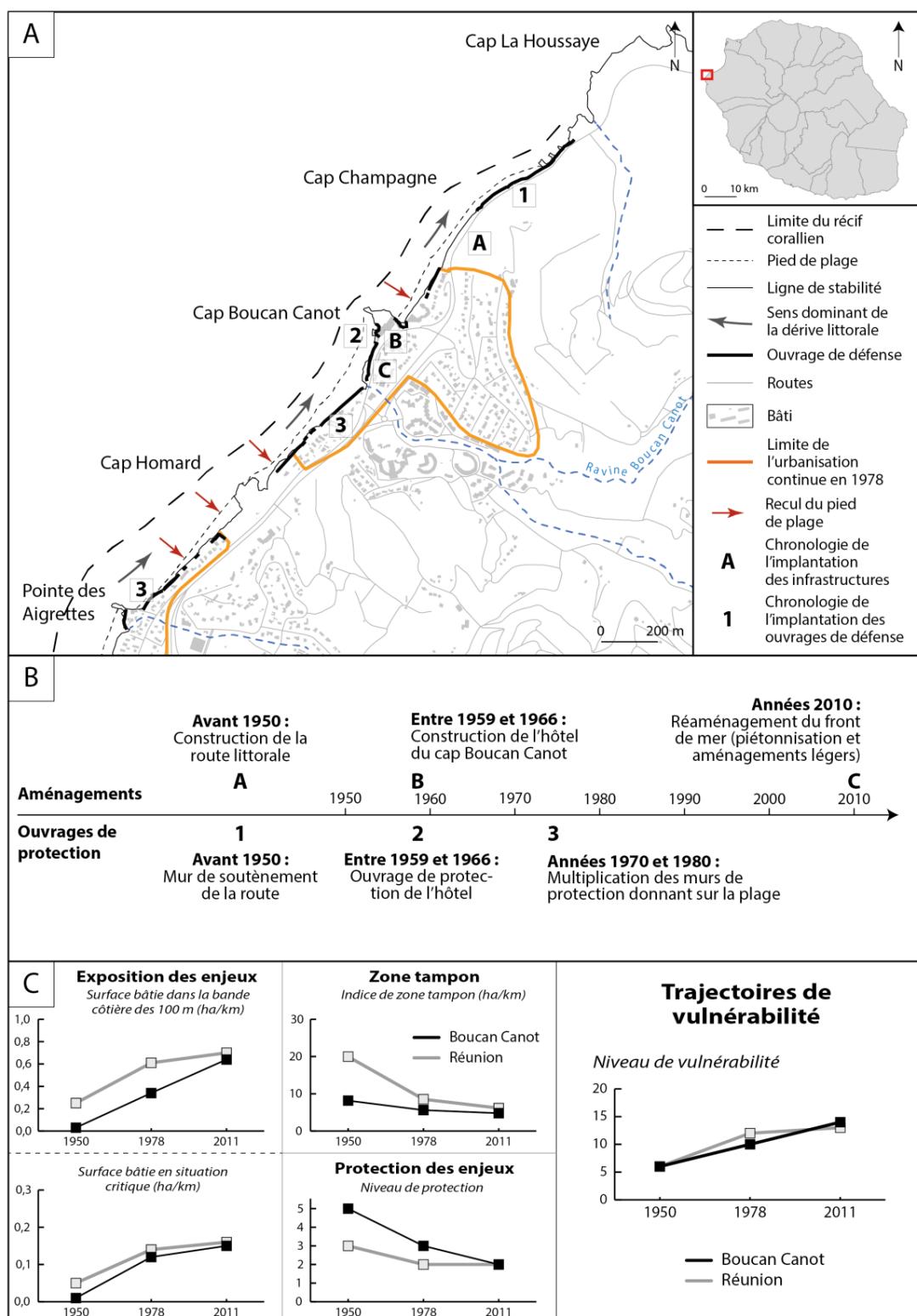
Boucan Canot constitue la partie nord de la station balnéaire de Saint-Gilles-les-Bains et du littoral corallien de Saint-Paul. La longueur du linéaire côtier est d'environ 2 km. A Boucan Canot, le récif corallien est un banc récifal d'une soixantaine de mètres de largeur, qui va en s'élargissant vers le sud pour devenir une plateforme récifale au droit de la plage des Aigrettes, et entre le cap Homard et la pointe des Aigrettes (Figure 41). Dans ce secteur, le bâti est quasi-inexistant en 1950, seulement constitué de quelques habitations dispersées. En revanche, il existe à cette date une route littorale proche du trait de côte (notamment au nord du cap Boucan Canot), qui a été construite à la fin du XIX^e siècle ou au début du XX^e siècle. Au nord, dans le secteur de la plage du cap Champagne, elle est bordée par un mur de soutènement massif, le seul de ce type sur ce site encore aujourd'hui. Les autres ouvrages que l'on peut observer sont artisanaux et discontinus, consistant en de petits murs

bordant les propriétés. Le premier aménagement touristique à avoir été implanté sur ce site est un hôtel, construit sur le cap de Boucan Canot entre 1959 et 1966. À partir de là, le bâti apparaît et se densifie.

Concernant l'évolution de la position du trait de côte, le pied de plage a connu entre 1950 et 2011 un léger recul, et cela sur une grande partie du linéaire côtier, (- 22 m pour le recul le plus important, qui concerne la plage des Aigrettes, mais stabilité tout de même de la plage de Boucan et de celle du cap Champagne nord). La ligne de stabilité a connu une évolution opposée puisqu'elle a avancé sur l'ensemble du secteur (+ 23 m pour l'avancée la plus forte, au niveau de la plage de Boucan Canot). Cette avancée s'explique par les aménagements (végétalisation, notamment) réalisés par les particuliers qui ont implanté leur habitation tout le long du rivage sur ce qui était l'arrière-plage en 1950. Le plus souvent, l'habitation est située du côté de la route, et séparée de la plage par un jardin ou une piscine, puis par un mur ou muret. À l'exception des deux portions de côte encore « naturelles » (dune plantée de filaos) situées de part et d'autre du cap Homard, la zone tampon stabilisée a complètement disparu dans ce secteur. La contraction qu'a connue la plage et la zone tampon ont progressivement accru l'exposition du bâti aux houles cycloniques. Cela explique les dégâts que causent certaines houles cycloniques, comme celles générées par le cyclone Bejisa en 2014. Deux sections de côte sont stables sur le plan sédimentaire depuis 1950, la plage du cap Champagne dans sa partie nord et de Boucan Canot.

La forte augmentation de l'exposition des enjeux (notamment de ceux en situation critique) et la contraction rapide de la zone tampon entre 1950 et 1978 se traduisent logiquement par une forte hausse de la vulnérabilité entre ces deux dates et, au-delà, sur l'ensemble de la période (Figure 41C). D'autant que les ouvrages de défense qui ont été construits pour protéger les enjeux

Figure 41. Étude de cas : le littoral autour de Boucan Canot (3.3 à 3.5).



A) Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question ; B) Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense ; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude de cas.

sont artisanaux et discontinus, et ne constituent pas à ce titre une protection efficace. Les dégâts causés par le cyclone Bejisa (janvier 2014) aux propriétés littorales (destruction des murs de protection, dévastation des jardins et érosion des sols, impacts sur les piscines et habitations) ont apporté la preuve du caractère inadapté de ces ouvrages. Au vu de la tendance érosive des plages, il est à craindre que la vulnérabilité continue à augmenter dans le futur.

3.2.5. Saint-Gilles

Saint-Gilles est la principale station balnéaire de l'ouest de la Réunion et constitue une zone urbaine densément peuplée sur un linéaire côtier d'environ 5,5 km. La partie nord du secteur, du littoral de Grand Fond jusqu'au port de Saint-Gilles, est exposée aux houles cycloniques, en particulier à celles des secteurs nord à nord-ouest qui représentent 32 % des situations répertoriées (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004). Dans sa partie sud, le littoral est exposé aux houles australes pendant la saison fraîche. L'élargissement vers le nord des plages des Brisants (secteur 3.6) et de Grand Fond (secteur 3.7), traduit bien la direction sud-nord de la dérive littorale. Le platier récifal est étroit (50 à 150 m), mais il s'élargit vers le sud pour atteindre environ 350 m à proximité de la passe de l'Ermitage. Il est interrompu dans sa partie centrale par la passe de Saint-Gilles, d'une largeur d'environ 150 m et située dans le prolongement de la ravine de même nom. Cette passe influence la courantologie, puisqu'elle génère des courants de décharge qui interrompent localement la dérive littorale et rejoignent le courant de passe orienté vers le large. Ce courant est à l'origine du transfert de sédiments vers le large pendant les épisodes tempétueux. Une partie au moins des sédiments évacués vers les fonds marins pendant ces épisodes revient à la côte en période de beau temps pour réalimenter le cordon sableux qui barre l'embouchure de la ravine Saint-Gilles.

L'aménagement de Saint-Gilles a commencé au XIX^e siècle avec, en 1865, la fin du chantier de la route reliant Saint-Paul à Saint-Leu qui passe par Saint-Gilles. Le littoral a été modifié pour la première fois dans les années 1940, avec la mise en place en face de la passe de trois épis d'une vingtaine de mètres de longueur, que l'on distingue bien sur les photographies aériennes de 1949 (Figure 42). Ces épis ont été implantés pour freiner le courant de passe et permettre l'accostage des barques de pêche. L'un de ces épis, celui dit des Roches Noires, situé au nord, existe toujours aujourd'hui. L'urbanisation et l'aménagement du front de mer, qui accueille la route côtière, ont été à l'origine de la construction progressive, à partir

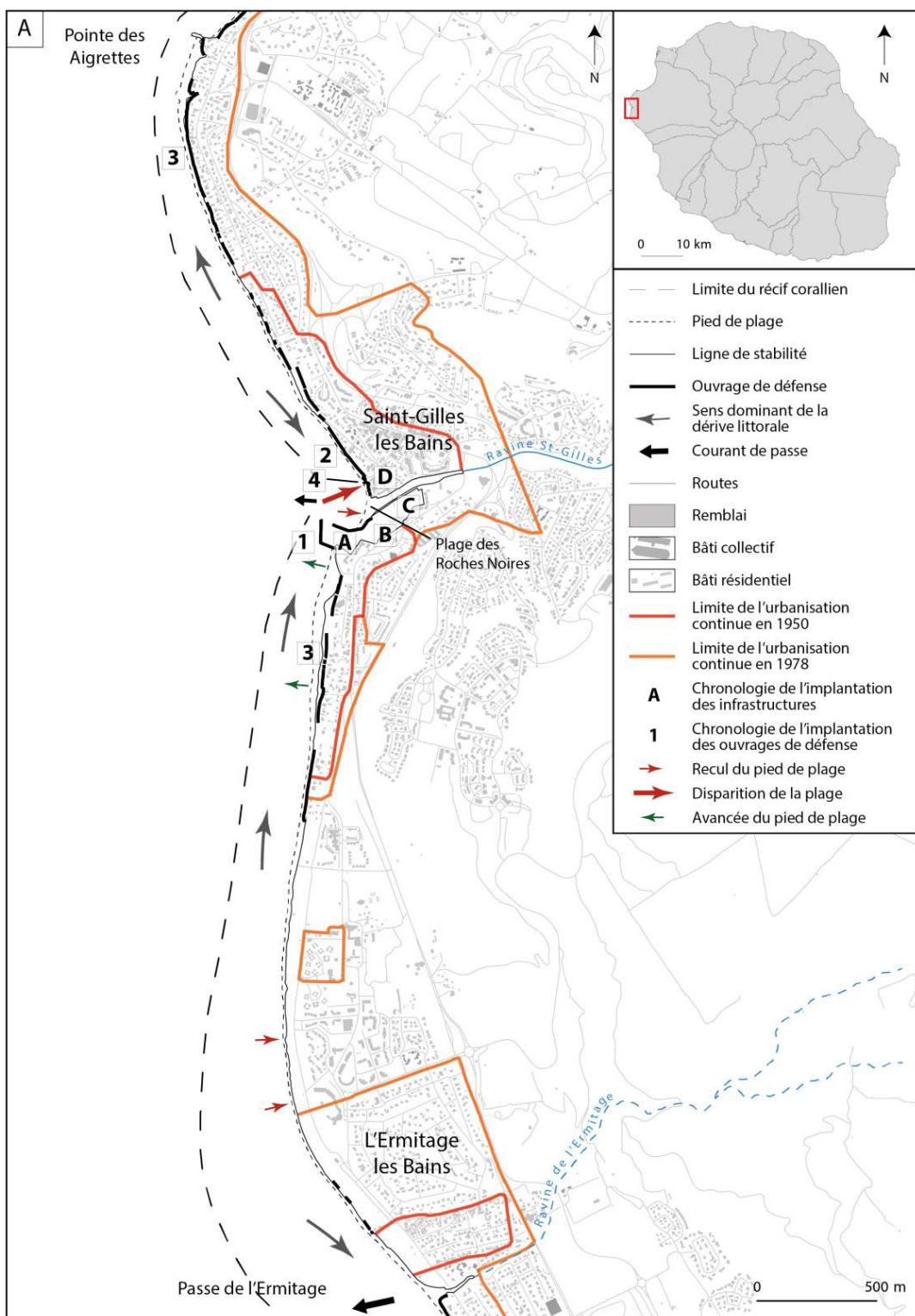
des années 1950, de murs de protection visant à protéger la route et les habitations. Le principal aménagement qui a été réalisé à Saint-Gilles est le port de pêche et de plaisance. Celui-ci apparaît déjà sur les photographies aériennes de 1971, avec ses deux jetées et son bassin, creusé dans la partie aval de la ravine. À cette date, le cordon sableux des Roches Noires est donc modifié et tronqué par l'implantation du port qui perturbe le transit sédimentaire sud-nord. L'extension du port et de ses bassins est réalisée entre 1991 et 1997 avec, en 2000, l'ouverture de l'aquarium de la Réunion sur le terre-plein central, au milieu du nouveau bassin.

Ces aménagements et les modifications morphologiques qu'ils ont engendrées ont eu trois impacts principaux. Le premier est la progradation de la plage des Brisants (+ 50 m pour le pied de plage et + 40 m pour la ligne de stabilité depuis les années 1950), sous l'effet de l'interception du transit côtier par la jetée sud du port. Le second, qui découle du précédent, est le recul de la plage des Roches Noires dont la position en aval-dérive de la jetée du port explique qu'elle ne soit plus alimentée par le courant de dérive littorale. La fragilisation de cette plage a été aggravée par la construction de murs de protection et de soutènement verticaux qui favorisent les pertes sédimentaires en période de tempête et limitent le réengraissement pendant les périodes de beau temps. Suite à la contraction de la plage des Roches Noires, le mur de soutènement de l'esplanade s'est effondré fin 2012. S'en est suivi un réaménagement du front de mer⁹ et le remplacement des murs par un cordon d'enrochement sur une partie de leur longueur. Bien que ce dernier ouvrage soit plus absorbant, il n'a pas empêché l'aggravation de l'érosion et la disparition de la plage sur une partie de sa longueur, au devant du cordon d'enrochement et des propriétés privées situées plus au nord.

Cette étude de cas illustre donc la déstabilisation progressive d'une plage sous l'effet d'aménagements qui perturbent les mouvements sédimentaires longitudinaux et transversaux. Le troisième impact des aménagements concerne le port. Celui-ci connaît un ensablement continu qui impose de le draguer régulièrement, et il peut être affecté par un phénomène de submersion-inondation pendant les épisodes tempétueux, comme l'a illustré le cyclone Bejisa en janvier 2014 : la pression exercée par les vagues cycloniques sur le cordon sableux a bloqué l'écoulement de la ravine à la mer et favorisé la submersion de la zone sud du port, qui a connu d'importants dégâts.

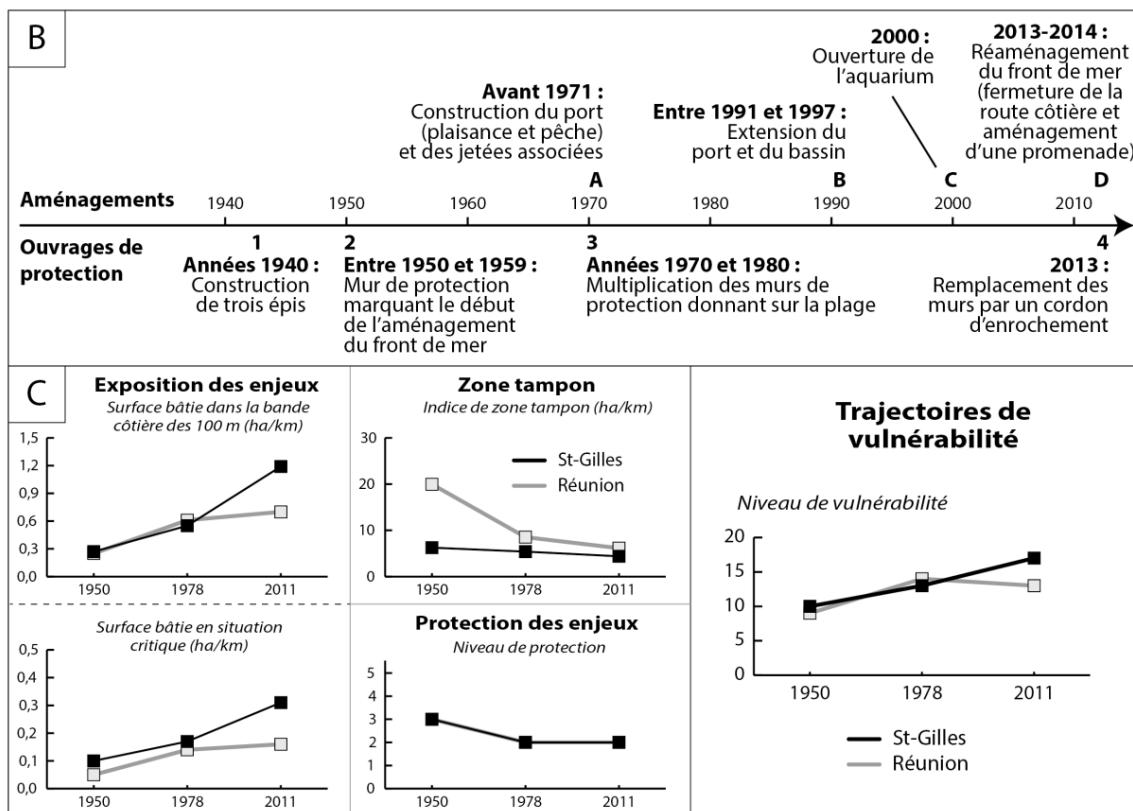
9. Fermeture de la route côtière, qui a été remplacée par une promenade.

Figure 42. Étude de cas : la station de Saint-Gilles les Bains (secteurs 3.6 et 3.7).



A. Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question.

Figure 43. Étude de cas : la station de Saint-Gilles les Bains (secteurs 3.6 et 3.7).



A. Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense ; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude decas.

Au résultat, la trajectoire de vulnérabilité de ce secteur montre une forte augmentation de la vulnérabilité entre 1950 et 2011, avec une accélération entre 1978 et 2011 (Figure 43). L'indice de zone tampon a peu évolué au cours de cette période, ce qui s'explique par la présence ancienne (dès la fin du XIX^e siècle) de la route côtière. Concernant la fixation du trait de côte, si très peu d'ouvrages sont présents en 1950 (moins de 5 % de linéaire côtier protégé), la part du linéaire côtier protégé atteint 46 % en 2011. Comme on l'a vu, ces ouvrages ont accru la vulnérabilité de ce secteur en favorisant l'urbanisation et en accélérant l'érosion.

3.2.6. La Saline

Le secteur étudié est dans le prolongement du précédent car il est délimité par la passe de l'Ermitage au nord et par la pointe des Trois-Bassins au sud (correspondant aux secteurs 3.8 et 3.9) et il constitue donc la suite de cette vaste plaine littorale qui atteint jusqu'à 1 km. Contrairement à la Baie de Saint-Paul ou à Saint-Gilles, l'installation de l'homme est plutôt récente et aucune tâche

urbaine ne se distingue en 1950 (Figure 44), seulement quelques habitations dispersées.

Cette portion de côte n'a pas connu d'évolution forte de la position de son trait de côte entre 1950 et 2011. En effet, le pied de plage est resté globalement stable, hormis au sud où un léger recul s'observe (Trois Bassins) et au centre où la plage a légèrement avancé. La ligne de stabilité à quant à elle avancé sur la quasi-totalité du littoral de la Saline, mais dans des proportions moyennes (environ + 20 m entre 1950 et 2011). On observe donc une diminution de la surface de la plage (ou zone tampon active). La zone tampon stabilisée a également diminué à cause de l'urbanisation (extension + densification du bâti). Toutefois, la surface de la zone tampon en 1950 n'est pas si importante étant donné la présence précoce d'une route qui longe la côte mais aussi de quelques parcelles bâties qui jalonnent le littoral (et nombreuses sont les parcelles ayant été défrichées, traduisant l'imminence de l'urbanisation). Les constructions au plus près du littoral vont ainsi se multiplier accompagnée de la prolifération d'ouvrages artisanaux, surtout dans les années 1970 et 1980.

Le secteur accueille aujourd'hui quelques aménagements importants, tel que l'actuel Grand Hôtel du Lagon, complexe hôtelier de 5 étoiles situé au sud de la passe de l'Ermitage. Ce dernier était déjà présent en 1978 et sa construction date certainement de la moitié des années 1970 car aucune trace n'est visible en 1971. Même si les modifications liées à cet aménagement restent limitées sur le littoral (pas d'ouvrages de protection par exemple), certaines pratiques entraînent tout de même un abaissement de la plage (comme le ramassage des débris de corail ou le défrichement).

Cette étude de cas, dont le niveau de vulnérabilité est aujourd'hui élevé (et surtout en ce qui concerne les houles australes, aléa prédominant dans ce secteur), possède en 1950 l'un des niveaux de vulnérabilité les plus faibles par rapport aux autres cas étudiés, mais une croissance soutenue s'observe entre 1950 et 1978. Même si ce niveau continue d'accroître en 2011, la hausse est moins forte. La surface bâtie dans la bande côtière des 100 m a explosé, passant de 0,3 ha en 1950 à 4,5 ha en 2011, ce qui traduit bien cette croissance démographique forte qui opère à la Réunion depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Le niveau de protection a baissé de manière importante entre 1950 et 2011. Les ouvrages étaient peu nombreux en 1950 mais les enjeux à protéger étaient très limités. En revanche, aujourd'hui, avec la densification du bâti au plus près de la plage et le caractère artisanal et non adapté des ouvrages de protection, l'on considère le niveau de protection comme très faible, ce qui contribue à l'augmentation de la vulnérabilité de ce secteur.

3.2.7. Saint-Pierre (centre-ville)

L'implantation de l'homme à Saint-Pierre est relativement ancienne, car les historiens signalent l'existence de pionniers dès la fin du XVII^e siècle. La commune fut ensuite créée en 1790 et d'importants travaux furent entrepris au cours du XIX^e siècle pour la relier aux principales villes de la Réunion, comme la construction d'une ligne de chemin de fer reliant Saint-Benoît à Saint-Pierre et Le Port, qui s'achève en 1883 après près de 30 ans de travaux. L'attractivité de Saint-Pierre a soutenu son développement (passage de 33 947 habitants en 1961 à 80 823 habitants en 2012, Figure 45), et lui a permis de devenir la seconde ville de la Réunion par sa taille et un pôle d'activités structurant dans l'essor économique du sud de la Réunion. L'ancienneté de la ville de Saint-Pierre explique que le centre urbain présente une configuration proche de l'actuelle en 1950.

Le secteur étudié, qui correspond au centre-ville de Saint-Pierre, s'étire sur 2,3 km et est bordé par un récif frangeant qui atteint 300 m de largeur

(Figure 46). Ce récif est interrompu par une passe située dans le prolongement de la rivière d'Abord, qui a déterminé l'emplacement du port. Le récif est le plus étroit au nord, à la pointe de la ravine Blanche, ce qui explique la présence de sédiments plus grossiers qu'au sud, où le récif est plus large. Le courant de dérive littorale, produit par les houles d'alizé en provenance du sud-est, longe la côte vers le nord (Cazes-Duvat et Paskoff, 2004).

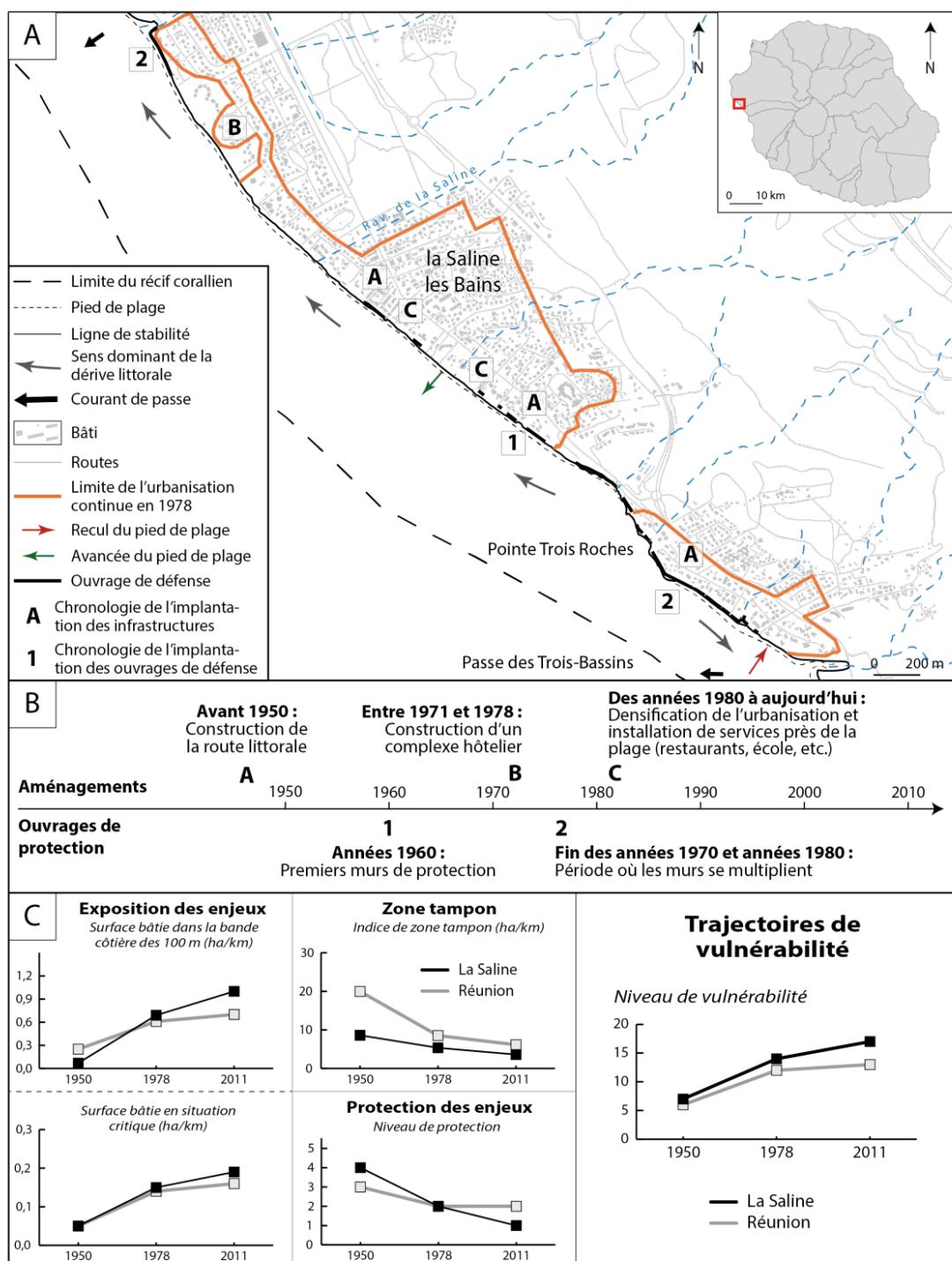
Dans ce secteur, la dynamique littorale a rapidement été perturbée par l'homme, à travers une urbanisation dense et très proche de la mer, qui a rapidement engendré la construction de murs de soutènement et de protection par les particuliers (Figure 46). Les premiers murs sont antérieurs à 1950, et ils ont été édifiés à la fois à clôturer les propriétés, et pour les protéger des entrées de sable dues aux alizés et de l'impact destructeur des vagues issues des fortes houles australes. En 1966, pratiquement tout le front de mer est emmuré. La réflexion des vagues sur les murs a favorisé l'érosion de la plage et engendré sa disparition partielle dans les années 1970, comme l'illustrent les photographies aériennes de 1978. Il est par ailleurs à noter que les ouvrages de protection qui bordent le front de mer et ont pour la plupart été construits par les particuliers sont artisanaux et en mauvais état, et ne constituent dans ces conditions pas une protection efficace face à la houle. Comme dans le cas précédent, ils contribuent donc à accroître la vulnérabilité.

Le seul secteur à avoir connu une évolution positive est celui dit des Jardins de la Plage, qui est situé à l'ouest immédiat du port. Ici, le front de mer a été réaménagé entre 2005 et 2007 (création d'un espace de loisir sur l'emplacement de l'ancienne aire de stationnement, destruction du mur de protection situé en haut de plage) et la plage rechargée en sable. L'opération de restauration de la plage qui a été réalisée sur cette portion du linéaire côtier explique la stabilité du trait de côte sur la période 1950- 2011.

La municipalité a par ailleurs limité l'urbanisation sur le site de la ravine Blanche en favorisant la réalisation d'aménagements légers, tels que des aires de pique-nique, des terrains de sport, une aire de jeux pour enfants et un parcours sportif, tout en laissant la végétation littorale se développer (patate à Durand).

La trajectoire de vulnérabilité de la ville de Saint-Pierre illustre bien l'ancienneté des changements qui sont à l'origine de sa forte vulnérabilité aux risques liés à la mer (Figure 46C). La contraction des plages et la dégradation de la zone tampon ont récemment fait prendre conscience aux autorités locales de la nécessité de restaurer et de gérer de manière adéquate le front de mer. Suite

Figure 44. Étude de cas : la station de la Saline les Bains (secteurs 3.8 et 3.9).



A) Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question.; B) Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude de cas.

aux réaménagements qu'il a connus dans deux secteurs (Jardins de la plage et ravine Blanche), le front de mer de Saint-Pierre a été embelli et sa fonction de zone tampon a été confortée. Dans ce contexte et au vu de la très forte densité de l'urbanisation de bord de mer, il est fort probable que le niveau de vulnérabilité élevé que l'on observe aujourd'hui n'augmente pas davantage dans le futur. On assistera très probablement à une stabilisation de la vulnérabilité.

3.3. Synthèse

Hormis quelques aménagements anciens (routes, ports, cimetières) datant des XVIII^e et XIX^e siècles, c'est depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale et la départementalisation en 1946 que le littoral des quatre communes étudiées a été modifié en profondeur, dans un contexte général de forte croissance démographique et de développement économique de l'île de la Réunion.

Bien que l'ampleur et les rythmes des changements observés varient en fonction des sites (Figures 47 et 48), globalement on observe : un recul relativement important de la position du pied de plage ; une augmentation du nombre des enjeux humains (bâti, routes) exposés aux risques liés à la mer, principalement sous l'effet de l'urbanisation de la bande côtière des 100 m, voire des 30 m, y compris dans des zones basses inondables et submersibles ; une diminution de la surface et une dégradation de la zone tampon ; la fixation du trait de côte par la construction d'ouvrages de défense, qui ont dans certains cas (Saint-Paul, Saint-Pierre) contribué à accroître la vulnérabilité des territoires par leurs effets négatifs (accélération de l'érosion, disparition des plages, création d'un faux sentiment de sécurité qui encourage la poursuite de l'urbanisation). Ces changements se traduisent par un phénomène de compression côtière, qui traduit la contraction de la zone tampon naturelle

terrestre sous l'effet cumulé du recul du pied de plage côté mer et de l'empietement des aménagements (urbanisation, extension du réseau routier, aménagement de ports) sur les milieux côtiers côté terre. Ce phénomène global de compression côtière est à l'origine de l'augmentation significative de la vulnérabilité des communes littorales de la Réunion face aux risques liés à la mer entre 1950 et 2011.

Au-delà de ces éléments généraux, qui constituent les causes profondes de la vulnérabilité, les trajectoires de vulnérabilité montrent des profils territoriaux très contrastés d'une commune à une autre. En premier lieu, les contrastes qui s'observent concernent les courbes de vulnérabilité. Dans certains cas, comme à Saint-Denis, on observe une inversion de tendance à la fin des années 1970, la vulnérabilité augmentant entre 1950 et 1978, et diminuant par la suite. Dans les autres cas étudiés (Saint-Pierre, Saint-Paul), la trajectoire de vulnérabilité montre une augmentation continue de la vulnérabilité entre 1950 et 2011, sous l'effet d'une forte urbanisation côtière sans mise en sécurité des enjeux par un dispositif de protection adapté. En deuxième lieu, la variabilité des situations tient à la chronologie. L'on peut de ce point de vue distinguer deux types de profils, dont le premier est celui des villes littorales anciennes (Saint-Denis, Saint-Pierre), dont la vulnérabilité aux risques liés à la mer était déjà forte en 1950, mais s'est fortement accrue dans les années 1970 sous l'effet de l'extension de l'habitat vers des zones basses inondables et submersibles situées en périphérie. Alors que la ville ancienne avait été implantée sur les planèzes volcaniques, donc en hauteur, les quartiers urbains récents issus de l'exode rural et de l'explosion démographique des années 1960-1980 ont été construits dans des zones à risque (zones alluviales situées en bordure de cours d'eau). Le second profil est celui de communes qui, bien qu'elles aient été peuplées

Figure 45. Évolution démographique de la commune de Saint-Pierre de 1961 à 2012 (Sources : Insee et Ehess).

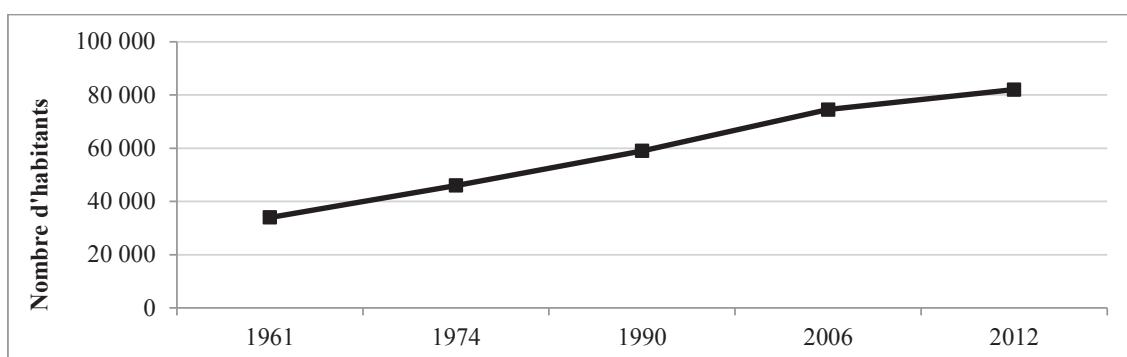
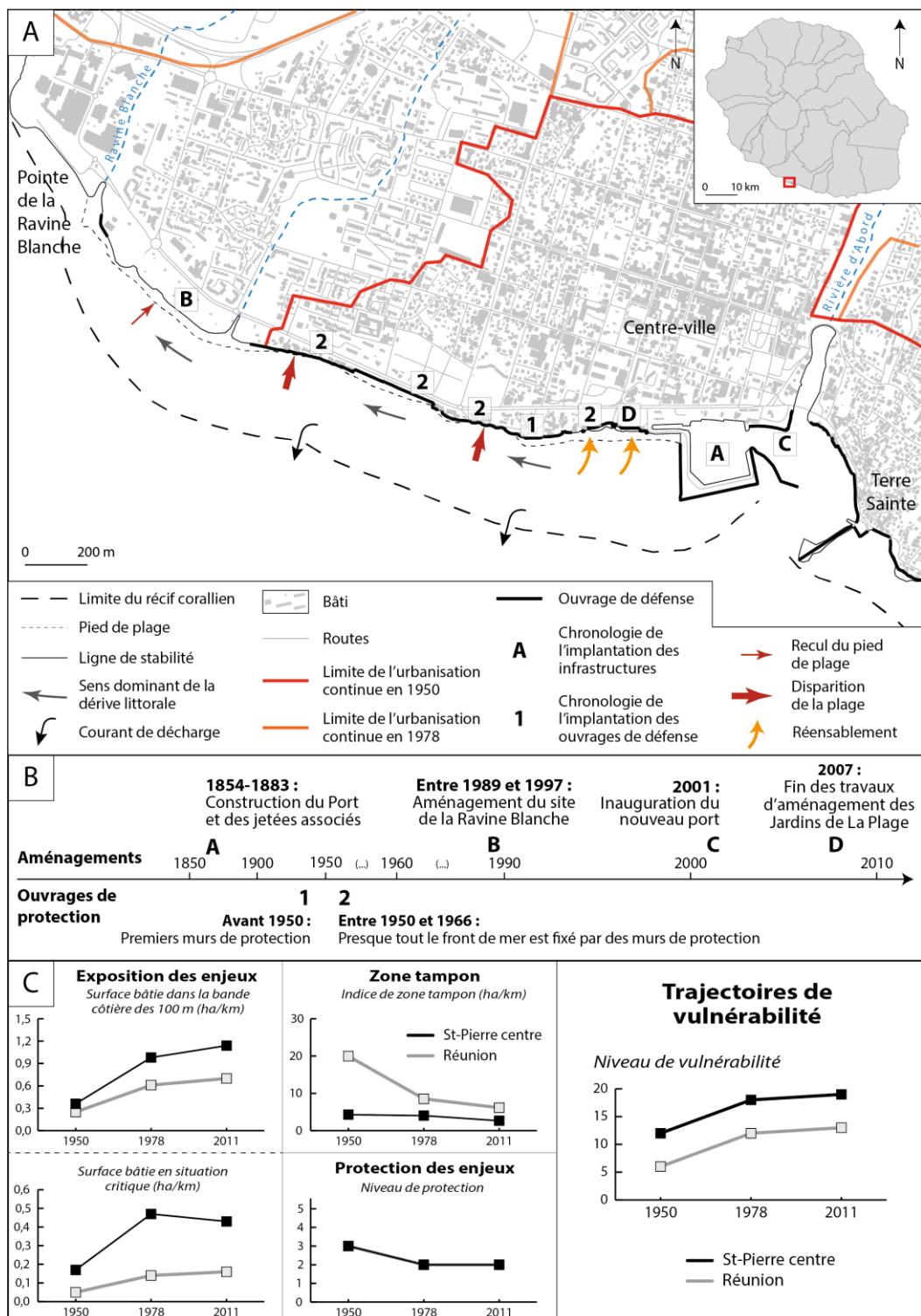


Figure 46. Étude de cas : le littoral de Saint-Pierre centre (secteur 4.1).



A) Carte schématique de l'état et des processus en jeu dans le secteur en question ; B) Frise chronologique de l'implantation des principaux aménagements et ouvrages de défense ; C) Rappel des principaux résultats statistiques et courbes de trajectoires de vulnérabilité. Dans le panel (C), les niveaux de protection sont gradués de très faible (valeur 1), à faible (2), relativement faible (3), moyen (4), et fort à très fort (5). Dans le panel (C) toujours, les courbes grises représentent la moyenne à l'échelle Réunion, et les courbes noires représentent l'étude de cas.

Figure 47. Niveaux de vulnérabilité des études de cas et trajectoires de vulnérabilité

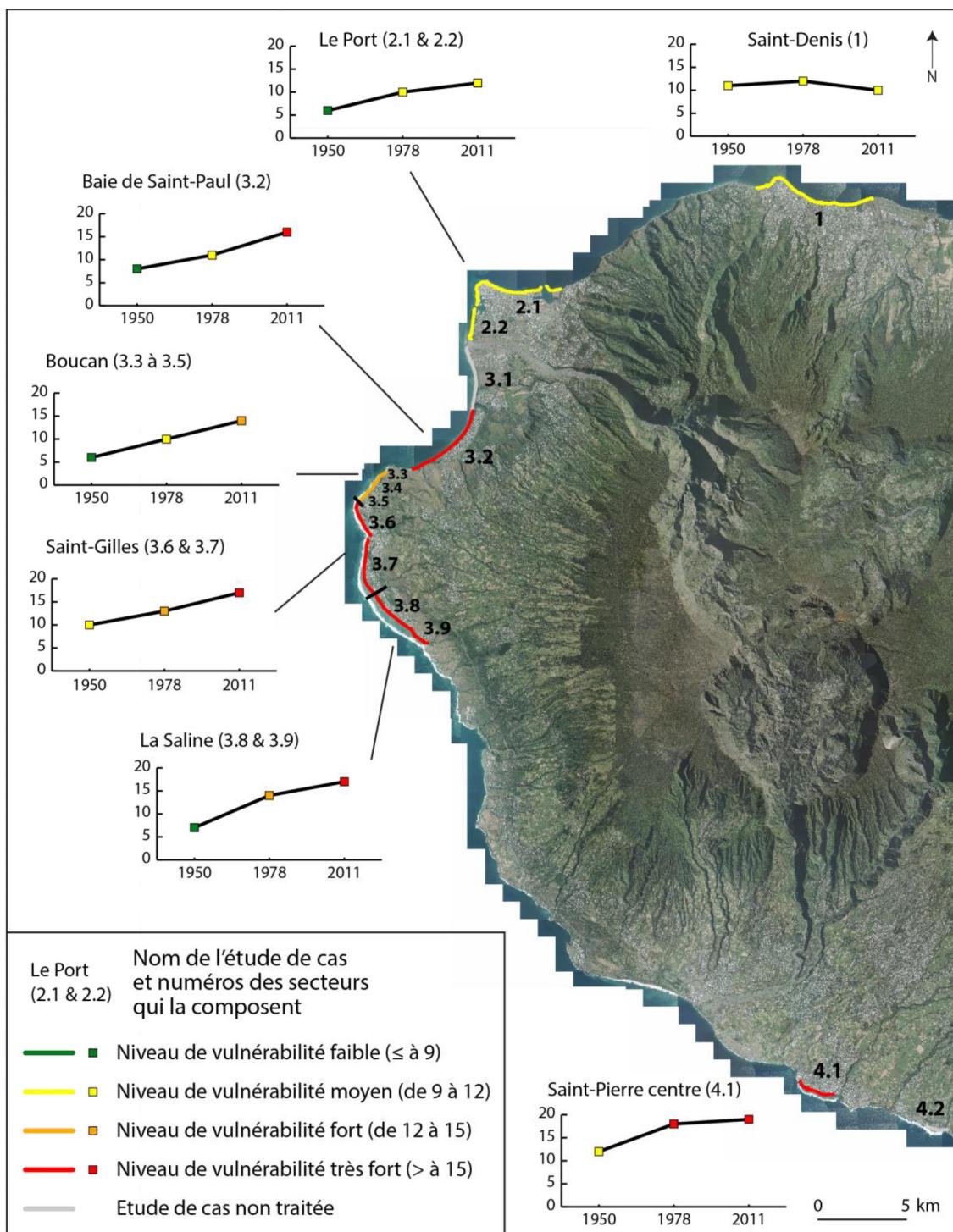
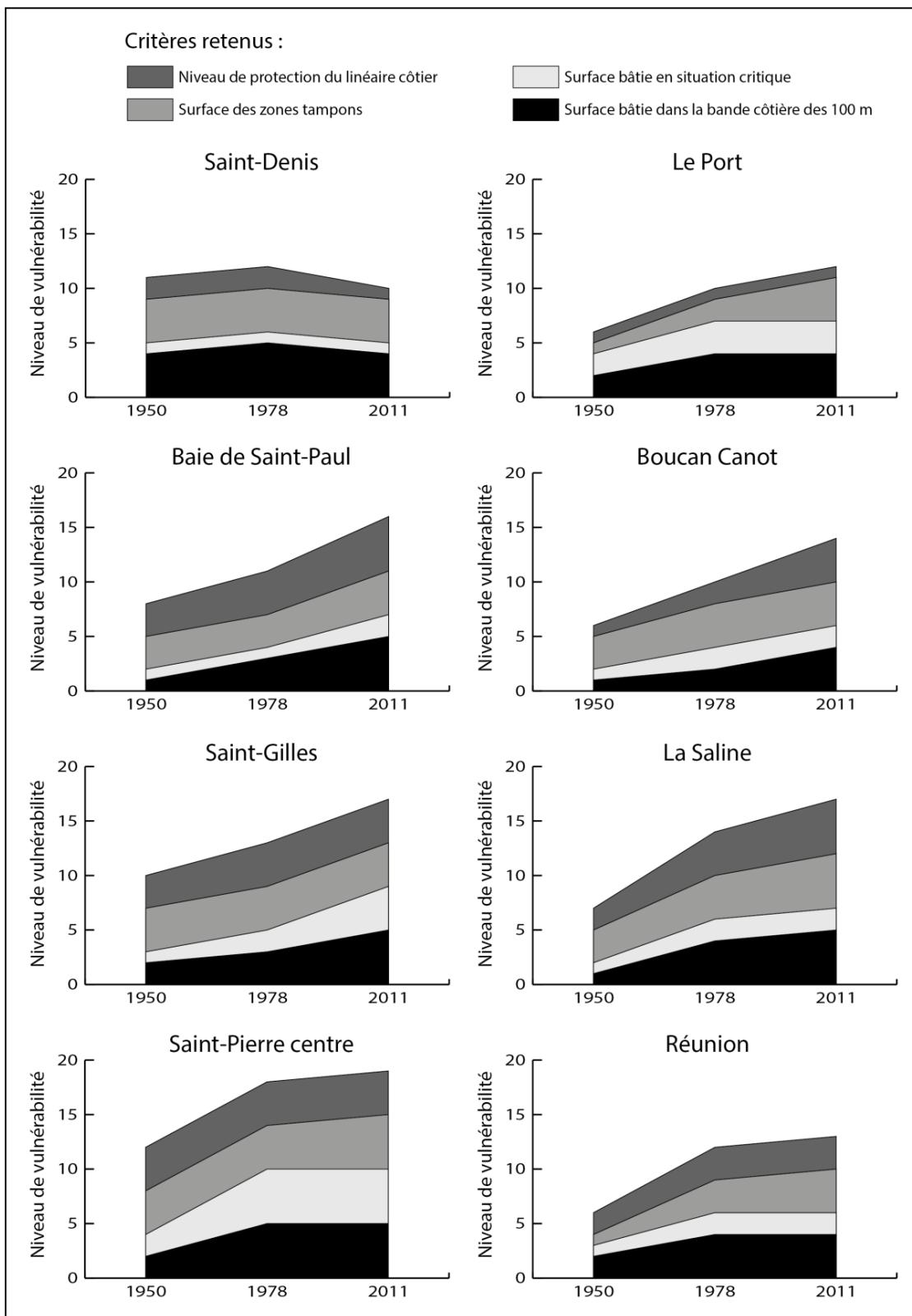


Figure 48. Contribution des différents critères dans l'évolution de la vulnérabilité des 7 études de cas et du modèle « Réunion » (ensemble des quatre communes d'étude)



précocement, ont connu un développement et des aménagements littoraux relativement peu étendus jusqu'à une date récente. C'est le cas de la commune du Port, dont le développement s'accélère considérablement à partir des années 1950-1960, et de la commune de Saint-Paul dont le littoral corallien s'urbanise en l'espace de trois à quatre décennies. Dans ces deux communes, l'implantation d'aménagements massifs (ports, en particulier) sur des côtes meubles (systèmes alluvionnaires et sédimentaires) et sensibles aux perturbations anthropiques, se traduit en l'espace de quelques décennies par une forte dégradation des milieux côtiers et par une déstabilisation du trait de côte qui accroît la vulnérabilité des enjeux humains – déjà très vulnérables par leur faible altitude, leur proximité au trait de côte, et leur implantation dans des zones basses, souvent inondables et/ou submersibles. C'est dans ces deux cas que les processus de dégradation environnementale et de déstabilisation des systèmes côtiers contribuent le plus à accroître la vulnérabilité. La différence entre ces deux cas tient au fait qu'au fur et à mesure de leur implantation, les aménagements réalisés dans la commune du Port sont protégés par des ouvrages de défense massifs, ce qui a pour effet de réduire la vulnérabilité à partir de la fin des années 1970. En revanche, quel que soit le site considéré (baie de Saint-Paul, Boucan Canot-pointe des Aigrettes, Saint-Gilles), la commune de Saint-Paul montre une hausse continue de la vulnérabilité, d'autant plus forte que les ouvrages de défense sont pour la plupart d'entre eux insuffisants pour protéger les enjeux. Saint-Paul constitue un bon exemple d'urbanisation littorale non maîtrisée, qui contribue à déstabiliser un système plage-dune en cours de dégradation rapide.

4. CONCLUSION

Cette étude démontre l'importante contribution des facteurs anthropiques (aménagement du territoire, urbanisation, développement économique, fixation du trait de côte) à l'augmentation de la vulnérabilité des littoraux dans un contexte où les événements tempétueux intenses (fortes houles australes, cyclones tropicaux) sont relativement fréquents et intenses. La départementalisation,

qui a encouragé le développement de l'île, et la forte croissance démographique qui l'a accompagné (passage de 260 000 habitants en 1950 à 845 000 habitants en 2014) ont joué un rôle majeur dans l'émergence (au Port, à Saint-Paul) et dans l'augmentation (Saint-Pierre) de la vulnérabilité des littoraux.

Les prévisions démographiques prévoient le dépassement du million d'habitants d'ici à 2030 (Sandron, 2007), bien que l'on observe un solde migratoire négatif entre 2007 et 2013. Le maintien d'une forte croissance démographique au cours des prochaines décennies constitue un facteur favorable à l'augmentation future de la vulnérabilité des littoraux, au regard des enjeux qu'ils concentrent. Un autre facteur de pression, croissant celui-là, est le changement climatique qui devrait contribuer à détériorer l'état de santé des milieux côtiers, et en particulier des coraux, ce qui aurait pour effet d'aggraver l'érosion des plages et de réduire encore la largeur des zones tampons.

Dans un tel contexte, il est plus urgent que jamais de parvenir à contrôler l'urbanisation future d'une part, et de restaurer les systèmes côtiers dégradés là où cela est encore possible. Au-delà, il serait intéressant que dans le prolongement des réaménagements de fronts de mer récemment réalisés (fermeture de routes et aires de stationnement, verdissement et réaménagement pour le tourisme et les loisirs à Saint-Pierre - Jardins de la Plage - et Saint-Paul - Boucan Canot et Saint-Gilles-les-Bains), une réflexion de fond soit engagée sur la délocalisation de quartiers urbains très vulnérables, tels qu'il en existe justement dans ces deux communes. Cela permettrait non seulement de mettre en sécurité des enjeux très exposés, mais aussi de s'attaquer par là même aux causes profondes de la vulnérabilité en restaurant des zones tampons. Seul ce type d'action permettrait d'enclencher une inversion de tendance dans la trajectoire de vulnérabilité des communes littorales concernées. Au-delà, une telle action permettrait à la Réunion d'expérimenter ce type de solution, donc de faire un pas important dans le renouvellement des politiques d'aménagement et de protection de l'environnement qui s'impose ici comme ailleurs dans le contexte du changement climatique. ■

RÉFÉRENCES

- Biribou, N., Woodroffe, C.D. (2013). Historical area and shoreline change of reef islands around Tarawa Atoll, Kiribati. *Sustainability Science*, 8(3): 345–362.
- Cazes-Duvat, V., Paskoff, R. (2004). Les littoraux des Mascareignes entre nature et aménagement. L'Harmattan, Paris.
- De la Torre, Y., Blangy, A., Vaslet, E., Mallet, C., Dewez, J. (2009). Morphodynamique des littoraux de La Réunion. Phase 3 : suivi et gestion de l'érosion côtière sur 12 sites identifiés comme sensibles. Rapport du BRGM.
- Duvat, V., Magnan, A., Pouget, F. (2013). Exposure of atoll population to coastal erosion and flooding: A South Tarawa assessment, Kiribati. *Sustainability Science*, 8(3): 423–440.
- Duvat, V., Salmon, C. (2015). Evaluation de la vulnérabilité actuelle des littoraux de la Réunion aux risques liés à la mer (Saint-Denis, Le Port, Saint-Paul, Saint-Pierre). Rapport de résultats, Programme VulneraRe. Disponible sur demande auprès des auteurs.
- Duvat, V., James, D., Salmon, C (2015). Atlas de la vulnérabilité des littoraux de la Réunion aux risques liés à la mer (Saint-Denis, Le Port, Saint-Paul, Saint-Pierre). Rapport de résultats, Programme VulneraRe. Disponible sur demande auprès des auteurs.
- Duvat, V.K.E., Salmon, C., Magnan, A.K. (2016). Guide méthodologique pour l'analyse des «trajectoires de vulnérabilité» des littoraux : application à l'île de la Réunion dans le cadre du projet VulneraRe. IDDR Study.
- Fazey, I., Pettorelli, N., Kenter, J., Wagatora, D., Schuett, D. (2011). Maladaptive trajectories of change in Makira, Solomon Islands. *Global Environmental Change*, 21(4): 1275–1289.
- Ford, M. (2012). Shoreline Changes on an Urban Atoll in the Central Pacific Ocean: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Journal of Coastal Research*, 279(2001): 11–22.
- Ford, M. (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135: 130–140.
- Ford, M.R., Kench, P.S. (2014). Formation and adjustment of typhoon-impacted reef islands interpreted from remote imagery: Nadikdik Atoll, Marshall Islands. *Geomorphology*, 214: 216–222.
- Garnier, E., Desarthe, J. (2012). Cyclones and societies in the Mascarene islands. *American Journal of Climate Change*, 2, 1-13.
- Lorion, D. (2006). Endiguements et risques d'inondation en milieu tropical. L'exemple de l'île de la Réunion. *Norois*, 201: 45-66.
- Magnan, A., Duvat, V., Garnier, E. (2012). Reconstituer les « trajectoires de vulnérabilité » pour penser différemment l'adaptation au changement climatique. *Nature Sciences Sociétés*, 20(1): 82–91.
- Magnan, A.K., Duvat, V.K.E. (2016). Trajectoires de vulnérabilité et adaptation au changement climatique à la Réunion, Iddri, *Policy Brief* N°08/16.
- McLean, R., Kench, P. (2015). Destruction or persistence of coral atoll islands in the face of 20th and 21st century sea-level rise? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(5): 445–463.
- Noble, I., Huq, S., Anokhin, Y., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F., Osman-Elasha, B., Villamizar, A. (2014). Adaptation needs and options. In: Field C., Barros V.R., Mastrandrea M.D. (Eds.) et al. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Orlove, B. (2005). Human adaptation to climate change: A review of three historical cases and some general perspectives. *Environmental Science and Policy*, 8(6): 589–600.
- Reenberg, A., Birch-Thomsen, T., Mertz, O., Fog, B., Christiansen, S. (2008). Adaptation of Human Coping Strategies in a Small Island Society in the SW Pacific—50 Years of Change in the Coupled Human–Environment System on Bellona, Solomon Islands. *Human Ecology*, 36(6): 807–819.
- Sandron, F. (2007). La population réunionnaise. Analyse démographique. Paris: IRD Editions.
- Webb, A. (2006). Analysis of coastal change and erosion - Tebunginako Village, Abaiang, Kiribati. SOPAC Project Report 53.
- Webb, A.P., Kench, P.S. (2010). The dynamic response of reef islands to sea-level rise: Evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change*, 72(3): 234–246.
- Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H., Chikamori, M. (2007). Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change*, 57(3-4): 407–416.

Trajectoires de vulnérabilité des littoraux de l'île de la Réunion aux risques liés à la mer (1950-actuel)

V.K.E. Duvat, C. Salmon, A.K. Magnan (Iddri)

- Magnan, A.K., Duvat, V.K.E. (2016). Trajectoires de vulnérabilité et adaptation au changement climatique à la Réunion, Iddri, *Policy Brief* N°08/16.
- Magnan A.K., Charpentier C. (2016). Les littoraux de la Réunion face aux risques liés à la mer : quelle(s) vision(s) du futur par les acteurs ? Iddri, *Study* N°05/16, 34 p.
- Magnan, A.K., Ribera, T., Treyer, S. (2015). National adaptation is also a global concern, Iddri, *Working Paper* N°04/15.
- Magnan, A.K. *et al.* (2015). What adaptation chapter in the new climate agreement?, Iddri, *Policy Brief* N°08/14.

Publications disponibles en ligne sur : www.iddri.org

Institut de recherche sur les politiques, l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri) a pour objectif d'élaborer et de partager des clés d'analyse et de compréhension des enjeux stratégiques du développement durable dans une perspective mondiale. Basé à Paris, l'Iddri accompagne les différents acteurs dans la réflexion sur la gouvernance mondiale des grands problèmes collectifs que sont la lutte contre le changement climatique, la protection de la biodiversité, la sécurité alimentaire ou l'urbanisation et participe aux travaux sur la redéfinition des trajectoires de développement.

L'Iddri porte une attention toute particulière au développement de réseaux et de partenariats avec les pays émergents et les pays les plus exposés aux risques, de façon à mieux appréhender et partager différentes visions du développement durable et de la gouvernance. Afin de mener à bien son action, l'Iddri s'insère dans un réseau de partenaires issus des secteurs privé, académique, associatif ou public, en France, en Europe et dans le monde.

Institut indépendant, l'Iddri mobilise les moyens et les compétences pour diffuser les idées et les recherches scientifiques les plus pertinentes en amont des négociations et des décisions.

Ses travaux sont structurés transversalement autour de sept programmes thématiques : Gouvernance, Climat, Biodiversité, Océans et zones côtières, Fabrique urbaine, Agriculture et Nouvelle Prospérité.

Dans le cadre de son partenariat avec Sciences Po, de nombreux chercheurs de l'Iddri participent aux enseignements ainsi qu'au développement de programmes de recherche.

Fondation de recherche reconnue d'utilité publique, l'Iddri met à la disposition de tous, via son site Internet, ses différentes analyses et propositions.

L'Iddri organise sa politique de publications autour de collections propres, d'ouvrages en partenariat (comme *Regards sur la Terre*, fruit d'une collaboration avec l'Agence française de développement et d'un partenariat éditorial avec Armand Colin), et de publications dans des revues scientifiques. L'Iddri publie également les études menées dans le cadre du Club d'ingénierie prospective énergie et environnement [CLIP] : *Les Cahiers du CLIP*. Les collections de l'Iddri sont constituées de textes courts (*Issue Briefs* et *Policy Briefs*), de documents de travail (*Working Papers*) et d'études ou rapports (*Studies*).

Pour en savoir plus sur les activités et les publications de l'Iddri, visitez www.iddri.org

www.iddri.org

