



HAL
open science

Vers une stratégie de protection du littoral à Ouvéa (NC). Bilan de la mission prospective de Mars 2023 (doc final)

Bouchette F.

► To cite this version:

Bouchette F.. Vers une stratégie de protection du littoral à Ouvéa (NC). Bilan de la mission prospective de Mars 2023 (doc final): GLADYS report 34. Gladys Beach Institute, Université de Montpellier. 2023, pp 30. hal-04250389

HAL Id: hal-04250389

<https://hal.umontpellier.fr/hal-04250389>

Submitted on 19 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Vers une stratégie de protection du littoral à Ouvéa (NC)

Bilan de la mission prospective de Mars 2023 (doc final)



Vers une stratégie de protection du littoral à Ouvéa (NC)

Bilan de la mission prospective de Mars 2023 (doc final)

Frédéric Bouchette (GLADYS/ Université de Montpellier)



En bref...

Ce rapport vulgarisé restitue le travail réalisé par F. Bouchette au nom de Gladys et Université de Montpellier lors d'un séjour sur l'île d'Ouvéa (Iles Loyauté, Nouvelle Calédonie) portant sur (i) la caractérisation des risques récifo-lagonaires et (ii) la construction d'un plan de protection spécifiquement pour les plages sableuses lagonaires du nord de l'île. Le document est synthétique et ne constitue pas un travail traditionnel d'ingénierie ; il est rédigé pour les gestionnaires non spécialistes. Il s'appuie sur des observations in-situ lors d'une mission organisée en mars 2023, l'analyse d'archives (photos, imagerie satellitaire), d'interviews de la population, et de plusieurs types de simulations de l'hydraulique et de la morphodynamique sableuse lagonaire. Le travail a fait émerger un plan d'action pour les plages lagonaires du nord de l'île – au niveau de Saint Joseph – qui est présenté, et qui doit donner lieu à la mise en place d'un prototype pour la protection de ces plages à l'automne 2023. Les types de protection présentés dans ce rapport sont ceux définis au sortir de la mission de mars 2023 et sont amenés à évoluer potentiellement jusqu'aux derniers ajustements lors de la mise à l'eau. Les contraintes logistiques sont également décrites, ainsi que plusieurs propositions de suivis visant à bien comprendre les mécanismes de résilience hydro-sédimentaire en jeu, l'efficacité de la solution, et facilitant à l'avenir l'extension d'une telle démarche à d'autres plages d'Ouvéa.

Merci de citer ce document avec la référence suivante :

Bouchette, Frédéric (2023). *Vers une stratégie de protection du littoral à Ouvéa (NC). Bilan de la mission prospective de Mars 2023*. GLADYS report 34, Gladys Beach Institute, Université de Montpellier, pp 30

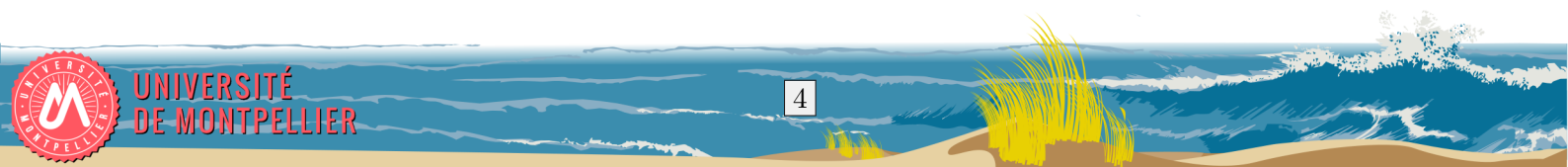
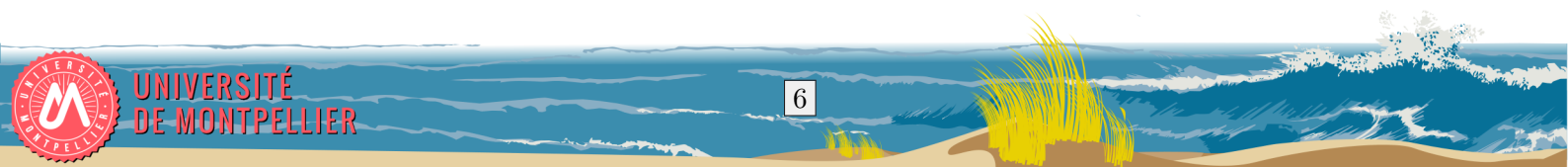




Table des matières

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introduction | 7 |
| 2 | Identification et hiérarchisation des problématiques | 8 |
| 2.1 | Préoccupation des acteurs locaux en matière de risques récifo-lagonaires | 8 |
| 2.2 | Formulation des problématiques | 8 |
| 2.3 | Couplages potentiels entre les problématiques | 10 |
| 2.4 | Extension de la réflexion au reste de l'île d'Ouvéa | 11 |
| 3 | Éléments de description du contexte hydro-morphodynamique | 11 |
| 3.1 | Caractéristiques principales du littoral de l'anse de Saint Joseph | 11 |
| 3.2 | Contexte météo-marin | 13 |
| 3.3 | Éléments de compréhension pour la problématique 1 | 14 |
| 3.4 | Éléments de compréhension pour la problématique 2 | 17 |
| 3.5 | Éléments de compréhension pour la problématique 3 | 20 |
| 4 | Vers un prototype de contrôle du recul du trait de côte | 22 |
| 4.1 | Principe fondateur du contrôle du recul du trait de côte | 22 |
| 4.2 | Robustesse de la démarche et sens profond du principe protecteur | 24 |
| 4.3 | Caractéristiques générales du prototype | 24 |
| 4.4 | Travail de dimensionnement et de définition du suivi du prototype | 26 |
| 5 | Protocole logistique, chemin critique et calendrier | 27 |
| 6 | Conclusion et perspectives | 29 |
| 7 | Remerciements | 30 |
| | Références | 30 |



1 Introduction

La Province des Îles Loyauté en Nouvelle Calédonie s'est engagée dans une démarche d'élaboration d'une stratégie de gestion des aléas naturels en zone récifo-lagonaire sur l'île d'Ouvéa (Nouvelle Calédonie). L'ambition est que cette démarche favorise le développement économique de l'île via la mise en place de filières de production de matériaux et de services, et qu'elle reste dans le même temps compatible avec une vision écologique et raisonnée du développement insulaire. Par l'entremise de Green Cross France & Territoire, la Province s'est rapprochée de l'Institut des Plages Gladys (une structure de recherche directement sous la tutelle de l'Université de Montpellier et du CNRS) pour mener un travail a) d'identification et de hiérarchisation de ces aléas littoraux et des processus hydrauliques et morphodynamiques sous-jacents, b) de proposition d'actions opérationnelles de lutte contre l'érosion littorale **concrètes** et à mettre en oeuvre à **court terme** sur la partie nord des plages lagonaires de l'île (Figure 1). Dans cette première initiative, la généralisation de la prise en charge de l'érosion à l'échelle de l'ensemble de l'île reste une perspective. Il en est de même pour l'élaboration de solutions R&D pour les risques récifo-lagonaires identifiés (hors érosion).

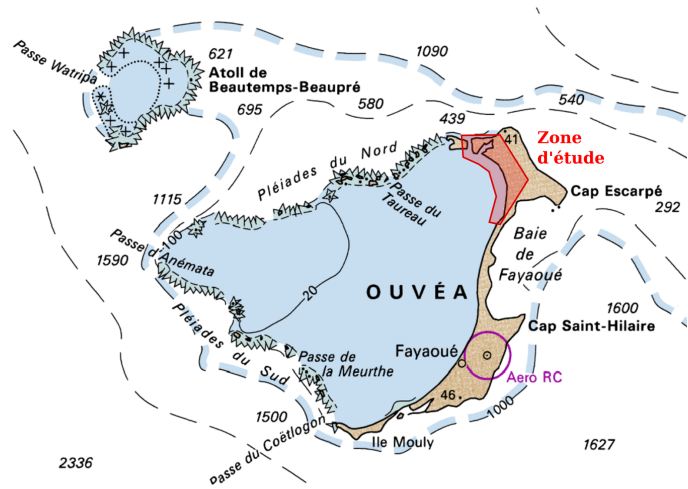


FIGURE 1 : L'île d'Ouvéa en Nouvelle Calédonie (extrait de la carte navigation SHOM) et localisation de la zone concernée par les analyses proposées dans ce rapport.

La demande de la Province et de Green Cross était de réaliser un diagnostic sur la base des données existantes, en insufflant l'ensemble de l'expertise historique de Gladys sur l'hydraulique récifo-lagonaire et les solutions de protection douces en zone littorale, mais sans mener de nouvelles études lourdes qui auraient ralenti le calendrier de mise en place d'une solution réelle. Cette vision, tout à fait en phase avec la stratégie de Gladys dans ses missions de R&D littorale, fait qu'à l'été 2023, le partenariat Province / Green Cross et Université de Montpellier / Gladys est capable de se projeter sur un prototype de protection du littoral des plages lagonaires du nord de l'île d'Ouvéa qui sera mis à l'eau dès l'automne 2023.

Le présent rapport restitue exclusivement le travail réalisé par Frédéric Bouchette pour Gladys / Université de Montpellier lors d'un séjour en mars 2023 sur l'île d'Ouvéa dans le cadre d'une invitation par la Province des Îles Loyauté, en dehors de tout autre cadre partenarial. Les travaux d'analyse de la situation et de réflexion sur une solution de protection qui ont été menés par Frédéric Bouchette jusqu'au printemps 2023 sont également restitués, lorsqu'ils sont en rapport direct avec la mission réalisée sur place. Ce document ne concerne pas la présentation du prototype officiel choisi pour renforcer la protection du littoral, et retenu pour une mise à l'eau à l'automne 2023 ; ceci fait l'objet d'un document distinct strictement orienté ingénierie.

Dans la suite, on présente dans une première section les problématiques telles qu'elles ont été présentées par la Province et Green Cross, et telles qu'elles sont reformulées par Gladys. Ceci permet de définir le champ des actions à mener sur Ouvéa pour accompagner la gestion du risque récifo-lagonaire. Dans une seconde section, on propose un résumé pédagogique de la situation sur le nord de l'île coté lagon en termes de risques hydro-sédimentaires en contexte récifo-lagonaire, en prenant soin de hiérarchiser les contenus et recentrer uniquement sur les problématiques retenues. On propose une troisième partie organisée autour du choix des types de protection, et de la justification de leur pertinence. La quatrième partie est orientée autour de la logistique générale en lien avec le déploiement

d'un prototype à l'automne 2023. Enfin, une conclusion permet de replacer ce document dans le cadre partenarial qui se met en place entre la Province des Îles Loyauté et Gladys pour les années à venir, et peut tenir lieu de document de cadrage des tâches de Gladys au sein de ces opérations partagées.

2 Identification et hiérarchisation des problématiques

2.1 Préoccupation des acteurs locaux en matière de risques récifo-lagonaires

Sur l'île d'Ouvéa (Figure 1), les échanges entre les acteurs locaux engagés dans la gestion et la protection du littoral, c'est à dire la Province, la mairie, les chefferies et des regroupements au sein de la société civile – associations ou acteurs ayant des préoccupations environnementales ou économiques en lien avec le littoral – ont facilité la formulation d'une série de constats et craintes qui sont identifiées et partagées par toutes les parties. Dans le cadre de ce document, il est uniquement question des sujets en lien avec les aléas récifo-lagonaires, qui plus est sur une zone circonscrite au nord de l'île principale (Saint Joseph et zones situées plus au nord jusqu'aux Pléiades ; Figure 1).

Les discussions entre Gladys et l'ensemble de ces partenaires permettent de résumer la perception locale de la situation de la manière suivante :

- le constat est fait d'une tendance à l'érosion des plages sableuses localisées à l'intérieur du lagon d'Ouvéa, sur la face ouest de l'île principale. Cette érosion est clairement identifiée dans la baie de Saint Joseph, la zone au coeur de ce travail. Le terme érosion est entendu par les acteurs locaux comme le déplacement du trait de côte moyen vers l'est, c'est à dire vers les enjeux (cimetières, voirie, habitations, constructions officielles comme les chefferies) ;
- le constat est fait que la dynamique de la passe de la nurserie (Figure 2), principale connexion entre la mangrove et le lagon, est complexe, et que cette passe est soumise à des épisodes d'ouverture et de fermeture avec une tendance long-terme vers une érosion des berges sud de la passe, et des transformations mal cernées de la dynamique d'ensemble du système
- les acteurs locaux interprètent aussi ces transformations de la passe de la nurserie comme potentiellement dangereuses pour l'équilibre écologique de la mangrove (salinisation, oxygénation, mobilité des espèces) ;
- le constat est fait qu'on prétend observer les effets indirects d'une salinisation de la mangrove à plusieurs endroits (plus ou moins proches de l'océan ouvert ou du lagon), sous la forme de la dégradation de certaines espèces sensibles (les cocotiers), ou d'un ressenti de la population sur la contamination de l'eau de la mangrove utilisée à des fins alimentaires ou agricoles ;
- il existe une forte crainte vis à vis du blanchiment des coraux. Les acteurs locaux s'inquiètent de cette problématique par analogie avec d'autres sites en Océanie où la tendance au blanchiment est clairement avérée. Sur les Pléiades Nord, la question reste ouverte et incertaine, mais l'inquiétude domine quant aux effets d'un tel blanchiment sur l'ensemble de la dynamique lagonaire ;
- Les craintes qui sont exprimées sur l'érosion des plages lagonaires le sont également pour les micro-plages localisées sur la façade nord-est de l'île directement exposées aux houles océaniques.

2.2 Formulation des problématiques

Il est possible de ré-agencer les informations collectées auprès de la Province, la mairie, les chefferies du Nord et d'autres acteurs, sous la forme de problématiques scientifiques qui – une fois proprement formulées en questions hydro-morpdynamiques – peuvent servir de point de départ à la construction d'une stratégie de gestion des risques récifo-lagonaires sur Ouvéa. On a fait le choix a posteriori de classer les préoccupations locales en 4 problématiques distinctes.

Elles sont classées selon l'ordre de priorité suivant, établi par les acteurs locaux :

- **Problématique 1 : tendance long-terme au recul du trait de côte sur les plages sableuses de l'anse de Saint Joseph.** Le recul du trait de côte sur la zone est avéré et quantifiable (plusieurs décimètres par an) ; mais il ne doit pas être confondu avec la diminution du stock sableux sur la même zone, qui reste hypothétique. La problématique principale est celle de la caractérisation et de la gestion de ce recul dans un contexte où le trait de côte se rapproche désormais depuis quelques années des enjeux économiques et patrimoniaux qui sont fixés sur des zones émergées utiles d'extension très limitée ;
- **Problématique 2 : morphodynamique de la passe de la nurserie et dynamique du niveau d'eau dans la mangrove.** La taille, la forme et la position de la passe reliant le lagon à la nurserie au Nord de Saint Joseph détermine la quantité d'eau qui peut rentrer dans la mangrove pendant les périodes de haut niveau d'eau dans le lagon. La quantité d'eau entrant dans la mangrove détermine la dynamique de son niveau d'eau, donc le temps de résidence de l'eau (à l'origine des mélanges chimiques) ainsi que l'envoi exceptionnel de zones normalement sèches où se sont développées de nombreuses activités économiques pourtant loin du trait de côte lagonaire actuel. Cette seconde problématique nourrit directement l'analyse du risque submersion général dans le nord d'Ouvéa. Plus généralement, elle permet d'appréhender la question de la disparition des terres arables et utiles sur l'île du fait de la montée du niveau marin relatif, et des modifications de la nature et de l'occurrence des phénomènes météo-marins extrêmes impactant Ouvéa ;



FIGURE 2 : La baie de Saint Joseph, les Pléiades Nord et quelques termes et morphologies clé sur la zone. On liste également les 4 problématiques formulées à partir des préoccupations des acteurs locaux. Ces thèmes sont au coeur des préoccupations sociétales locales en matière de gestion des risques récifo-lagunaires.

- **Problématique 3 : intrusion saline dans la mangrove.** La mangrove peut être contaminée par des échanges chimiques (modification de la salinité ou autres processus) avec le lagon via la passe de la nurserie, ou directement en souterrain via le cordon dunaire résiduel existant entre le lagon et la mangrove dans sa partie ouest, ou encore par des connections aériennes temporaires ou souterraines entre l'océan ouvert et la partie de la mangrove proche de la façade est exposée de l'île. La problématique est de caractériser la dynamique potentielle des intrusions salines, les temps de réaction du système, et l'aggravation des processus en jeu sous scénario de changement global. Si nécessaire, la problématique peut englober un volet sur l'évolution de la ressource en eau douce ;



- **Problématique 4 : blanchiment des coraux et modification de la rugosité du système récifal externe.** Le blanchiment des coraux est un phénomène mondial bien identifié par les populations et qui renvoie à la disparition aggravée de la biodiversité marine mondiale et aux conséquences de ces perturbations sur la vie humaine sur terre en général. Ici, plus modestement, la problématique englobe essentiellement les effets du blanchiment des coraux sur la rugosité du récif (c'est à dire la densité et l'amplitude des irrégularités du sol créées par la présence des coraux) qui contrôle totalement la dissipation de l'énergie des vagues et donc les flux d'eau pouvant pénétrer le lagon par les passes et les barrières récifales. Le blanchiment induit une fragilisation du corail, plus facilement cassé par les vagues, donnant *in fine* un fond plus plat, moins rugueux, favorisant une plus grande pénétration de l'énergie issue des processus météo-marins au sein du système interne (et donc sur les plages lagunaires).

2.3 Couplages potentiels entre les problématiques

Les 4 problématiques évoquées dans le paragraphe précédent sont individualisées pour des raisons pratiques, en particulier afin de construire plus facilement un calendrier potentiel d'analyse et de traitement de chacun de ces sujets dans le cadre du partenariat Province / Gladys. Mais on a pris le soin de proposer un découpage s'appuyant sur la distinction des problématiques en fonction de leur dépendance à des processus hydrauliques et morphodynamiques distincts au premier ordre.

Ainsi, la problématique 1 est liée au premier chef à l'état d'agitation du lagon (vagues et courantologie induite par le champ de vagues). La problématique 2 est contrôlée par la morphodynamique de la passe entre le lagon et la mangrove. La problématique 4 est contrôlée par les conditions météo-marines océaniques externes, et par l'état de dégradation du récif lui-même, de manière totalement indépendante de ce qui se passe dans le lagon. Pour la problématique 3, la séparation est moins facile, car les intrusions salines sont bien évidemment contrôlées par les moteurs des problématiques 1 et 2 (agitation lagonaire et morphodynamique de la passe). Mais cette problématique 3 est aussi largement sous contrôle des flux souterrains, qui n'ont a priori aucun rôle dans les autres problématiques et ce sujet induit des travaux très spécifiques relevant de l'hydrogéologie couplée à l'hydraulique littorale.

Pour autant, on ne peut pas exclure que certains mécanismes hydro-sédimentaires impliqués dans une problématique donnée peuvent aussi être des facteurs de contrôle d'autres problématiques. On liste quelques couplages à garder en tête pour maintenir un regard critique sur les travaux à venir :

- comme on l'a dit plus haut, les processus de salinisation de la mangrove peuvent être contrôlés par les flux souterrains à travers le lido sableux ou la barrière récifale externe, mais sont bien évidemment aussi le fait de l'advection d'eau par la passe entre le lagon et la mangrove ;
- la modification de la rugosité du récif par blanchiment du corail induit une modification des flux énergie entrant dans le lagon. Le champ de vagues se propageant jusqu'aux côtes sableuses de l'anse de Saint Joseph peut donc être altéré par cette dégradation et à moyen terme, plus d'énergie peut atterrir sur les plages, avec des effets de bord (i) sur l'érosion sableuse (problématique 1), (ii) sur les entrées d'eau dans la mangrove par modification de la forme de la passe ou modification des forçages hydrauliques imposés sur la passe (problématique 2), voire même (iii) sur les contraintes exercées sur le massif sableux séparant la mangrove du lagon et donc sur les flux souterrains (problématique 3) ;
- de manière plus subtile, on peut aussi envisager qu'une modification de la rugosité du récif (problématique 4) ne change pas seulement l'amplitude des flux d'énergie entrant, mais la nature du signal spectral passant le récif. En particulier, on ne peut pas exclure la modification du spectre dans les basses fréquences, avec génération d'ondes longues (infra-gravité, seiche) qui sont des moteurs importants du transport sédimentaire (problématique 1) ou du niveau d'eau à la cote (problématique 2) ;



- certaines modifications de la forme et du degré d'ouverture de la passe entre le lagon et la mangrove pourraient modifier l'amplitude et le sens des flux sédimentaires longitudinaux et avoir une certaine influence sur les taux de recul du trait de côte sur certaines zones de l'anse de Saint Joseph ;
- la modification de la rugosité du récif (problématique 4) peut changer les flux entrants par la passe de Faasi (Figure 1). Ceux-ci semblent contrôler le blocage du flux sédimentaire longitudinal s'exprimant du Sud vers le Nord dans l'anse de Saint Joseph (flux globalement compensé par un flux de direction opposé en moyenne). On peut envisager une perturbation de ce blocage et des modifications dans le bilan des flux longitudinaux à l'échelle de l'anse de Saint Joseph (problématique 1).

2.4 Extension de la réflexion au reste de l'île d'Ouvéa

Comme il a été dit, le document ne concerne que l'anse de Saint Joseph et la partie la plus septentrionale de l'île d'Ouvéa, à la demande de la Province. Toutefois, l'extension des problématiques à d'autres secteurs de l'île peut être envisagé. La problématique 1 peut être étendue à l'échelle de l'île, sachant qu'au Sud, au niveau du Pont de Mouly et la baie de Lekiny, il faut s'attendre à une plus grande complexité des schémas de circulation hydraulique et donc envisager une adaptation des stratégies de protection. La problématique 2 ne peut pas être étendue telle qu'elle puisque la mangrove s'exprime essentiellement au nord. Au sud, il serait préférable de définir une autre problématique qui serait exclusivement axée sur l'engorgement progressif des zones arables et utiles par la mer en contexte de montée du niveau marin relatif et sur la submersion en période de forçage extrême. Alternativement, une telle problématique pourrait être définie à l'échelle de la totalité de l'île et la problématique 2 serait ciblée sur la dynamique stricte du niveau d'eau dans la mangrove et la morphodynamique de la passe. La problématique 3 peut être généralisée partout pour ce qui est de la salinisation des nappes souterraines ; par contre, la remarque faite pour la problématique 2 concernant la mangrove reste vraie dans ce cas aussi : son étude au sud n'a pas de sens. La problématique 4 peut être généralisée à l'échelle de l'intégralité d'Ouvéa sans restriction. Le blanchiment potentiel des coraux au sud de l'île semble d'ailleurs plus contraint et mieux observé qu'au nord.

3 Éléments de description du contexte hydro-morphodynamique

Dans cette section, on présente la zone d'étude et on en rappelle les caractéristiques morphologiques les plus importantes ainsi que le contexte météo-marin. Puis on documente les 3 premières problématiques identifiées par les acteurs locaux. La quatrième problématique n'a fait l'objet sur place que d'une série de plongées visant à estimer visuellement l'état de blanchiment du corail au niveau des Pléiades Nord qui ne justifie pas une restitution écrite. A partir d'ici, le document se concentre sur les 3 premières problématiques. Le principe du séjour de mars 2023 était de s'appuyer sur l'observation directe de la situation sur place et l'expérience de Gladys en hydro-morphodynamisme littoral pour évaluer la situation. Dans cette section, on donne donc des informations vulgarisées nécessaires à la compréhension des trois problématiques résultant de cette approche heuristique. Pour les problématiques 2 et 3, on propose des pistes de développement directement. Pour la problématique 1, le reste du document développe une proposition de gestion complète.

3.1 Caractéristiques principales du littoral de l'anse de Saint Joseph

La figure 3 montre un profil type de plage sableuse dans l'anse de Saint Joseph au nord de l'île d'Ouvéa. Le profil est constitué d'une mangrove située à l'arrière d'un cordon dunaire fossile végétalisé mais résiduel (en général largement attaqué par les vagues), puis d'une plage émergée de quelques mètres de large, et d'une avant-côte sableuse de type dissipatif (pente moyenne inférieure à 0.01). La figure 4

montre des exemples de plage mettant en évidence le caractère érosif dominant de l'ensemble du système dans l'anse de Saint Joseph.

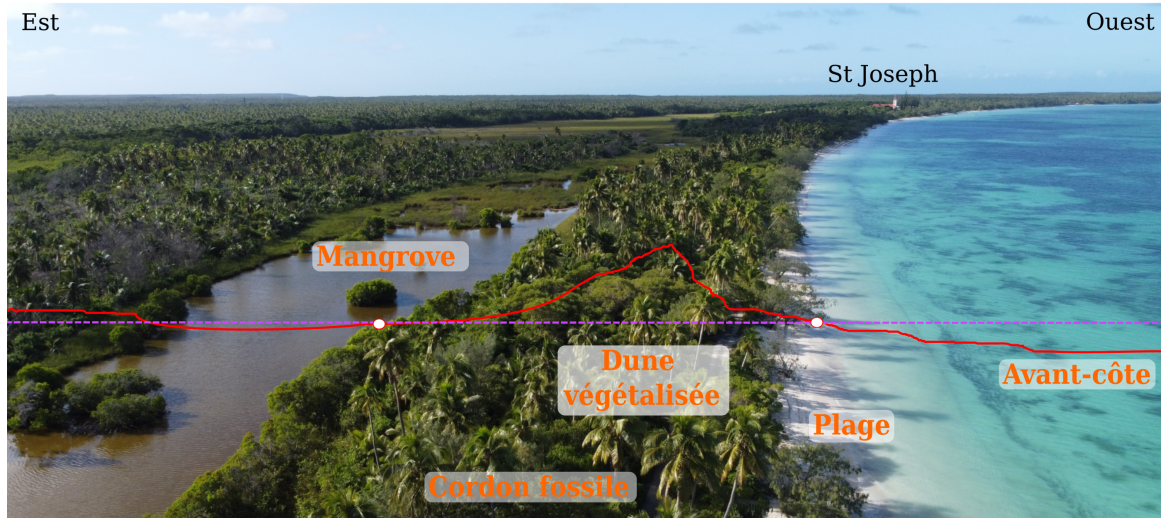


FIGURE 3 : Le profil type des plages sableuses lagunaires dans le nord de l'île d'Ouvéa, au niveau de l'anse de Saint Joseph avec une mangrove à l'arrière d'un cordon dunaire résiduel et un profil de plage sableuse dissipatif.

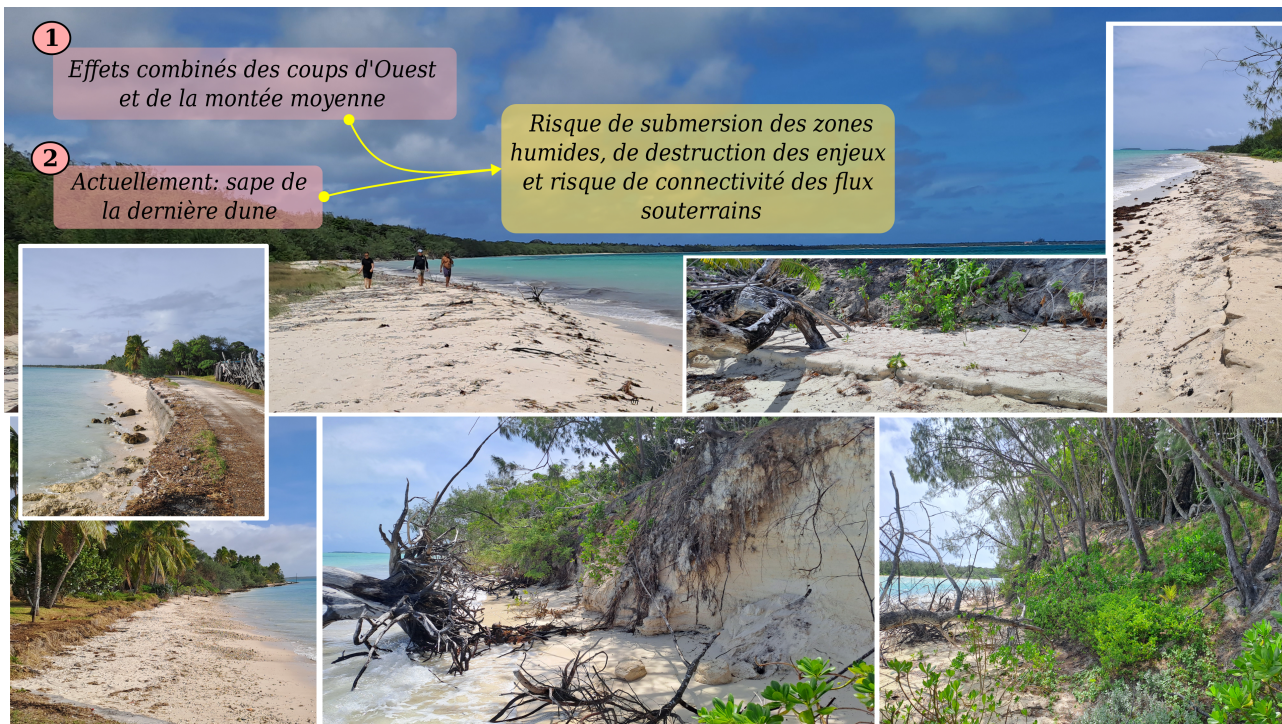


FIGURE 4 : Différentes morphologies marquant le recul du trait de côte dans l'anse de Saint Joseph. Le recul du trait de côte est le résultat de la combinaison des effets de montée intermittente du niveau d'eau pendant les épisodes tempétueux, et des flux d'énergie des vagues à la côte. La situation actuelle est considérée comme grave par les acteurs locaux dans la mesure où (i) le trait de côte atteint depuis quelques années les infrastructures (routes, habitations), (ii) il a attaqué la dernière dune en détruisant le dernier cordon végétal avant les zones urbanisées ou la mangrove, (iii) il se positionne sur le profil de plage là où le stock sableux est plus réduit, induisant l'apparition de fonds rocheux (le substrat rocheux étant plus haut qu'au large). On voit par ailleurs de nombreux marqueurs de coups de mer comme des laisses de mer très hautes, directement sur la végétation terrestre (cocotiers, arbres à feu), ou des talus de plage de hauteur pluri-décimétrique caractéristiques d'une grande mobilisation du stock sableux émergé vers le large. Le recul du trait de côte est le processus dominant contrôlant totalement l'avenir du système littoral lagunaire de l'île d'Ouvéa. La réduction ou destruction de la dune sableuse résiduelle implique l'augmentation de la submersion des zones terrestre à l'arrière et l'altération des échanges chimiques par advection/diffusion entre lagon et mangrove.

3.2 Contexte météo-marin

L'île d'Ouvéa est soumise à un régime de houle Antarctique venant du sud-ouest, au régime des Alizés (et donc à un champ de vagues d'est plus courtes) et aux houles cycloniques provenant du secteur nord à nord-ouest selon la trajectoire des dépressions. Ouvéa est beaucoup plus exposée à ces événements forts que la Polynésie car localisée dans la zone dépressionnaire paroxysmale (Figure 5). Une petite moitié des forçages météo-marins sont strictement orientés vers le sud-est.

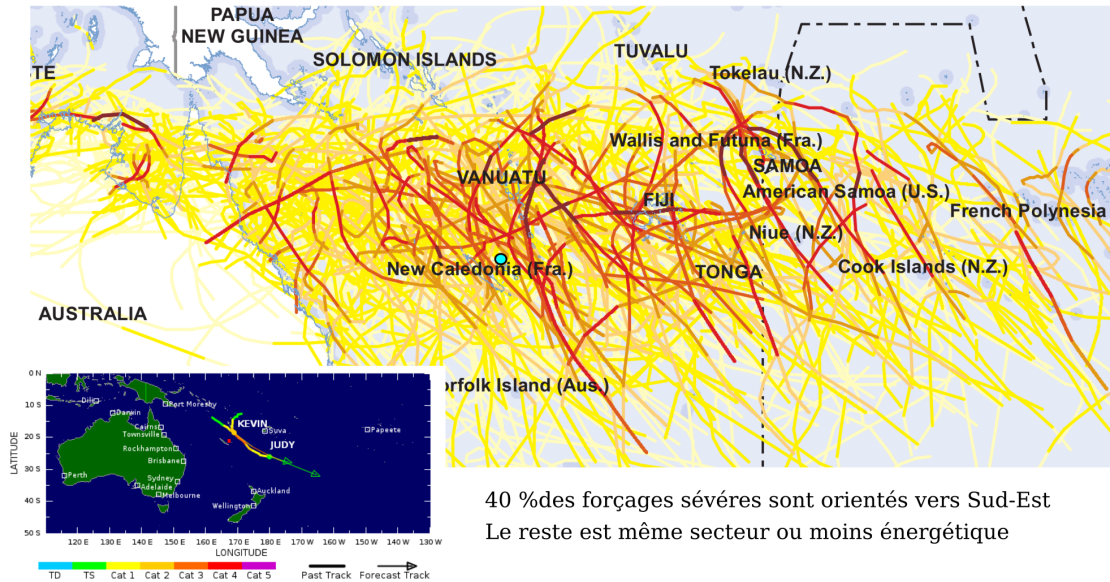


FIGURE 5 : L'île d'Ouvéa est soumise à un régime de houle Antarctique venant du sud-ouest, au régime des Alizés (et donc au champ de vagues de secteur est induit) et aux houles cycloniques provenant du secteur nord à nord-ouest selon la trajectoire des cyclones. Ouvéa est beaucoup plus exposée à ces événements forts que la Polynésie car localisée dans la zone dépressionnaire paroxysmale. Images extraites du site web NOAA.

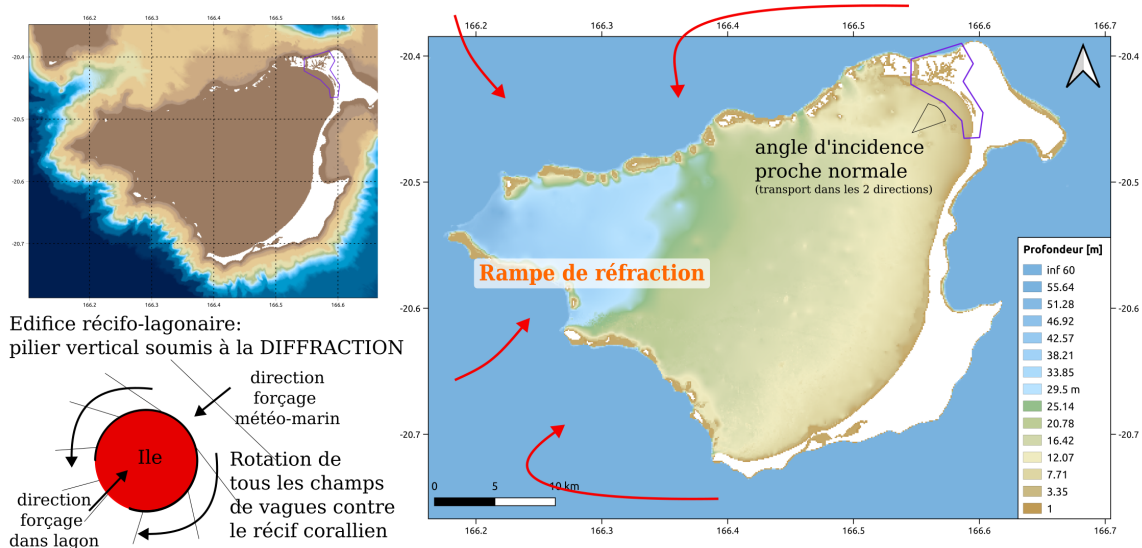


FIGURE 6 : Modèle numérique de terrain de l'île d'Ouvéa (à gauche) et du lagon d'Ouvéa (à droite) établi à partir de la donnée SHOM. La figure en bas à gauche montre comment l'ensemble des forçages (quelle que soit leur direction) peuvent contribuer au forçage météo-marin interne par réflexion/diffraction autour de l'édifice volcanique.

Les plages lagunaires du nord d'Ouvéa ne sont pas directement exposées aux houles océaniques, mais au champ de vagues qui a pu (i) pénétrer au sein du lagon au niveau des nombreuses passes au travers



du récif externe d'Ouvéa (Figure 1), (ii) au prix d'une transformation potentiellement importante du spectre de vagues. Il existe des données collectées devant la plage de Saint Joseph (IRD) permettant d'établir des statistiques sur le régime de vagues annuel ; celles-ci pourraient être éventuellement utilisées pour le dimensionnement final de la solution, qui ne se fera qu'après la restitution de ce rapport exploratoire.

Une autre caractéristique du forçage hydraulique au niveau des plages lagunaires est le résultat de la morphologie générale de l'île. Totalement fermée à l'est, elle est largement ouverte par des passes au nord, ouest et sud, qui permettent le transfert des vagues attaquant directement chacune de ces façades. Mais dans la mesure où Ouvéa est construite sur un édifice volcanique aux pentes raides (Figure 6), tous les régimes météo-marins décrits ci-dessus ont tendance à réfracter/diffracter sur le plateau récifal autour de l'île, et rentrer dans le système lagunaire par les ouvertures mentionnées. Il en résulte que toutes les directions de forçages peuvent avoir une influence sur l'énergie à la plage lagunaire de Saint Joseph, sachant bien sur que les mécanismes de réfraction/diffraction s'accompagnent de dissipation et donc que, pour une direction de forçage par les vagues donnée, le flux d'énergie des vagues à l'extérieur n'a rien à voir avec celui s'exprimant au niveau de la plage lagunaire. La quantification de l'ensemble de ces mécanismes relève d'une démarche de simulation régionale lourde, hors de propos ici.

Enfin, l'observation d'un ensemble de photos aériennes publiques historiques (via Google Earth par exemple) montre que tous les ouvrages suffisamment proéminents pour normalement bloquer la dérive sédimentaire littorale ne montrent pas d'accumulation ou d'érosion massivement asymétrique. Ceci est la preuve la plus criante que les transferts sableux longitudinaux, s'ils sont réels, se compensent en moyenne (différence entre transfert longitudinal net et total) de telle sorte qu'en bilan sur une échelle de temps suffisamment longue (l'année par exemple, pour lisser les effets saisonniers), la morphodynamique est clairement dominée par les échanges transversaux sur le profil de plage et non pas les gradients de flux longitudinaux. En d'autres termes, il est évident que les forçages orientés du nord vont favoriser une dérive sédimentaire vers le sud et réciproquement ceux du sud une dérive vers le nord. Mais rien ne montre qu'on a un régime de dérive dominante établi. Et les commentaires de la population sur place confirment cela.

3.3 Éléments de compréhension pour la problématique 1

On doit évacuer de fausses idées sur la notion de recul du trait de côte et bien comprendre ce qui est avéré sur le secteur de Saint Joseph pour prescrire des solutions pertinentes de gestion du recul progressif du trait de côte.

En tout premier lieu, le recul du trait de côte ne correspond pas forcément à une perte nette de stock sableux. En général sur un littoral sableux, on peut avoir une mobilité du trait de côte en gardant le même stock sableux ; inversement, on peut perdre du stock sableux en maintenant (un certain temps) le trait de côte fixe ; toutes les autres combinaisons sont possibles. L'observation des fonds dans l'anse de Saint Joseph suggère que la quantité de sable disponible dans l'avant-côte est substantielle. S'il y a un recul du trait de côte, c'est a priori soit à stock constant, ou du fait d'un déport de ce sable vers une zone plus au large. Mais c'est très peu probablement le fait d'un déport de sable sur un autre secteur de l'anse. Ceci est suggéré par l'observation générale faite précédemment comme quoi la dérive sédimentaire longitudinale nette à la côte semble faible, ce qui n'exclut pas – et n'est absolument pas contradictoire avec – des flux longitudinaux avec accumulation de matériel sédimentaire au niveau du versant interne de la passe de Faasi.

Par ailleurs, le sentiment de disparition du stock sableux ressenti à certains endroits (Figure 4) du fait de l'apparition sur la plage de blocs de matériau solide paleo-récifal est potentiellement biaisé : la forme du substrat rocheux sous le sable (héritée de la dissolution karstique et de l'abrasion météo-marines en plus bas niveau marin) peut être absolument quelconque et certains hauts topographiques

peuvent être portés à l'affleurement simplement du fait du déplacement du trait de côte sur ces zones, à volume de sable constant.

Il en résulte qu'au premier ordre, le recul du trait de côte est avant tout un processus contrôlé par la dynamique transversale du profil de plage, avec des déports importants de sable vers le large pendant les événements tempétueux, et le retour de sable pendant les périodes de beau temps. Cette dynamique de recul/avancée du trait de côte est observée par la population d'une manière très claire. L'existence d'une telle dynamique est aussi prouvée par la présence de dunes hydrauliques sous-marines (dans ce cas on parle de barres d'avant-côte) dont les crêtes s'étendent de manière parallèle au trait de côte, et qui sont des éléments classiques de la mobilité sédimentaire sur le profil de plage ; les dunes sous-marines se déplacent ("montent" et "descendent") sur le profil au gré des saisons et régimes de vagues, et assurent l'engraissement ou l'érosion du haut de plage donc le contrôle de la position du trait de côte.

Enfin, il est impossible de déterminer le disponible sédimentaire (un volume de sable calculé à partir de l'épaisseur de sable mobilisable, considéré en tout point de la plage immergée/émergée) en l'absence de données d'imagerie géophysique. Toutefois, la présence de roches sur le fond ou même de petites îles composées de blocs récifaux un peu partout au sein du lagon montre que le substrat rocheux sur lequel repose le disponible sédimentaire est de forme très variable et est non prédictible (une situation très classique en contexte récifo-lagonaire). Il faut donc s'attendre à l'existence d'un stock sableux spatialement très variable dans l'anse de Saint Joseph.

Ceci étant précisé, on peut décrire les mécanismes de contrôle de la dynamique du trait de côte *a priori* dominants sur l'anse de Saint Joseph. La figure 7 montre les différentes conditions de niveau d'eau qui contrôlent les flux sédimentaires sur le profil de plage émergée.

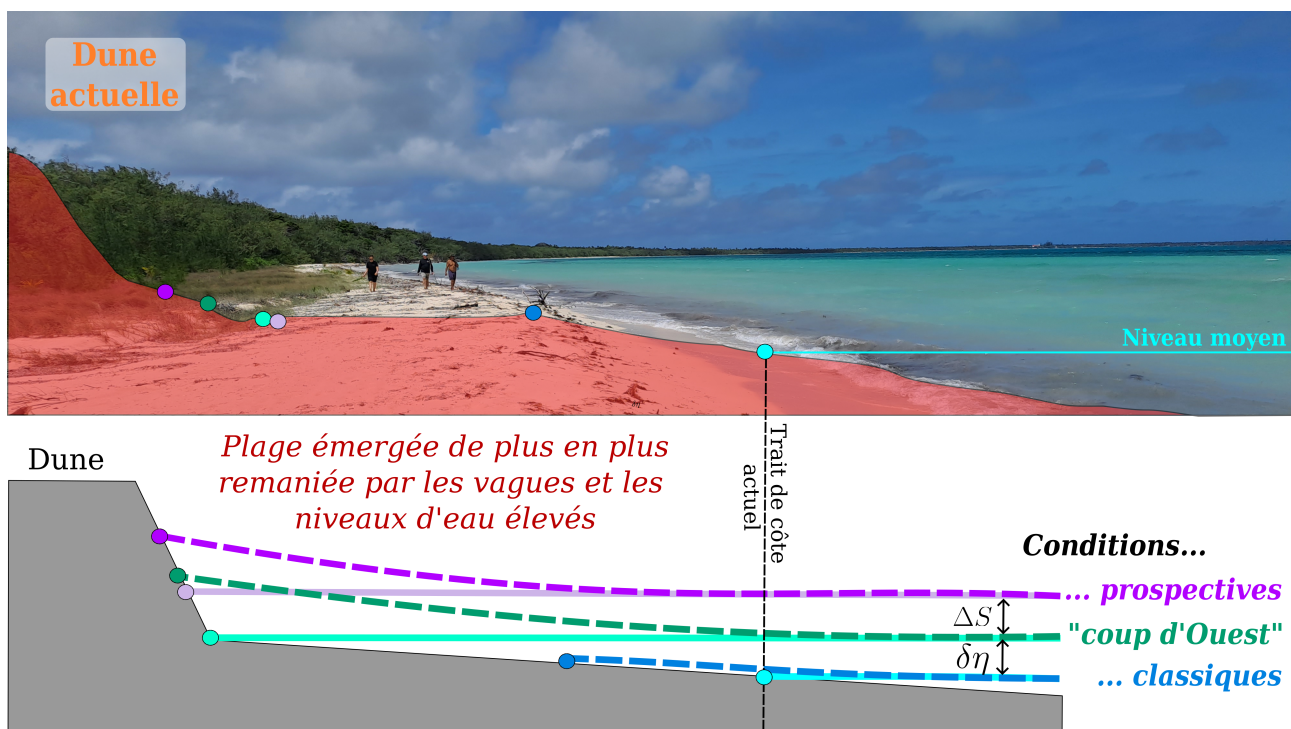


FIGURE 7 : Les conditions météo-marines classiques (mer de vent dans le lagon), tempétueuses (coup d'Ouest, c'est à dire par un champ de vagues externes quelconque ayant pu pénétrer le lagon et se propager jusqu'à l'anse de Saint Joseph) et prospectives (un coup d'Ouest lors duquel on tient compte d'une sur-élévation du niveau d'eau moyen induit par le changement global) définissent la zone de plage potentiellement concernée par la dynamique du profil de plage. La quantité $\delta\eta$ représente la surcôte de tempête, c'est à dire la résultant de tous les effets intermittents de la présence de vagues, de vent et d'une dépression atmosphérique au droit de la plage lagonaire. La quantité ΔS représente l'augmentation relative du niveau marin relatif, une tendance lourde irréversible à l'échelle de la durée de vie des systèmes littoraux concernés.

Sur cette figure 4, on choisit de définir que sous des conditions de mer sans vague, le niveau d'eau moyen détermine une position (arbitraire) du trait de côte. Les conditions classiques de mer de vent induisent alors un niveau d'eau qui va remobiliser le bas de la plage émergée, jusqu'au sommet de la berme créée par cette dynamique, et parfaitement visible sur la figure 7 au niveau du point bleu marine. Dans le cas d'un coup d'Ouest, le niveau d'eau augmente (par surcôte de tempête $\delta\eta$ indiquée sur la figure 7) et les observations de terrain montrent que le trait de côte peut être déplacé au pied du cordon dunaire résiduel actuel (point vert clair sur la figure 7). Par ailleurs, les vagues induisent un jet de rive qui est capable de monter au dessus du pied de dune et participer à la sape de celui-ci (point vert foncé sur la figure 7). Si on se projette dans l'avenir, et qu'on prend en compte une augmentation du niveau marin relatif par un effet quelconque du changement global, on décale vers le haut ce mécanisme (surélévation moyenne ΔS sur la figure 7) et la dune est encore plus exposée (points rose et violet sur la figure 7). Il est important de remarquer que la plage émergée dite dynamique (entre les points bleu clair et vert clair sur la figure 7) peut s'adapter en fonction de la montée du niveau marin relatif, en se reconstruisant progressivement plus haut tout en reculant. Mais il n'en est rien du cordon dunaire. Celui-ci est beaucoup plus lent à se construire (par une physique liée au vent, pas aux vagues) ; et dans le cas présent, il est totalement immobilisé par une végétalisation massive typique des milieux insulaires tropicaux. Ne pouvant évoluer, il est donc détruit sans capacité de reconstruction dans un délai compatible avec le recul du trait de côte. Pourtant, il constitue la principale barrière naturelle entre le domaine lagunaire et les terres arables ou utiles. La situation actuelle est donc extrêmement problématique car le dernier édifice de protection naturelle est en train de disparaître sur une bonne partie de l'anse de Saint Joseph (Figure 4). *C'est ce constat qui constitue sans aucun doute l'information la plus importante concernant les risques littoraux sur Ouvéa.*

Par ailleurs, à partir de photos consultées auprès de particuliers, de discussions avec les gens vivant à proximité des plages lagunaires, et de l'analyse à grande échelle des traces fossiles de l'orientation de racines d'anciens cordons dunaires, on propose sur la figure 8 un historique qualitatif de la plage lagunaire type dans l'anse de Saint Joseph.

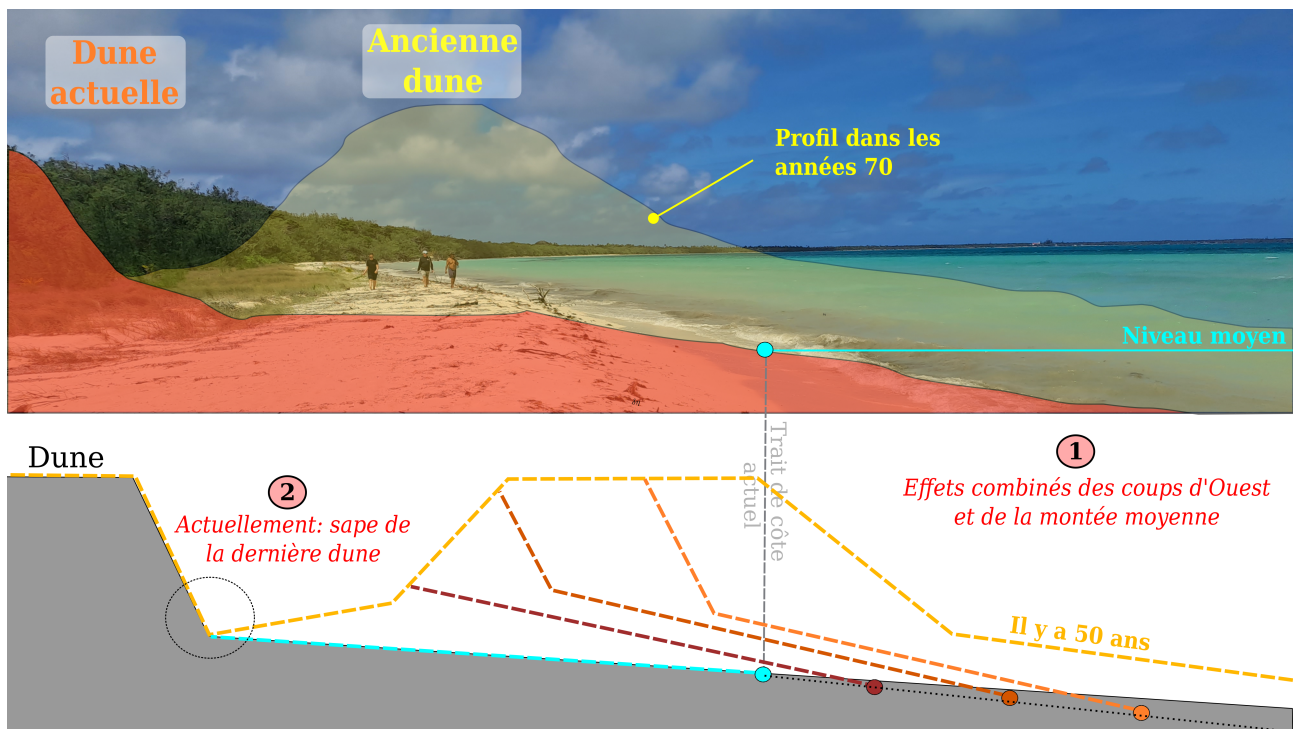


FIGURE 8 : Historique qualitatif de la plage lagunaire de Saint Joseph, en particulier sur les zones où on observe encore une dune aérienne résiduelle, à partir de la collecte d'informations discrètes sur place. Les différentes lignes en pointillées décrivent le profil terre/mer de la plage lagunaire à différentes époques. Détails dans le corps du document.

Il y a 50 ans, la plage était large de plusieurs dizaines à centaines de mètres selon les endroits. Le recul est observé à l'échelle pluri-décennale absolument partout. Donc le premier constat simple est que la situation de crise actuelle résulte d'une prise de conscience récente, concomitante de la montée de la prise de conscience sur les effets du changement climatique, et ceux des déplacements du trait de côte. Il y a 15 ou 20 ans, la largeur de la plage et son recul n'intéressait quasiment personne sur cette zone d'étude. Il y avait deux ou trois lignes de dunes successives (La figure 8 en représente une seule ; il n'y a pas consensus sur ce sujet) avant la plage émergée au contact direct de la ligne d'eau. La partie plate de la plage émergée était suffisamment large pour une circulation pédestre le long de la côte toute l'année (qui n'est absolument plus possible actuellement).

Le recul du trait de côte depuis cette période a été accompagné nécessairement d'un redressement de la pente de la dune du fait de son abrasion progressive (comme représenté par les lignes pointillées successives sur la figure 8). Les deux premières lignes de dunes ont disparu partout et une hypothèse est que la quantité de sable fin présent dans l'avant-côte actuellement soit pro-parte le résultat de ce remaniement. Il y a 10 à 15 ans, les conditions météo-marines tempétueuses les plus fortes ont commencé à attaquer le pied de la dernière ligne dunaire, et son abrasion s'est généralisé jusqu'à l'actuel. Cette ligne a déjà disparu à certains endroits, et est largement menacée ailleurs comme en témoigne la destruction de la végétation du cordon à chaque événement (Figure 4).

La stratégie d'accompagnement de la résilience hydro-sédimentaire d'un tel système doit donc être basée avant toute chose sur le contrôle du recul du trait de côte et la minimisation de l'agression du cordon dunaire par les événements tempétueux. Ceci fera l'objet du reste du rapport après la présentation des problématiques 2 et 3.

3.4 Éléments de compréhension pour la problématique 2

La problématique 2 est organisée autour de la morphodynamique de la passe entre le lagon et la mangrove (dite "passe de la nurserie") et l'impact de cette morphodynamique sur le niveau d'eau dans la mangrove. La figure 9 montre le contexte morphologique de cette passe de la nurserie.

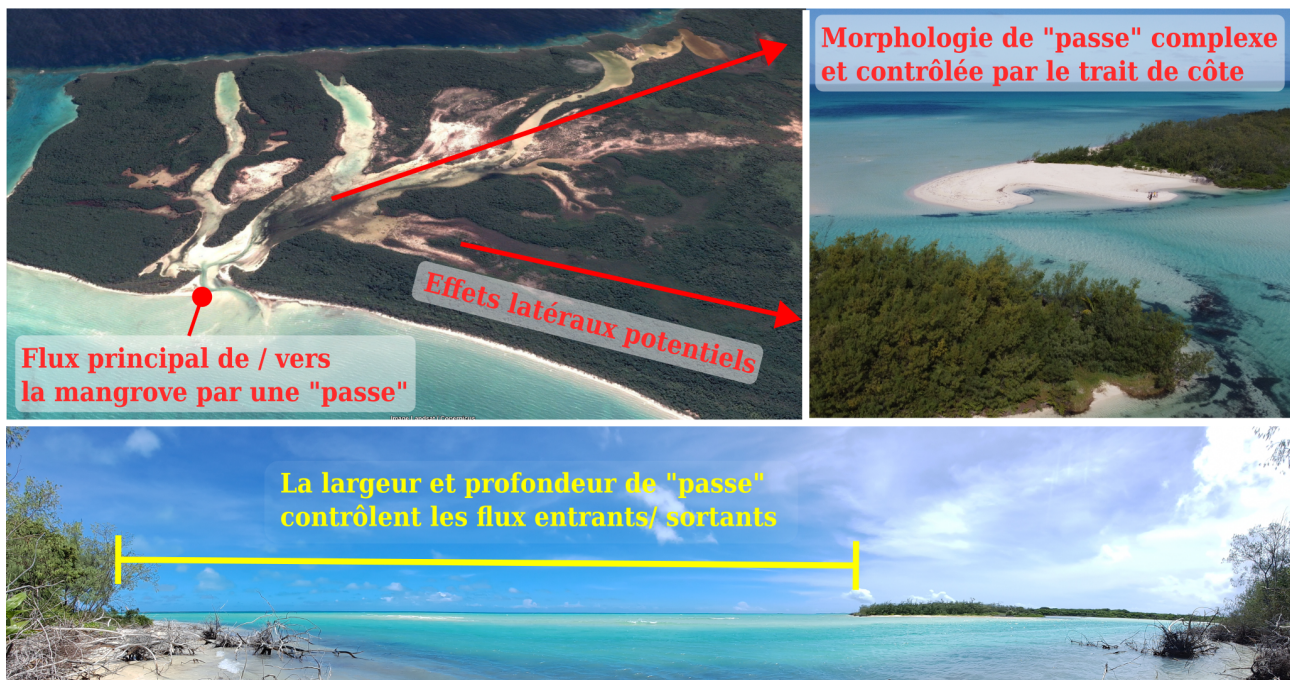


FIGURE 9 : Contexte morphologique au niveau de la mangrove et la passe de la nurserie, connexion principale entre le lagon et la mangrove. On voit qu'il existe aussi des connexions potentielles entre l'océan ouvert et la mangrove dans la partie nord-ouest de la mangrove.

La mangrove s'étend largement entre le lagon et l'océan ouvert sans connexion directe flagrante, même s'il est évident que des échanges diffus existent (voir problématique 3). La mangrove est composée de chenaux humides digitisés parcourant une zone humide plus large dans laquelle on trouve des palmiers/cocotiers et des zones arables. Cette organisation fait que tout flux entrant par la passe de la nurserie peut rapidement propager des flux assez loin dans la partie terrestre, avec des effets hydrauliques latéraux potentiels importants et rapides. En période de flux entrant comme sortant (vidange après un événement tempétueux), il faut s'attendre à ce que la végétation très dense ralentisse les courants dans les zones humides non chenalées. On peut imaginer une dynamique des échanges hydrauliques à deux vitesses dans un tel système (comme dans le cas de la propagation des crues en milieu urbain, où les immeubles et la voirie impactent de manière très différente la propagation des ondes longues de crues). Dans la suite, on fait des estimations ne tenant pas compte de ces aspects là.

Les observations montrent que les échanges hydrauliques se produisent pour une bonne part au travers de la passe de la nurserie. Toutefois, celle-ci est extrêmement mobile, quelquefois très ouverte ou franchement fermée, avec des instabilités morphologiques complexes et mobiles à haute fréquence dans la passe elle-même (Figure 9). Il semble évident que la largeur et la profondeur moyennes de cette passe contrôlent les flux entrants et sortants, et donc le temps de résidence de l'eau dans la mangrove ainsi que les niveaux d'eau maximaux atteints.

Pendant le séjour, on a cherché à estimer l'importance de ces mécanismes et voir s'il est important de les intégrer dans l'analyse des risques. La figure 10 montre une série de photos de la passe qui permet d'estimer la variabilité de l'ouverture de la passe selon le profil [AB] indiqué. A partir de ces photos, on peut déjà constater des tendances, comme l'érosion d'une banquette de la rive Nord-Est de la passe ; mais ces observations relèvent d'une étude fine du système et sont hors de propos pour l'instant.

Forte variabilité des profondeurs dans l'exutoire de Mangrove

(du fait de la dynamique des barres d'embouchure)

Fait d'histoire: destruction d'une île centrale

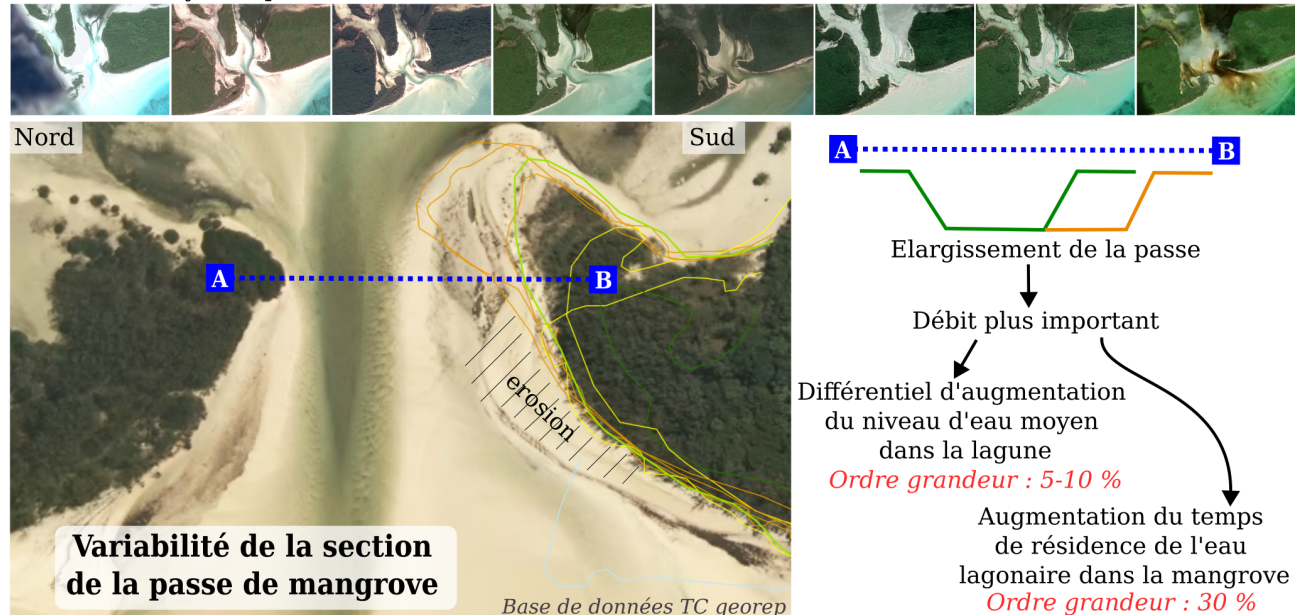


FIGURE 10 : Analyse des photos existantes au niveau de la passe et estimation des effets de sa dynamique sur les flux et donc le niveau d'eau et le temps de résidence de l'eau dans la mangrove. Explication des calculs dans le corps de texte.

A partir de l'estimation moyenne de la largeur de la passe et de la variabilité de cette grandeur, et en mesurant par ailleurs la profondeur moyenne et sa variabilité (par une estimation des gradients de couleur sur les images), on peut calculer une section d'écoulement au travers de la passe et la variabilité observée (dans le passé) de cette section. Si par ailleurs, on calcule la surface approximative de la mangrove et qu'on propage à travers cette section une surcôte de l'ordre du mètre pendant 48h



(temps typique d'un événement météo-marin), on peut immédiatement faire le calcul de l'élévation du niveau d'eau moyen dans le système. Par ailleurs, un temps de résidence peut être calculé de la manière la plus simple qui soit (parmi d'autres) : on considère le moment séparant l'entrée de la première eau dans la passe poussée par le forçage jusqu'au retour à la situation antérieure à l'événement (fin de la vidange). La quantité d'eau circulant dans la passe à un instant est calculée à partir d'un écoulement laminaire libre non turbulent et sans frottement sur les bords.

Les valeurs de niveau obtenues ne sont pas présentées, car pas spécialement réalistes ; et il en est de même pour les temps de résidence. Par contre, si on fait exactement les mêmes calculs simples en modifiant les propriétés morphologiques de la passe – induisant une modification du flux instantané – et qu'on fait aussi varier raisonnablement (c.a.d de manière réaliste) les forçages, on fait le constat que le niveau d'eau moyen dans la lagune peut varier dans des proportions de l'ordre de 5 à 10 % et les temps de résidence de l'ordre de 30 %. L'ordre de grandeur de la variabilité du niveau d'eau et du temps de résidence lorsqu'on change les caractéristiques de la passe est substantiel. Ceci suggère évidemment que les évolutions morphologiques de la passe qui pourraient résulter a) de la variation du niveau marin relatif à moyen terme, et b) de l'atterrissage du trait de côte lagunaire au niveau du cordon dunaire formant les épontes de la passe, pourraient avoir une influence significative sur les flux entrants et donc la dynamique de l'hydraulique lagunaire. La mangrove étant un lieu stratégique pour la vie sur Ouvéa (ressources, écosystème pivot), il semble important de se préoccuper de la compréhension fine et du contrôle de la morphodynamique de la passe pour anticiper sur d'éventuelles dégradations de l'écosystème de la mangrove.

Au vu des observations faites pendant le séjour, les travaux qui pourraient être menés sur la problématique 2 sont les suivants :

- suivi hydraulique des niveaux d'eau dans la mangrove et de la circulation, pour constituer une base de données de mesures objectives permettant de caler des modèles numériques et identifier les processus clés ;
- un suivi morphologique fin de la passe elle-même, surtout pour comprendre la dynamique des instabilités (et donc la manière de calculer la section garantissant un calcul de flux entrant/sortant réaliste). Ce suivi peut aussi comprendre une mesure approximative moyenne de la largeur de la passe et sa profondeur à partir d'observations menées par les habitants sur la base de pieux gradués ;
- une modélisation hydraulique de la circulation et du niveau, en prenant en compte les forçages météo-marins au niveau de la passe de la nurserie, actuels et sous scénarios de changement global ;
- pour un travail plus fin : a) le suivi lagrangien de particules d'eau pour comprendre les mécanismes éventuels de piégeage, et b) la prise en compte du ralentissement des courants par friction dans la mangrove dense (faibles profondeurs d'eau, là où sont justement les enjeux critiques) ;
- la recherche d'une forme de passe répondant à une optimisation des effets bénéfiques de la passe sur la mangrove (ces effets restants à définir en concertation avec les habitants) ;
- l'étude d'un certain nombre de solutions de contrôle de la morphodynamique de la passe pour l'inviter à se maintenir dans la configuration optimale discutée. Les solutions peuvent elles-mêmes faire l'objet d'un travail d'optimisation. Elles pourraient être basées sur des ressources locales et participer au développement d'une filière ressource et ingénierie littorale douce locale.

Les stratégies de mesure, de modélisation et d'optimisation suggérées ci-dessus sont basées sur les mêmes dispositifs de mesure et les mêmes outils numériques que ceux mobilisés pour traiter la problématique 1 (plus loin dans ce même rapport).

3.5 Éléments de compréhension pour la problématique 3

La problématique 3 est relative aux échanges chimiques entre le lagon et la mangrove, en particulier la question des intrusions salines. La figure 11 montre d'une part le profil type vu du ciel entre l'avant-plage lagonaire et un chenal dans la mangrove et d'autre part détaille le principe de la pénétration souterraine des eaux lagonaires vers la mangrove, sous contrôle des forçages météo-marins (énergie des vagues, niveau lagonaire) et du recul du trait de côte. La figure 3 plus haut dans le rapport montre aussi la distribution spatiale de la végétation, caractéristique du niveau de salinisation des sols.

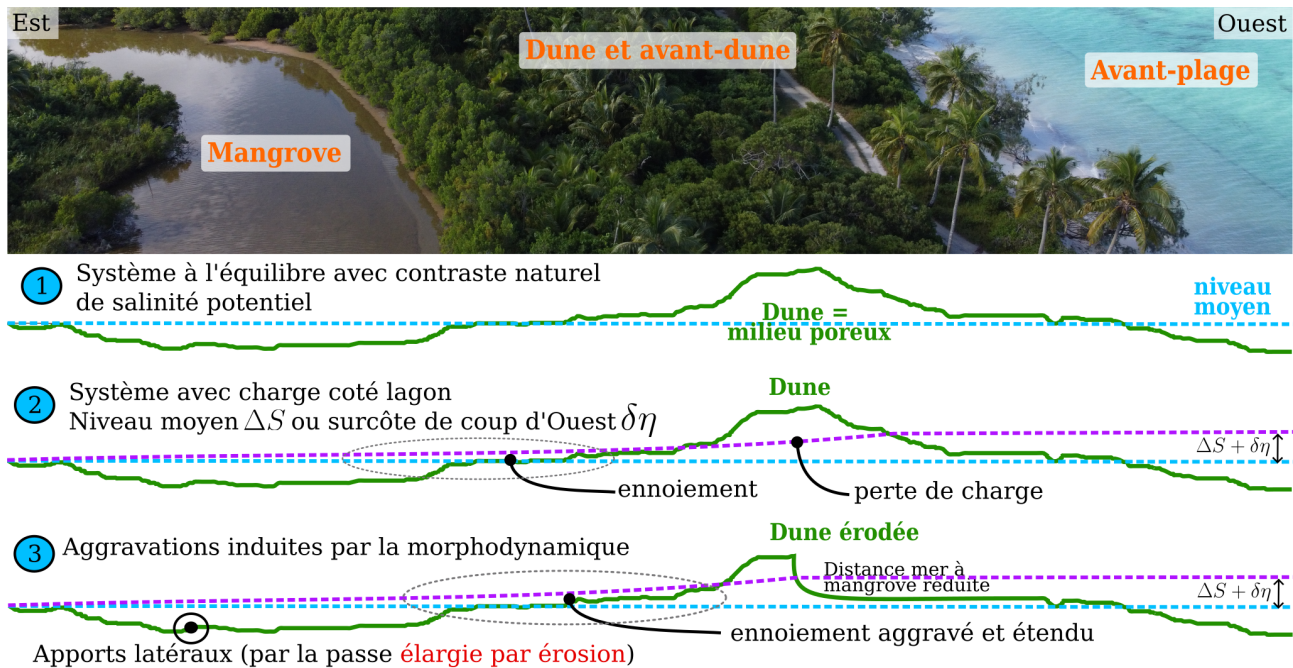


FIGURE 11 : Principe des mécanismes d'intrusion saline et couplage entre le recul du trait de côte, l'augmentation du niveau d'eau dans la mangrove et l'accélération des échanges chimiques entre le lagon et la mangrove. Les échanges potentiels avec l'océan ouvert ne sont pas représentés sur ce schéma, mais doivent être considérés de la même manière. Crédit de la photo : Green Cross. Commentaires des diagrammes dans le corps de texte.

Sur la figure 11, le diagramme 1 montre un système à l'équilibre, c'est à dire privé de toute contrainte sur ses deux extrémités latérales, et avec un niveau moyen (on parle de niveau piézométrique lorsqu'on représente le "niveau d'eau" dans un massif poreux) horizontal selon une équipotentielle de la pesanteur. Le cordon dunaire et son substrat rocheux sont des milieux poreux dans lesquels les fluides peuvent circuler lentement. Dans une telle situation, les échanges chimiques sont possibles mais ils se font à la vitesse de la diffusion moléculaire, c'est à dire la tendance de la nature à ré-équilibrer tout concentration chimique sur une moyenne en déplaçant doucement les molécules au sein du fluide au repos. Ces mécanismes sont très lents devant le transport advectif, c'est à dire le déplacement de masse d'eau.

Lorsqu'on a un événement tempétueux dans le lagon, le niveau a tendance à augmenter. C'est ce qui est représenté dans le diagramme 2 de la figure 11. On a représenté une surcôte totale de $\delta\eta$. En l'absence de connexion directe entre le lagon et la mangrove (on verra plus loin le rôle potentiel de la passe de la nurserie), on crée forcément une pente du niveau d'eau entre le lagon et la mangrove. Cette différence de niveau crée un gradient latéral de pression qui va mettre en mouvement l'eau dans le massif poreux dans le sens lagon vers mangrove. Évidemment, ce mouvement va induire un transport salin. Une fois l'eau lagonaire passée dans la mangrove, on enregistre une augmentation durable de la salinité. Il y a un caractère partiellement irréversible à ce processus, car après l'épisode tempétueux, le flux inverse n'est pas possible vu que le niveau d'eau revient à l'équilibre du diagramme 1 (mais ne crée pas de



penne de la mangrove vers le lagon). D'une manière moins intuitive, il faut aussi comprendre que les vagues qui arrivent à la côte pendant un épisode tempétueux appliquent sur le massif rocheux une contrainte horizontale (qu'on appelle tension de radiation) qui renforce le flux lagon vers mangrove puisqu'elle est équivalente à une surpression appliquée au bord du domaine. Le niveau et les vagues augmentent donc le flux salin dans la mangrove à travers le massif rocheux formé par le cordon dunaire et son substrat.

L'autre conséquence de la mise en place de la pente du niveau est qu'on peut très bien avoir un ennoisement de l'arrière du cordon dunaire par le flux souterrain se mettant en place u travers de celui-ci. Dans ce cas, on expose au sel des zones précédemment émergées. Dans le contexte d'un scénario de hausse du niveau marin relatif (indiqué par un ΔS dans le diagramme 2 de la figure 11), cet ennoisement peut être encore plus marqué même si le gradient hydraulique apparent entre le lagon et la mangrove est moins fort ; en effet, la mangrove aura ré-équilibré son niveau moyen sur celui du lagon et pour une surcôte donnée, la distance entre le trait de côte et le premier point humide coté mangrove sera plus courte.

Enfin, sur le diagramme 3 de la figure 11, on illustre le fait que lorsqu'on a un recul notoire du trait de côte, la distance entre le trait de côte (c.a.d le début du domaine où se fait l'écoulement en milieu poreux, quelles que soient les conditions de forçage) et le premier point humide de la mangrove, diminue. Pour un forçage météo-marin donné (en niveau comme en tension de radiation), le gradient hydraulique contrôlé par la pente augmente. Et donc la pénétration de l'eau salée est accélérée. En d'autres termes, le recul du trait de côte est un facteur clairement aggravant de l'intrusion saline. Il en est évidemment de même des apports hydrauliques directs par la passe de la nurserie, qui apportent de l'eau salée directement sur des zones précédemment émergées (voir problématique 2). Même si cet apport réduit le gradient hydraulique, l'ennoisement direct est de loin le mécanisme de salinisation le plus efficace, sauf si les eaux advectées par la passe se mélangent à celles de la mangrove et son trop diluées pour avoir un impact important sur les zones reculées. Ceci ne peut être abordé que lorsque la problématique 2 sera clairement comprise et étudiée.

Au vu de ces informations, les travaux à mener sur la problématique 3 seraient les suivants :

- suivi piézométrique sur un transect de forages courts (quelques mètres de profondeurs) depuis la mangrove jusqu'au trait de côte et instrumentation devant ce transect pour caractériser le forçage météo-marin impactant l'aquifère. Même démarche coté océan ouvert. Cette base de données permettra de paramétriser les modèles ci-dessous (dans la mesure où il est difficile de mesurer directement les propriétés hydrauliques du massif poreux). On peut aussi envisager un suivi des processus d'advection/diffusion du sel entre le lagon et la mangrove. Possibilité de mettre en place également des suivis moins lourds, assurés par les habitants de la zone ;
- mise en place d'un modèle de calcul des flux souterrains et des niveaux piézométriques (basé sur Darcy ou Richards) forcé par les conditions météo-marines, permettant d'estimer les gradients hydrauliques et l'effet des tempêtes sur le niveau et les transferts hydrauliques entre lagon et mangrove ;
- couplage du modèle hydraulique de la problématique 2 avec ce modèle de circulation souterrain pour apprécier les effets réalistes des coups de mer sur la mangrove ;
- si l'intérêt est là, il serait sans doute pertinent de regrouper pour la partie nord de l'île les problématiques 2 et 3, et définir une problématique indépendante consacrée au niveau d'eau strict si les travaux doivent être étendus au sud où la mangrove ne s'exprime pas comme au nord ;
- l'étude d'un certain nombre de solutions de contrôle de ces intrusions salines, éventuellement couplées à celles qui sont pensées pour les problématiques 1 et 2.

Comme pour la problématique 2, les opérations sus-mentionnées s'appuient globalement sur le même champ de compétences que celui réclamé par la problématique 1, avec ici une sensibilité accrue dans la modélisation des écoulements souterrains (Richards, Darcy, couplage vagues/écoulement souterrain), et des compétences dans la mesure piézométrique.

4 Vers un prototype de contrôle du recul du trait de côte

Dans cette section, on définit quels sont les principes retenus pour poser une solution robuste à la problématique 1. L'ambition est d'arriver au concept de **prototype**, c.a.d une solution opérationnelle réellement optimisée pour la problématique, et dont on peut tester à court terme la pertinence et l'efficacité en condition réelle, avant de l'adapter en fonction du retour d'expérience pour un déploiement à grande échelle. La figure 12 résume la situation à ce stade.

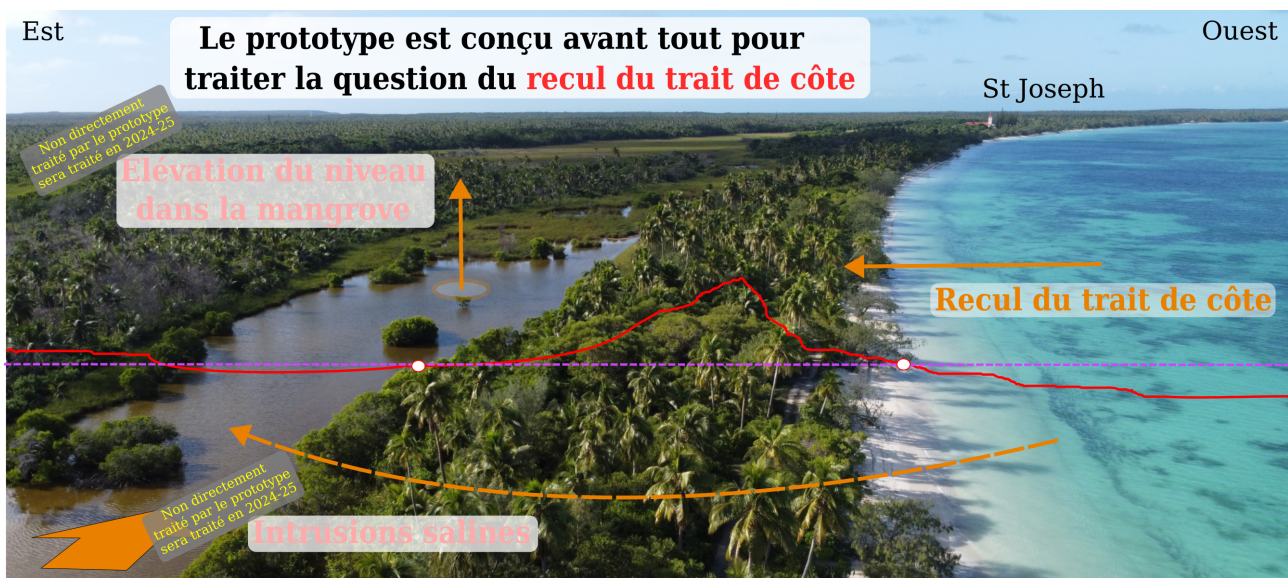


FIGURE 12 : Rappel des trois principales problématiques abordées précédemment. Seule la problématique 1 fait l'objet d'une recherche de solution de protection douce dans le cadre de ce document. Les deux autres problématiques seront traitées ultérieurement dans le cadre d'autres séjours/ missions.

On rappelle que les questions d'intrusion saline (problématique 3) et d'augmentation du niveau d'eau dans la mangrove (problématique 2) ne sont pas directement prises en compte dans le prototype. Il est entièrement imaginé pour la problématique 1, c.a.d. le recul du trait de côte. Toutefois, on a vu que le recul du trait de côte est un facteur aggravant de la dynamique du niveau d'eau dans la mangrove et des phénomènes d'intrusion saline. On postule donc que le prototype discuté dans ce document aura un effet positif dans le traitement des problématiques 2 et 3, même non optimisé pour cela. Il reviendra à d'autres travaux de penser des solutions spécifiques pour les problématiques 2 et 3.

4.1 Principe fondateur du contrôle du recul du trait de côte

On a vu que le recul du trait de côte est du au premier ordre à des transferts sédimentaires sur le profil de plage plutôt qu'à des gradients de flux sédimentaires longitudinaux. En effet, l'ensemble des forçages météo-marins se présentent à la côte avec des angles variables, mais sans induire une dérive longitudinale nette asymétrique. Par ailleurs, on a pu faire le constat sur place que le stock sédimentaire sableux au large (à quelques dizaines de mètres de la plage émergée) était assez substantiel, et qu'on pouvait en plus observer des barres hydrauliques mobiles. Enfin, on fait facilement le constat que l'avant-côte ressemble à un système dissipatif sableux avec une pente moyenne faible, dans un contexte quasi microtidal (La marée a une amplitude max pluri-décimétrique dans l'anse de Saint Joseph).

Dans un tel contexte, le système sédimentaire de l'anse de Saint Joseph doit nécessairement répondre à des mécanismes hydro-morphodynamiques déjà bien compris. La figure 13 présente ces mécanismes dans la perspective du choix d'un principe fondateur pour la conception d'une solution de protection.

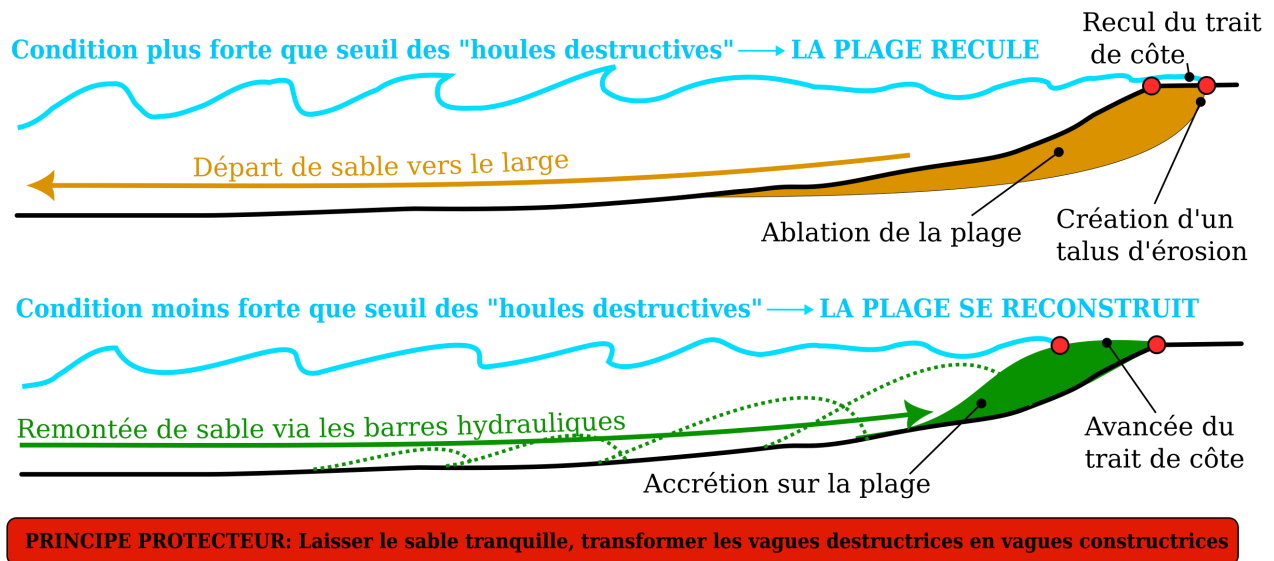


FIGURE 13 : Principe fondateur derrière la stratégie de conception de la solution de protection : les houles destructives et constructives, c'est à dire à même de déporter du sable vers le large ou le faire remonter naturellement le long du profil.

Lorsqu'un régime de vagues à l'entrée du domaine littoral dépasse un certain seuil d'énergie (qu'on peut représenter par le carré d'une hauteur de vagues représentative des conditions observées), l'énergie potentielle dissipée sur le profil de plage lors de la propagation des vagues se transforme pour partie en courant orienté vers la plage, qui va logiquement accumuler de l'eau à la côte, augmenter le poids de la colonne d'eau à la côte et donc favoriser (par recherche de l'équilibre hydrostatique) la mise en place d'un courant de retour se positionnant nécessairement sur le fond là où les efforts horizontaux exercés par les vagues dans leur sens de propagation sont les moins forts. Ce courant sortant a une capacité d'arrachement évidente et va embarquer le matériel sédimentaire (il est même capable de détruire les dunes hydrauliques en place) pour le distribuer sur le profil de plage, plus au large. Sous ces conditions plutôt tempétueuses, on parle de régime de vagues destructives, parce qu'il ré-initialise le profil de plage vers quelque chose d'assez tendu/lisse. En marge de cela, l'énergie amenée à la côte a la capacité de créer un talus d'érosion (comme sur les images de la figure 4), et induit évidemment un recul du trait de côte sur le court terme.

Lorsqu'un régime de vagues à l'entrée du même domaine littoral reste en deçà d'un certain seuil d'énergie, le mécanisme décrit ci-dessus ne va plus être celui qui domine. C'est le point de déferlement qui va définir le lieu de convergence de plusieurs flux hydrauliques, et donc l'accumulation progressive de sable sous la forme d'une barre hydraulique. Avec la croissance de cette dune, le point de déferlement se déplace, et on peut observer des déplacements de cette barre (assez complexes sur le plan théorique) le long du profil de plage. D'un point de vue strictement observationnel, il est clair que des conditions de beau temps font "remonter" la dune hydraulique le long du profil de plage, avec à terme accrétion de cette barre à la côte et donc déplacement du trait de côte vers le large (Figure 13). En d'autres termes, les vagues par conditions de beau temps – dès lors que du sable est présent sur le profil – ont un rôle de reconstruction du trait de côte. On parle dans ce cas là d'un régime de vagues constructives.

On comprend donc que ces 2 mécanismes, largement observés, constituent un principe fondateur potentiellement très robuste pour le contrôle de la dynamique du trait de côte. En effet, il suffit tout simplement d'envisager une solution qui maximiserait la présence des houles constructives sur la zone

à protéger et minimiserait les houles destructives. Un tel dispositif ne doit pas être une barrière à houle dont l'efficacité serait totale ; un tel dispositif serait en mesure de réduire totalement l'énergie des vagues et empêcherait le rôle constructif des houles de beau temps, qui permet la résilience hydro-sédimentaire des systèmes endommagés.

4.2 Robustesse de la démarche et sens profond du principe protecteur

La robustesse de la démarche tient en 2 points.

Tout d'abord, ce principe a été utilisé sur d'autres sites comme le lido de Sète en Méditerranée Nord Occidentale (France), ou sur la plage de Hatzuk au nord de Tel-Aviv (Israël) avec un franc succès (plusieurs dizaines de mètres d'accrétion de la plage à Sète quelques années après la mise en place d'une solution conçue et optimisée pour suivre ce principe). Or ces plages sont très similaires à celle d'Ouvéa (microtidales, dissipatives, sableuses, à dérive longitudinale faiblement asymétrique). Il existe donc des expériences antérieures rassurantes quant à la robustesse de la démarche.

D'autre part, la démarche a l'avantage de s'appuyer sur une physique en lien avec l'hydraulique littorale, complexe mais bien décrite par plusieurs formalismes mathématiques. La démarche ne s'appuie en aucun cas sur le pari d'une bonne description physique de la morphodynamique, qui reste un sujet délicat et encore difficilement formalisé mathématiquement, même en recherche fondamentale. Ainsi, pour l'ingénierie, il est beaucoup plus logique et robuste de penser – si c'est possible – une solution sur des considérations hydrauliques plutôt que morphodynamiques, afin de rassurer sur l'utilisation des modèles numériques mobilisés lors du dimensionnement du prototype.

Le sens profond du principe protecteur mis en oeuvre est finalement le suivant : laisser le sable tranquille, surtout ne pas chercher à le bloquer ou le diriger, et simplement inciter – sans exagération – le système à fonctionner sous un régime de vagues de beau temps plutôt que de tempête (Figure 13). On est donc vraiment sur une démarche d'accompagnement du système naturel, pas d'affrontement. La réflexion scientifique derrière cette démarche est à l'opposée du génie côtier traditionnel.

4.3 Caractéristiques générales du prototype

Fondamentalement, le prototype envisagé pour mettre en oeuvre le principe protecteur retenu doit s'apparenter à une dune hydraulique artificielle qui est positionnée à un endroit choisi de telle sorte que les vagues sont *globalement* (c'est à dire en moyenne et le plus souvent) transformée sur toute la zone d'intérêt en houle de beau temps. Une telle dune artificielle va faire converger le sédiment sur son emplacement, favoriser la croissance d'une dune hydraulique sableuse qui pourra ensuite remonter elle-même le long du profil et contribuer au re-engraissement naturel de la plage.

Le prototype doit aussi utiliser les ressources locales, être une solution douce (sans impact écologique négatif, basée sur des matériaux naturels au maximum). Vu l'ambition, il peut exister des incertitudes sur la résistance des matériaux qui sont mobilisés, sur les techniques d'ancrage du prototype sur le fond marin et sur le pouvoir dissipatif de l'agencement des matériaux choisis pour former la dune artificielle initiale. Il faut donc envisager un prototype qui va permettre de tester certaines options pratiques autour du principe protecteur.

Il a été décidé de déployer un prototype qui sera composé de 2 ou 3 sections (nommées à partir de A, puis B, C) qui répondront toutes à l'idée de dune hydraulique artificielle, déclinées sous différentes formes. La figure 14 illustre cela. Le prototype sera là pour dissiper partiellement l'énergie des vagues et maximiser les conditions de beau temps (pas détruire les vagues). La longueur totale de l'expérimentation sera de l'ordre de 100 m le long de la plage devant Saint Joseph, et composé de 3 sections de l'ordre de 30 m correspondant à 3 déclinaisons pratique du même concept initial (figure 15).

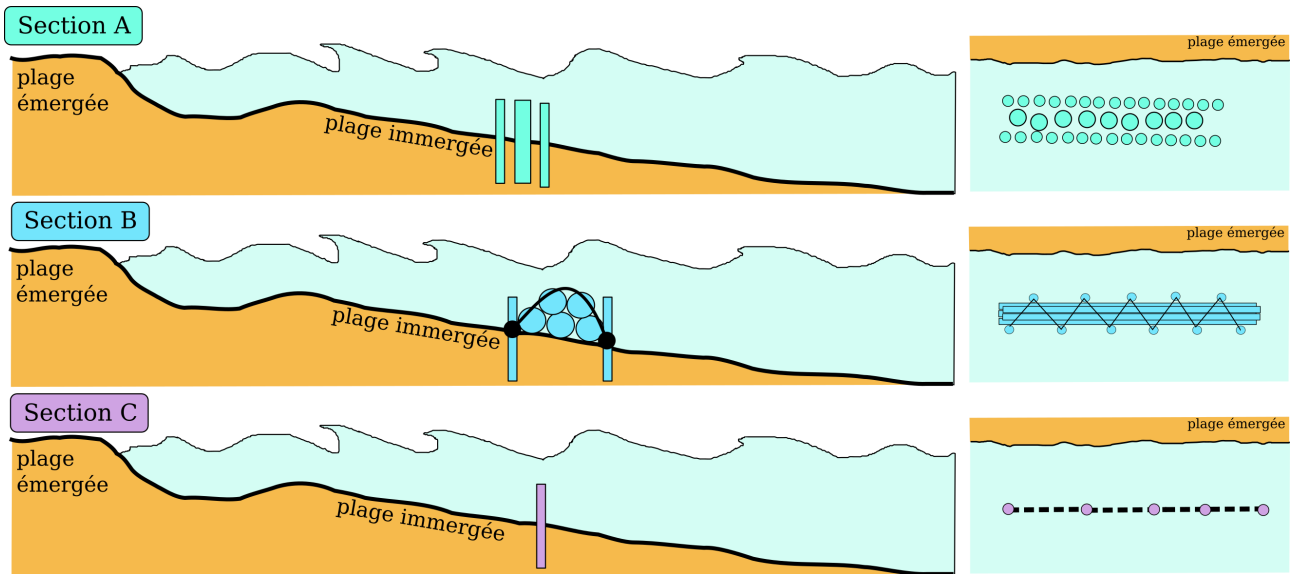


FIGURE 14 : Profil illustrant les caractéristiques des 3 sections potentielles du prototype. Ces sections peuvent évoluer jusqu'à octobre 2023, sur la base d'une quantité constante de matériaux naturels collectés sur place.

Sur la base de l'expérience de Gladys dans le design de solutions douces, et pour répondre au principe protecteur proposé ci-dessus, on fait le choix *a priori* de 3 formes qui sont évoquées sur la figure 14 et correspondent aux trois approches suivantes :

- La section A sera constituée d'un ensemble de pieux verticaux de bois de récupération organisés en palissades successives formant une forêt de troncs fins ayant un caractère dissipatif évident. Les pieux peuvent être sous l'eau ou affleurant selon les contraintes réglementaires ou paysagères ;
- La section B sera constituée d'un LCS (Low Crested Structure), c'est à dire une structure sous-marine mimant directement la forme d'une dune hydraulique émergente, et composée de matériaux de récupération ;
- La section C sera une ligne unique de pieux verticaux ancrés soutenant un filet composé de feuilles de cocotier tressé. L'image la plus simple d'un tel dispositif est celle d'un filet ne cherchant pas à bloquer le sable, minimisant l'effet de haie (le fait qu'un mur induit de la vorticités sur son flanc aval à l'écoulement, qui a un pouvoir érosif) mais ayant un pouvoir dissipatif.

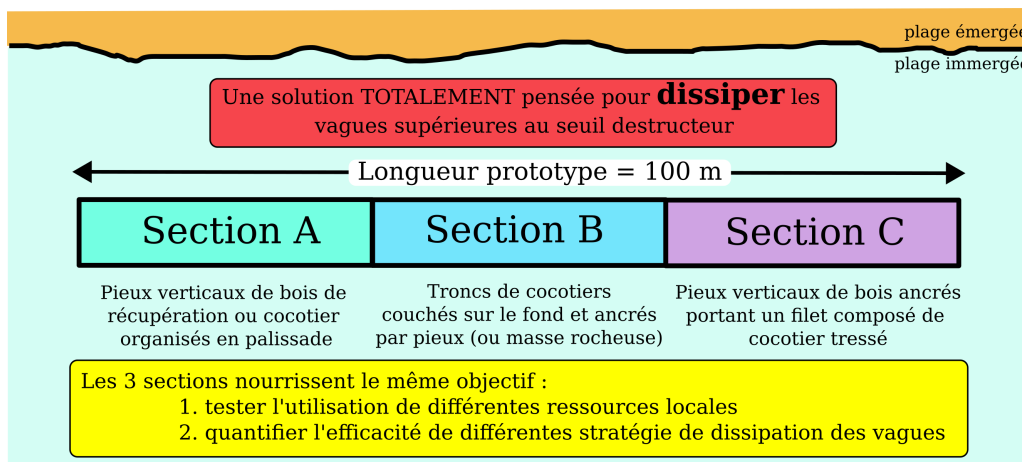


FIGURE 15 : Le principe du prototype pour la problématique 1 (recul du trait de côte). L'idée est de mettre à l'eau 2 ou 3 dispositifs différents, dont l'efficacité et la robustesse seront testées et comparées. La solution opérationnelle se basera sur le retour d'expérience sur les sections de ce prototype.

La raison d'être de chacune des 3 sections du prototype est de permettre de a) tester la résistance en mer sur le long-terme de certaines ressources locales naturelles utilisées, b) tester la résistance de la structure aux efforts mécaniques induits par les vagues et le courant et c) quantifier son efficacité relativement aux autres déclinaisons du principe atténuateur optimal.

4.4 Travail de dimensionnement et de définition du suivi du prototype

La figure 16 décrit tout d'abord les deux types de travaux de dimensionnement qu'il faut mener pour accompagner le déploiement du prototype :

- Chercher la position et la forme optimale du prototype (et de ses 3 sections) pour le site de Saint Joseph. Pour cela, on fait appel à des techniques d'optimisation numérique de forme et de positionnement héritées de l'aérospatiale (*quelle est la meilleure forme d'une aile d'avion pour minimiser la traînée et maximiser la portance quand on veut faire voler un aéronef loin et avec le moins de carburant possible ?*) qui ont été développées par B. Mohammadi et F. Bouchette à l'Université de Montpellier ;
- on cherche comment doivent être agencés les matériaux choisis pour les 3 sections, en respectant les contraintes techniques (ancrage, résistance, etc), mais en cherchant à atteindre une certaine dissipation, qui n'a pas besoin d'être trop importante mais suffisante pour inciter le sédiment à s'accumuler sur la structure. Pour cela, on met en oeuvre plusieurs techniques numériques qui peuvent être différentes selon la section (formulation de la physique différente), à discrétion et selon le ressenti des chercheurs impliqués. L'objectif est d'avoir des garanties sur le caractère dissipatif sous toutes les conditions ;

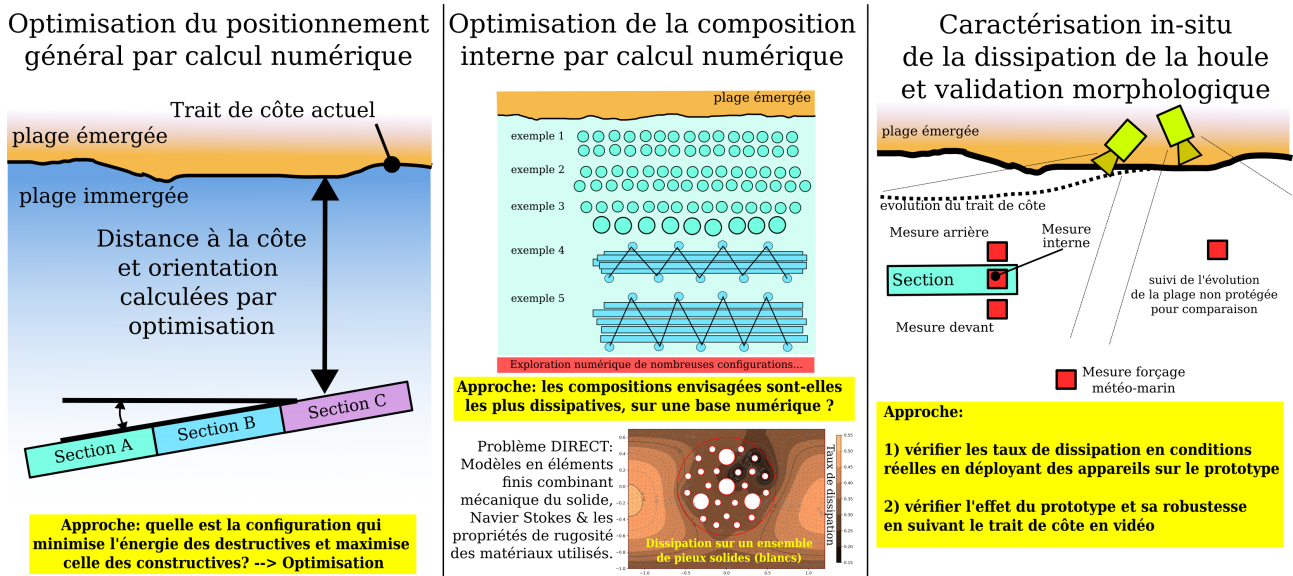


FIGURE 16 : Les 3 axes de travail à consolider pour le déploiement d'un prototype à l'automne 2023 : a) l'optimisation de placement (distance, orientation) de l'ensemble de la solution par rapport au trait de côte actuel, b) le dimensionnement interne des sections du prototype (densité des matériaux, disposition interne, ajustements pour gérer les questions de robustesse), et c) mise en place et organisation logistique des suivis hydro-sédimentaires accompagnant la mise à l'eau du prototype, pour la mesure de son efficacité et son comportement.

En parallèle de ce travail numérique, la totalité des instruments de mesure à déployer en mer, les structures porteuses et le plan de positionnement doivent être préparés pour un suivi hydro-sédimentaire adapté à la caractérisation de l'efficacité des 3 sections. Pour cela, on envisage :

- de placer à l'amont et à l'aval (vis à vis de la direction de propagation des vagues) de chaque section une station de mesure assurant la caractérisation du champ de vagues, du profil de courant,

du niveau d'eau et de la variation de l'altitude du fond au point de mesure. On peut également un appareil plus au large pour mesurer les conditions entrantes. Et un couple d'appareil positionnés à la même distance de la côte que les autres couples, mais dans un secteur non protégé par le prototype. Ceci permet de travailler sur la dissipation de chaque section par rapport à un témoin indépendant. Une dernière possibilité est de mettre des appareils spécifiques au sein des structures formant les 3 sections pour apprécier le détail de certains mécanismes de dissipation à petite échelle ;

- un système de caméra doit être mis en place (hors champ d'action de Gladys) pour effectuer a) un suivi qualitatif de la nature des événements tempétueux, b) un suivi de la réponse des 3 sections du prototype aux différentes conditions météo-marines, c) de l'engraissement progressif de la plage ;
- on peut aussi mettre en place une ligne de pieux de bois gradués sur lesquels des opérateurs locaux relèvent régulièrement l'altitude (puisque les pieux sont fixes) du fond marin et de la plage émergée. Ceci permet d'estimer les évolutions du profil proche côtier en fonction des forçages, aux 3 sections, sans avoir à mobiliser des instruments lourds. Ces mesures permettent aussi de calibrer les images obtenues par la vidéo.

5 Protocole logistique, chemin critique et calendrier

Sur la base des choix exposés dans la section précédente, un déploiement de prototype est programmé pour l'automne 2023. On met en place un protocole récapitulé sur la figure 17 pour mener à bien la mise à l'eau d'un prototype à cette date là.

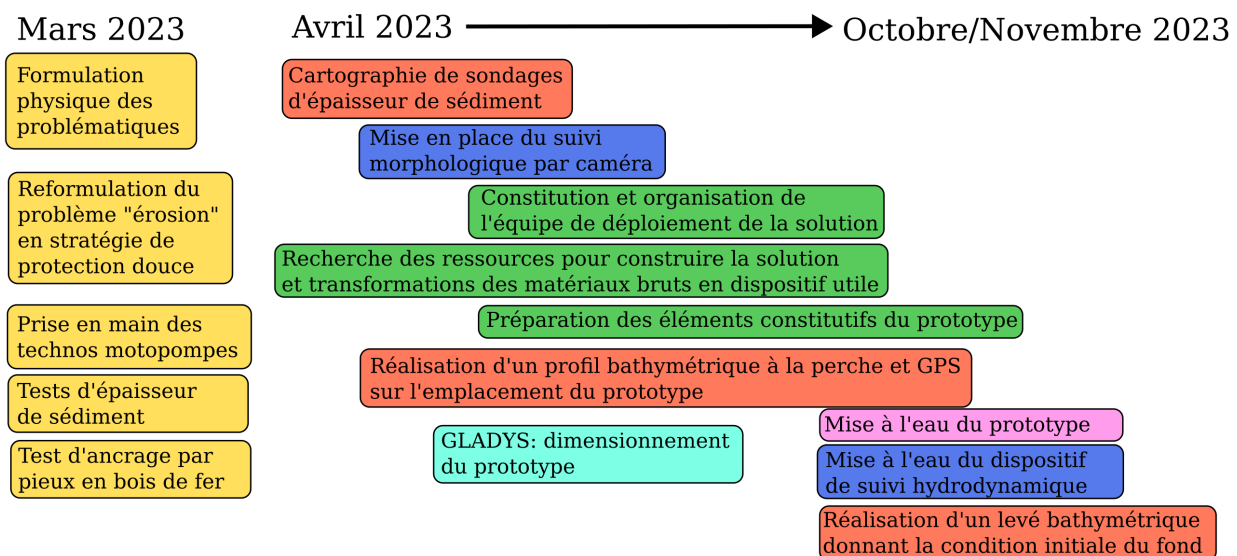


FIGURE 17 : Protocole logistique amenant au déploiement du prototype à l'automne 2023.

Au terme de l'opération de mars 2023 à Ouvéa, on a pu a) formuler les problématiques en lien avec le risque hydro-sédimentaire littoral à Ouvéa, b) reformuler la problématique recul du trait de côte en stratégie de protection douce, c) sensibiliser les habitants et acteurs locaux de la gestion du littoral à l'utilisation des motopompes et des techniques de jetting (projection d'eau sous pression par une motopompe dans le sédiment pour le liquéfier et ancrer/placer à peu près n'importe quelle structure) pour réussir des opérations d'aménagement auto-gérées, d) tester l'épaisseur de la couche sédimentaire sur le substrat rocheux corallien à quelques endroits stratégiques, ceci pour vérifier l'existence d'un stock sédimentaire minimal dans l'avant-côte et e) faire des tests d'ancrage de pieux simples, et former

les habitants à ce type de pratique pour anticiper sur les opérations de déploiement de l'automne 2023. La figure 18 est un exemple de test réalisé de manière collaborative sur place pour l'ancrage de pieux en bois de récupération.



FIGURE 18 : Photo in-situ d'un test d'ancrage réalisé dans l'avant côte devant l'église de Saint Joseph. Ces pieux ne constituent absolument pas la solution de protection (contrairement à l'idée qui est véhiculée sur place). Il s'agit simplement de tests d'ancrage permettant de vérifier qu'un ensouillage des pieux dans environ 1 à 1.5 m de sédiment suffit à les rendre non remobilisables par les événements tempétueux.

Pour que le protocole de la figure 17 se déroule dans les meilleures conditions, il faut faire attention au chemin critique de cette opération, indiqué sur la figure 19. Ce chemin critique repose sur 4 étapes incontournables : a) les ressources naturelles utilisées comme matériaux pour la construction des 3 sections doivent être prêtes avant le déploiement et stockées à proximité de la zone de déploiement ; b) le déploiement ne doit pas être lancé avant d'avoir l'assurance que les ancrages par pieux seront possibles (sondages à la moto-pompe du sédiment pour garantir 1 m d'épaisseur de sable meuble) ; c) un profil continu de la plage émergée et du fond marin jusqu'à une profondeur de quelques mètres doit être réalisé avant la venue de l'équipe Gladys sur place afin de pouvoir faire des derniers tests numériques et garantir le meilleur placement possible de la solution ; d) disposer avant le début de l'opération de déploiement, des moyens à la mer nécessaire au transport des matériaux et de la motopompe, et d'une équipe de déploiement de la solution pour travailler avec l'équipe Gladys.

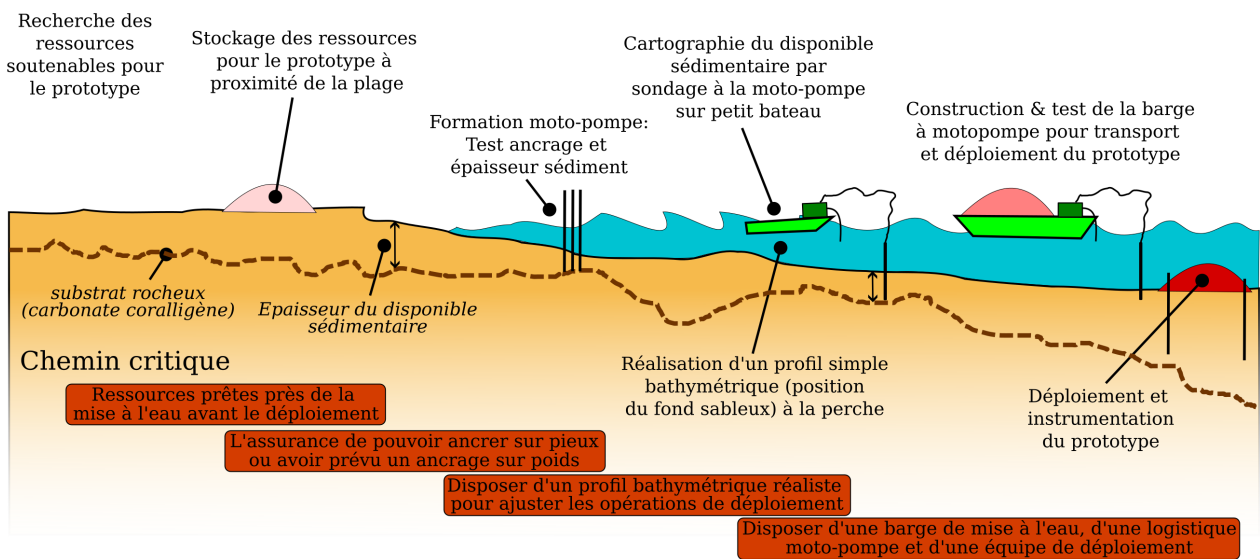


FIGURE 19 : Chemin critique à respecter pour le déploiement de l'automne 2023.

Enfin, la figure 20 est une proposition non contractuelle de calendrier de déroulement des opérations jusqu'à la restitution d'un rapport de déploiement après novembre 2023.

| | Déroulement des travaux sur l'année 2023 (par mois) | | | | | | | | | | | |
|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 |
| Etat de l'art et reformulation des problèmes | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | |
| Formulation exacte de la problématique selon partenaires et reformulation physique | | | ■ | | | | | | | | | |
| Formation sur les techniques motopompes (sondage épaisseur sédiment, ancrage) | | | ■ | | | | | | | ■ | | |
| Mise en place d'un test d'ancrage par pieux, identifié comme une stratégie probable | | | ■ | | | | | | | | | |
| Suivi morphologique direct du test d'ancrage (robustesse, comportement en pieds d'ouvrage) | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Réalisation d'une cartographie de l'épaisseur sédimentaire (sondage par motopompe tarée) | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Mise en place du suivi morphologique par caméra | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Travaux de dimensionnement du prototype (positionnement et composition interne) | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | |
| Achat, construction des moyens de mise à l'eau du prototype, et mise en place d'une équipe | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | |
| Recherche et regroupement des ressources soutenables pour le prototype | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| Construction d'une maquette de prototype | | | | | | | ■ | | | | | |
| Réalisation d'un MNT (= modèle numérique de terrain) de la zone d'étude (pour travaux suivants) | | | | | | | | | | ■ | ■ | |
| Réalisation d'un profil bathymétrique au niveau de Saint Joseph | | | | | | | | | | ■ | ■ | |
| Mise à l'eau du prototype | | | | | | | | | | ■ | ■ | |
| Début du suivi hydro-morphologique et génie côtier du prototype (sur minimum 6 mois) | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ |
| Restitution sur première analyse du suivi hydrodynamique et vidéo et ajustements de la solution | | | | | | | | | | | | ■ |

FIGURE 20 : Proposition de calendrier des opérations jusqu'au déploiement de l'automne 2023.

6 Conclusion et perspectives

Frédéric Bouchette, au nom du groupe Gladys, a été invité par la Province des Iles Loyauté à faire un séjour en mars 2023 sur Ouvéa, rattachée à la Nouvelle-Calédonie. Lors de ce séjour, une série de sujets sensibles en lien avec le risque littoral et la résilience hydro-sédimentaire littorale a été formulée par les habitants et les personnes en charge de la gestion du littoral à Ouvéa. Ces sujets ont été reformulés sous la forme de 4 problématiques dont 3 ont été décrites et documentées dans ce rapport. A la demande de la Province, et fort des observations réalisées pendant ce séjour, Frédéric Bouchette a proposé une stratégie de gestion du recul du trait de côte dans la partie nord lagonaire de Ouvéa (anse de Saint Joseph). Cette stratégie repose sur un principe fondateur original (l'optimisation de l'occurrence des vagues de beau temps), et passe par le déploiement en mer d'un prototype décliné en 3 sections toutes fondées sur le principe fondateur, mais déclinées techniquement de 3 manières différentes. Frédéric Bouchette et Gladys sont dorénavant engagés dans un travail d'optimisation de la forme et du placement de ce prototype sur le profil de plage. Un protocole de suivi hydro-sédimentaire a été pensé et la logistique du déploiement du prototype et des appareils de mesure a été définie. Fin octobre 2023, le prototype de Saint Joseph sera mis à l'eau.

Ce document constitue le résumé digéré des travaux directement issus de la visite de terrain. Les caractéristiques finales du prototype qui sera mis à l'eau peuvent être amenées à changer jusqu'à quelques jours avant la date du déploiement, mais sans modifier le volume de matériaux et les ressources naturelles mobilisées pour l'automne 2023. Les informations données dans ce document sont fournies à titre indicatif pour illustrer la démarche.

La prochaine étape de cette initiative est la rédaction d'un rapport de déploiement, beaucoup plus techniques et à destination de spécialistes de l'aménagement, dans lequel la totalité des travaux de modélisation et de dimensionnement seront exposés précisément. Le prototype sera présenté tel qu'il aura été mis à l'eau et les suivis hydro-sédimentaires seront détaillés tels qu'ils auront été mis en oeuvre. Ce rapport sera publié en novembre 2023 et fera l'objet d'une publication scientifique.

Vu la richesse des problématiques littorales soulevées à Ouvéa, la présence de la mangrove et celle d'un récif très singulier sur les Pléiades Nord, le réseau Gladys peut envisager de s'engager sur plusieurs années auprès des partenaires locaux qui souhaiteraient un tel partenariat pour renforcer les travaux de recherche fondamentale et appliquée sur ce site, continuer sur l'action R&D lancée en 2023, et renforcer



le transfert de connaissance/compétences vers les habitants et acteurs du territoire. Dans ce document, plusieurs pistes ont été proposées pour étendre la réflexion : a) le traitement de la problématique 2 (niveau d'eau dans la mangrove), b) le traitement de la question des intrusions salines dans la mangrove, c) l'extension de la réflexion sur le recul du trait de côte à d'autres secteurs de l'île, d) la généralisation du système de protection dans l'anse d'Ouvéa, après une période probatoire de suivi du prototype bien entendu, et e) des travaux exploratoires sur le système récifal des pléiades Nord, en particulier sur les questions de transformation du spectre de vagues et de relation rugosité/dissipation.

7 Remerciements

Frédéric Bouchette remercie chaleureusement l'ensemble des habitants de l'île d'Ouvéa rencontrés sur place lors du séjour de mars 2023, la chefferie du Nord pour son accueil très amical et passionné et pour la qualité des échanges lors des réunions coutumières, toutes les personnes investies au sein de la "maison des femmes" pour leur motivation à s'engager dans la lutte contre l'érosion du trait de côte, et enfin, et tout particulièrement, Jean-Jérôme et Albert pour la qualité de leur accompagnement pendant le séjour de mars 2023, afin que celui-ci soit le plus efficace possible.

Frédéric Bouchette remercie aussi grandement la Province des Îles Loyauté, son président Jacques Lalié ainsi que Emile Mène et Rina Parau, pour la supervision de l'ensemble de l'opération et le financement des frais de déplacement sur Ouvéa lors de la mission de mars 2023. Il remercie les services techniques de la Province pour l'aide logistique apportée et pour les sessions de mécanique imposées par les circonstances. Il remercie tout autant le maire d'Ouvéa Maurice Tillewa et son équipe en charge de l'environnement pour les échanges très intéressants autour de l'avenir d'Ouvéa en matière de tourisme, de développement économique et de protection du littoral.

Frédéric Bouchette remercie Green Cross France & Territoires pour avoir identifié le groupe Gladys comme partenaire pertinent des travaux sur la résilience hydro-sédimentaire à Ouvéa, et tout particulièrement Nicolas Imbert et Lucile Pilot pour leur professionnalisme.

Frédéric Bouchette a été invité par Green Cross en mars 2023 à faire une première visite et une analyse des problématiques littorales sur Ouvéa, à partir de laquelle ce rapport a pu être établi. Cet engagement est la première priorité du Plan Provincial de Résilience Territoriale. Green Cross a pris en charge ses frais de déplacement et d'hébergement, et l'appui au bon déroulement des travaux, dans le cadre de la mise en place des engagements pris dans la Déclaration des Iles Loyauté en mai 2022, à Innov'by Loyalty 2022.

La feuille de route globale pour les prochaines étapes a été présentée aux instances de co-construction et de pilotage choisies par les Iles Loyauté, sur la base des conclusions du présent rapport. La Province des Îles Loyauté et Green Cross travaillent conjointement et avec Gladys pour le financement au mieux des prochaines étapes telles que définies dans la feuille de route.

Enfin Frédéric Bouchette remercie les membres de Gladys pour avoir accordé des moyens propres de ce réseau de recherche pour financer le séjour sur l'île d'Ouvéa, et pour l'accès aux moyens de calcul de Gladys sur le cluster HPC MESO@LR pour les travaux numériques réalisés après le séjour. L'engagement humain et financier de Gladys sur la problématique de la résilience littorale à Ouvéa est une marque de respect de ce groupe pour ce territoire, ses habitants et sa culture.