



**DAHMANI NOAM**

**MASTER 1 BEE (Biologie, Ecologie et Evolution)**

**Année 2024/2025**

## **Rapport de stage Master 1**

**Rôles des écosystèmes marins tropicaux face à la submersion côtière**



**Superviseur de stage : Thibault Laigre**

Stage du 06/01/2025 au 14/02/2025 au BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières)

## **Remerciements**

Tout d'abord, je tiens à remercier Ywenn De La Torre qui m'a permis de faire partie de l'équipe du BRGM pour ce stage de master 1.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe qui a été très agréable tout au long de cette expérience et m'a permis de travailler dans les meilleures conditions possibles.

Je souhaite d'autre part exprimer ma gratitude à Nina Grillon et Lise Fiegel pour leur aide et leurs conseils dans la relecture de mon rapport.

Enfin un grand merci à Thibault Laigre, mon encadrant de stage, qui m'a permis de prendre part à ce projet. Merci pour sa bienveillance, son soutien ainsi que le partage de connaissances et ses conseils avisés qui ont su m'orienter et qui ont contribué au développement de mes compétences.



# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Materiel et methodes.....</b>	<b>4</b>
2.1. Canal à houle.....	4
2.2. Modélisation des vagues.....	5
2.3. Modélisation des écosystèmes.....	6
2.4. Mesures de submersion.....	6
2.5. Analyses statistiques.....	7
<b>3. Résultats.....</b>	<b>7</b>
3.1. Vagues modérées.....	7
3.1.1. Ecosystèmes.....	7
3.1.2. État de santé.....	8
3.2. Vagues fortes.....	10
3.2.1. Ecosystèmes.....	10
3.2.2. État de santé.....	11
<b>4. Discussion.....</b>	<b>13</b>
4.1 Rôle des écosystèmes dans la réduction de la submersion côtière .....	13
4.2. Influence de l'état de santé.....	15
4.3 Impact du changement climatique.....	16
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>17</b>
<b>6. Bibliographie.....</b>	<b>18</b>
<b>7. Annexes.....</b>	<b>22</b>

## 1. Introduction

Dans un contexte de changement climatique, on constate aujourd'hui une augmentation d'événements météorologiques exceptionnels (tempêtes, sécheresses, canicules) entraînant des impacts directs sur les milieux naturels et anthropisés (Lacoste, 2024). Une autre conséquence du changement climatique est l'augmentation du niveau de la mer depuis 1870, avec une élévation de 3,2 mm/an entre 1992 et aujourd'hui (Le Cozannet et al., 2014). Tout cela provoque certains effets au niveau du littoral, et notamment une sensibilité particulière liée aux risques d'érosion côtière et de submersion marine. La submersion marine, correspond à une inondation rapide et de courte durée de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (Lacoste, 2024). Ainsi, une élévation du niveau de la mer associée à de fortes tempêtes pourraient induire des submersions marines plus intenses et plus fréquentes. La récurrence de ces événements serait alors responsable d'une vulnérabilité du littoral avec un effet négatif sur les espaces naturels, (plages, lagunes, zones humides), les aménagements (infrastructures, logements) mais aussi les terres agricoles et aquifères côtiers soumis au risque de salinisation (Rulleau et al., 2015).

Cette vulnérabilité face aux changements climatiques et aux événements météo-marins extrêmes est particulièrement établie au niveau des îles tropicales (Nurse et al., 2014). En effet, le cumul des impacts des événements tropicaux et extratropicaux accroît les niveaux de risques côtiers et pouvant affecter une grande partie de leur surface (Duvat, 2015). Dans les Antilles, l'aléa submersion marine a deux origines, d'une part l'aléa tsunami et d'autre part une origine météorologique par les épisodes cycloniques et les trains de houle atlantiques. Dans cette zone géographique, les aléas d'origine météorologique sont généralement plus fréquents exposant les populations côtières aux submersions. En raison de leur position hyperocéanique, les îles tropicales vont aussi subir l'impact des houles dites "distantes", qui engendrent des submersions majeures. Les cyclones tropicaux peuvent aussi être à l'origine de submersions majeures dues à des houles pouvant dépasser 5 m voire 10 m de hauteur au niveau des côtes (Duvat, 2015). Cela est d'autant plus inquiétant qu'il existe de plus en plus de preuves d'un changement futur de l'intensité moyenne mondiale des cyclones tropicaux vers des tempêtes plus

fortes. D'autre part, les travaux du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ont validé l'hypothèse de la montée prévisible du niveau de la mer, ce qui accroîtrait le risque de submersion.

De ce fait, certaines mesures doivent être mises en place afin de pouvoir prévenir les événements liés aux risques côtiers et de pouvoir y faire face. En terme de gestion côtière, les solutions se sont souvent centrées sur des solutions rapides et efficaces, avec par exemple l'utilisation de digues qui présentent cependant des limites et impacts négatifs (Mulot et al., 2010 ; Laigre, 2023 ). Ce genre de solutions à court terme a souvent des coûts économiques, environnementaux et sociaux considérables ne permettant pas forcément de pouvoir répondre à long terme aux impacts du changement climatique (Narayan et al., 2016). De plus, en cas de rupture de digues, les conséquences peuvent être dramatiques comme illustré lors de la tempête de Xynthia qui a tué 47 personnes sur les côtes de vendée en février 2010 (Mulot et al., 2010).

Ainsi d'autres solutions plus durables et plus douces sont de plus en plus développées. On peut citer le rechargement des plages qui a pour but d'équilibrer la plage et d'apporter artificiellement des sédiments manquants, la plantation d'espèces stabilisant les dunes, le maintien de biomasses sur la plage immergées ou encore la mise en place de haie brise-vent en châtaignier. Parmi ces approches il se développe ainsi un intérêt grandissant pour des solutions basées sur la nature. Cela passe par des approches hybrides combinant structures naturelles et artificielles, la restauration passive ou élimination des perturbations, permettant la croissance d'écosystèmes naturels (Laigre, 2023). Tout l'intérêt de cette approche repose sur le fait que les écosystèmes marins côtiers tropicaux (herbiers, mangroves, récifs coralliens) sont particulièrement efficaces pour amortir l'action des vagues et fournir une protection naturelle contre les risques côtiers (Ferrario et al., 2014 ; Storlazzi et al., 2018). Ainsi dans le contexte actuel la question de la quantification du rôle protecteur de tels écosystèmes devient centrale (Guannel et al., 2016).

Les mangroves se trouvent dans des zones basses en très faible pente vers le large et soumises au rythme des marées, se développant dans des zones protégées de

l'énergie de la houle. Elles réduisent par an, à l'échelle mondiale, les dommages matériels de 65 milliards de dollars et protègent plus de 15 millions de personnes (Menéndez et al., 2020). La réduction des vagues va dépendre des différents facteurs géomorphologiques, géométriques et écologiques (Duphil, 2024). La houle incidente et le niveau d'eau associé aux mangrove vont aussi jouer un rôle dans l'atténuation (Amma et Bhaskaran, 2020). L'interaction entre le mouvement des vagues et les éléments végétaux submergés va permettre principalement de dissiper l'énergie. Celles-ci sont, dans les îles tropicales, en association avec les récifs coralliens (Duphil, 2024). Ces derniers vont aussi avoir une fonction de dissipation des vagues selon les processus de déferlement et la friction avec le fond (Monismith, 2007). Ce phénomène se produit à la rencontre de la houle avec un obstacle tels qu'un récif corallien, réduisant la profondeur et augmentant l'amplitude des vagues jusqu'au déferlement. Les herbiers marins vont, de même, jouer leur rôle dans l'atténuation de l'énergie des vagues (Duchêne et al., 2010). Ces derniers vont être liés aux écosystèmes cités précédemment jouant un rôle combiné dans la protection des côtes (Guannel et al., 2016)

Bien que la recherche se soit déjà penchée sur les questions de protection par les écosystèmes, il existe encore certaines lacunes dans les connaissances qui doivent être comblées afin d'obtenir une meilleure compréhension globale des processus côtiers influencés par ces écosystèmes (Laigre, 2023). Il est donc primordial de pouvoir agir en conséquence et par la même occasion d'informer et éduquer le grand public face aux enjeux actuels.

Dans cette étude, le but était de mettre en évidence le rôle de ces écosystèmes dans la protection des côtes face à la submersion marine par la construction d'un canal à houle. Les écosystèmes caractéristiques des tropiques, notamment de la région des Caraïbes (mangroves, récifs coralliens, herbiers) ont été représentés. L'intérêt était de pouvoir observer de manière simpliste l'efficacité de ces écosystèmes seuls ou en interaction face aux problèmes de submersion côtière. De ce fait la mise en place de différentes associations écosystémiques et scénarios de houle ont été étudiés afin de mieux comprendre et quantifier la protection induite par ces milieux marins. D'autre part, cette modélisation physique est intéressante en vue de l'utilisation comme outil de vulgarisation pour le public, permettant une

compréhension simplifiée du phénomène de submersion et de l'action des mangroves, récifs et herbiers marins vis-à-vis de celui-ci.

Les objectifs de ce stage et de l'étude associée sont de : (1) mettre en évidence le rôle important des écosystèmes marins tropicaux face à la submersion marine, (2) analyser les différences d'efficacité via différents scénarios d'associations écosystémiques, d'états de santé et de houle, (3) créer un outil de vulgarisation permettant une compréhension simple des mécanismes de protection côtière de la submersion marine.

## **2. Matériel et méthodes**

### *2.1 Canal à houle*

La première étape pour la réalisation du projet a été la mise en place et construction du canal à houle. Celui-ci a été assemblé à l'aide de plaques en plexiglass qui ont été découpées dans les dimensions souhaitées afin d'obtenir un canal de 2 m de long, 0,3 m de large et 0,4 m de hauteur. Les dimensions du canal ont été étudiées afin d'obtenir une bonne modélisation des vagues et une place suffisante pour installer les différents modules des écosystèmes étudiés. Des tasseaux de bois ont été mis en place afin de stabiliser la structure totale puis du joint a été appliqué afin d'assurer l'étanchéité du canal à houle.

Afin de vérifier l'étanchéité du bassin un colorant rouge a été versé préalablement dans l'eau du canal. Malheureusement, de nombreux soucis de fuites ont été observés, rendant l'étanchéisation du canal plus longue que prévu. Une plaque supplémentaire de plexiglass a ensuite été installée sur le dessus et en amont du canal afin de pouvoir y installer le moteur générateur de vagues.

Enfin une dernière plaque a été fixée à l'extrémité du canal afin d'obtenir une zone de récupération de l'eau submergée (Figure 1). Celle-ci correspondait en hauteur à la taille du module plage afin de ne pas interférer dans les mesures de submersion. Du colorant bleu a été ajouté à l'eau lors de la finalisation du canal à houle afin d'avoir un rendu plus visuel des vagues et de la submersion (Figure 1).

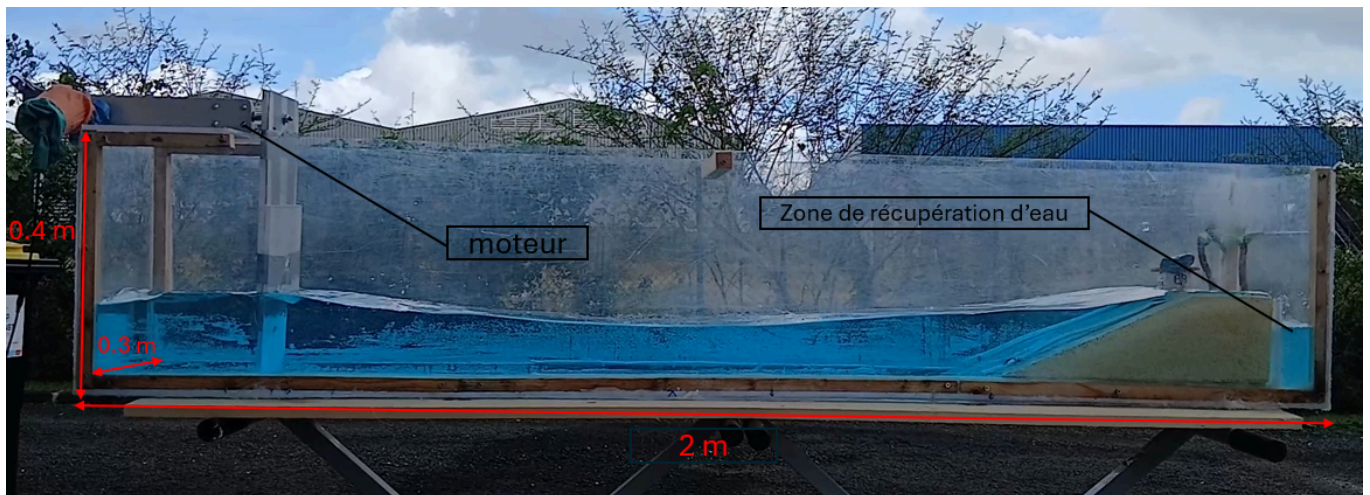


Figure 1 : Image du canal à houle et dimensions associées

### 2.1 Modélisation des vagues

Dans le cadre de cette expérience, le but était de pouvoir modéliser des vagues côtières afin de représenter le plus fidèlement la submersion marine associée. En zone côtière, les eaux sont généralement peu profondes, il était donc important de mettre en place un système représentatif de la physique associée à ces conditions. Le but était de pouvoir créer un mouvement horizontal actionnant l'ensemble de la colonne d'eau et pas seulement les eaux de surface. Pour se faire, un moteur linéaire à été utilisé et fixé sur le haut du canal. Ce moteur pouvait être réglé à différents voltages avec un maximum de 24 volts correspondant à une vitesse maximale de 200 tours par minute. Le moteur était équipé d'une tige sur laquelle a été vissée une plaque faite de métal et plexiglass allant jusqu'au fond du canal et entraînant le mouvement d'eau horizontal avec un actionnement sur 16 cm. Cela a permis d'obtenir un mouvement orbital des particules d'eau comprimé en une ellipse, ce qui est représentatif des vagues côtières.

Les différents voltages ont permis de mettre en évidence deux situations de forçage hydrodynamique. D'une part, une reproduction de vagues modérées simulant des conditions de tempête modérée avec une submersion faible associée à un voltage de 4,5 V. D'autre part, un voltage à 5,5 V engendrant des vagues fortes correspondant à des conditions de fortes tempêtes et donc de submersion importante. Cela a été réalisé en observant la submersion générée avec le canal à

houle dans un système avec le module plage seul, sans accompagnement d'autres écosystèmes, servant de témoin pour la submersion.

### *2.3 Modélisation des écosystèmes*

Les écosystèmes ont été représentés sous forme de modules. Pour les mangroves, récifs coralliens et la plage, ce sont des blocs de polystyrènes qui ont été découpés, enduits de résine puis recouverts de sable.

Le module plage a été découpé dans des dimensions de 49 cm x 28 cm x 16 cm, avec 15 cm de "plage" et 44 cm de pente dans la longueur. En ce qui concerne les récifs coralliens, des modules de 30 cm x 28 cm x 8 cm ont été obtenus et la représentation des coraux s'est faite par imprimante 3D et à la main (pâte auto durcissante et peinture), leur taille est comprise entre 2 et 4 cm. Les modules de mangroves ont été découpés de manière à pouvoir se fixer dans la pente de la plage les dimensions associées sont de 22 cm x 28 cm x 2,2 cm. L'ensemble des palétuviers des mangroves ont été faits à la main à l'aide de fils de fer, pâte autodurcissante et de peinture, avec une taille moyenne de 10 cm. Le tout a été recouvert de vernis afin d'assurer une bonne conservation dans l'eau et dans le temps. Les herbiers ont été illustrés en utilisant de la moquette synthétique découpée en patches de 28 cm x 25 cm x 2 cm.

Pour les mangroves, herbiers et récifs coralliens, 3 modules ont été fabriqués afin de représenter trois états de santé différents, l'état 1 en bonne santé (bon), l'état 2 semi-endommagé (moyen), et l'état 3 en mauvaise santé (mauvais). Cela a donc permis d'obtenir l'ensemble des modules suivants (Annexe 1 et 2) : "Plage" (x1) , "Mangroves" (3x, bon, moyen et mauvais), "Herbiers" (3x, bon, moyen et mauvais) et "Coraux" (3x, bon, moyen et mauvais). L'ordre de disposition des modules été associé à leur position dans le milieu naturel avec au plus proche des vagues les récifs coralliens, suivi des herbiers et enfin la plage et la mangrove associée (Annexe 3).

### *2.4 Mesures de submersion*

Les mesures permettant d'évaluer la submersion ont été faites à partir du volume d'eau qui s'écoulait à chaque test dans la zone de récupération. Un premier test témoin à été réalisé avec la présence seule du module plage (test témoin). Les

écosystèmes ont ensuite été ajoutés et les mesures ont été faites pour différentes configurations (écosystèmes seuls ou mixtes) et états de santé (Annexe 4). Chacun de ces tests ont été réalisés deux fois, pour les scénarios de vagues modérées et vagues fortes.

Afin d'obtenir les mêmes conditions pour chaque configuration, le volume d'eau était remis à niveau à chaque nouvelle configuration. Les volumes d'eau submergés ont été récupérés à l'aide d'un robinet situé sous la zone de récupération d'eau et mesuré à l'aide de récipients gradués. Malheureusement bien que les manipulations aient été faites le plus précisément possible, certains biais de mesures ont pu être engendrés dû à la remise à niveau d'eau ou la récupération des volumes submergés. De ce fait, 3 réplicats ont été réalisés pour chaque mesure afin de réduire au maximum les erreurs associées.

## *2.5 Analyse statistiques*

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R. Afin de comparer les différences significatives de volumes submergés entre écosystèmes, états de santé et longueur d'onde des vagues, les tests Anova et post- hoc de Tukey ont été utilisés. Pour se faire, les valeurs associées ont été testées pour la normalité, l'homoscédasticité et l'indépendance. Les analyses entre écosystèmes ont été effectuées pour des modules en bon état de santé.

## **3. Résultats**

Comme énoncé précédemment, dans cette étude deux forçages hydrodynamiques ont été étudiés. Un forçage générant des vagues fortes associé à une submersion importante et un forçage générant des vagues modérées associé à une submersion modérée ont été retenus. Ces deux scénarios hydrodynamiques ont ensuite été utilisés avec les différents modules et combinaisons écosystémiques pour évaluer leur influence sur la submersion.

### *3.1 Vagues modérées*

#### *3.1.1 Ecosystèmes*

Dans les conditions de vagues modérées, les volumes submergés varient en fonction des différentes configurations de modules écosystémiques. Les résultats montrent des différences significatives entre quasiment toutes les configurations (Figure 3). Cependant, l'ajout du module d'herbiers aux modules de mangroves et de coraux seuls ne semble pas réduire davantage la submersion, d'après les tests de significativité (Figure 3).

Concernant les volumes submergés, un volume d'eau de 1,852 L est observé pour le test témoin ne comprenant que le module plage. Toutes les configurations écosystémiques étudiées montrent une réduction significative de cette submersion (Figure 3). Le module d'herbiers est celui qui réduit le moins la submersion, avec un volume de 1,178 L soit une diminution de 36 % par rapport au témoin (Figure 2).

Les modules de coraux et de mangroves seuls montrent une efficacité nettement supérieure, réduisant respectivement la submersion de 94 % (0,104 L) et 88 % (0,215 L) par rapport au témoin. Enfin, l'association entre ces deux écosystèmes ainsi que la configuration complète (mangroves, coraux et herbiers) montrent une efficacité maximale dans la réduction de la submersion, ne présentant aucun volume submergé.

### *3.1.2 État de santé*

L'état de santé des écosystèmes influence également la submersion. Chaque écosystème est marqué par une diminution de volume submergé plus on se rapproche du meilleur état de santé (Figure 2).

Ces variations sont significatives entre chaque état de santé pour les modules coraux et herbiers, où le volume submergé passe respectivement de 0,228 L à 0,104 L et de 1,584 L à 1,178 L entre les états 3 (mauvais) et 1 (bon) (Figure 2). Le module coraux montre un écart plus marqué entre l'état 1 et 3, tandis que le module herbiers montre une transition plus forte entre l'état 3 (1.584 L) et l'état 2 (1.243 L), ce dernier étant plus proche de l'état 1 (Figure 2).

Pour les mangroves et les habitats mixtes (Coraux + Herbiers et Mangroves + Herbier), les différences entre les états 3 et 2 ne sont pas statistiquement significatives (Figure 4). En revanche, les volumes submergés diminuent de manière significative lorsque l'on passe à l'état 1, en particulier pour les mangroves, avec des volumes de 0,448 L en état 3 et 0,419 L en état 2, contre 0,215 L en état 1.

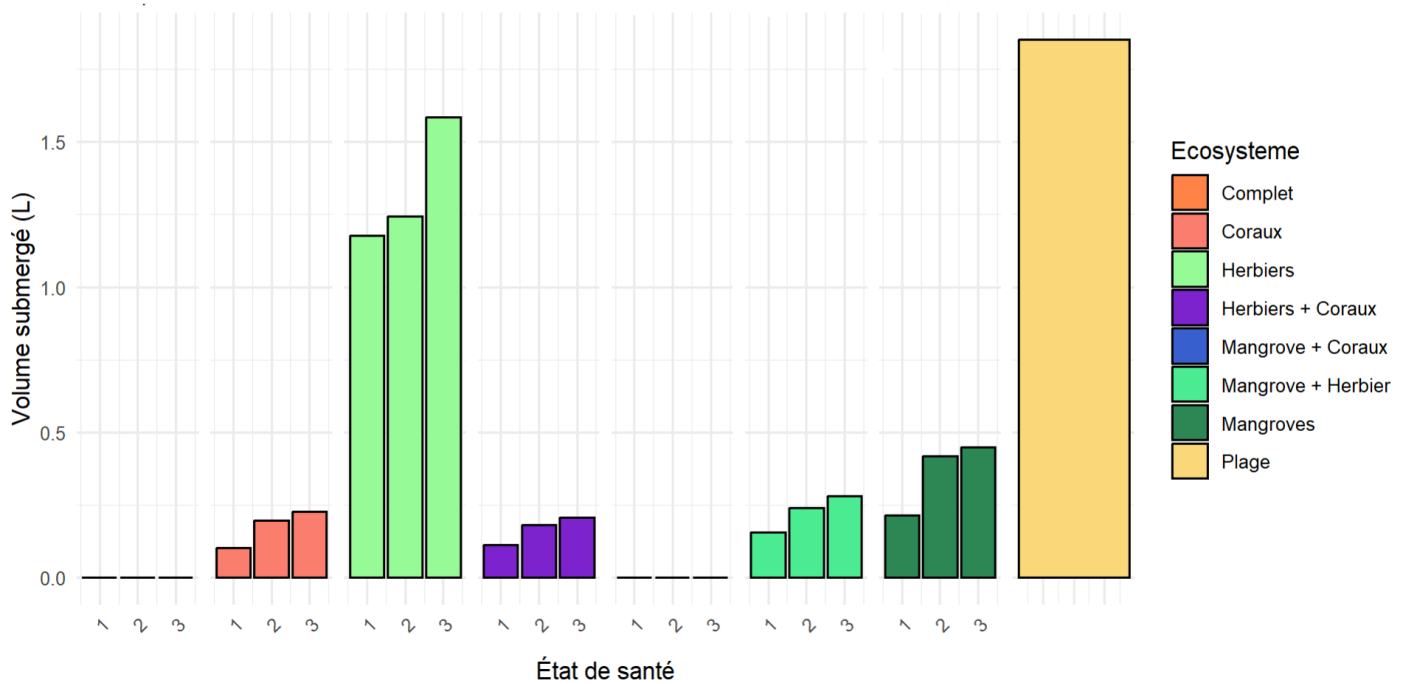


Figure 2 : Graphique en barres représentant, dans les conditions de vagues modérées, les différents volumes submergés (L) en fonction des différentes configurations de modules écosystémiques mis en place et des 3 états de santé pour chacun d'eux, bon (1), moyen (2) et mauvais (3).

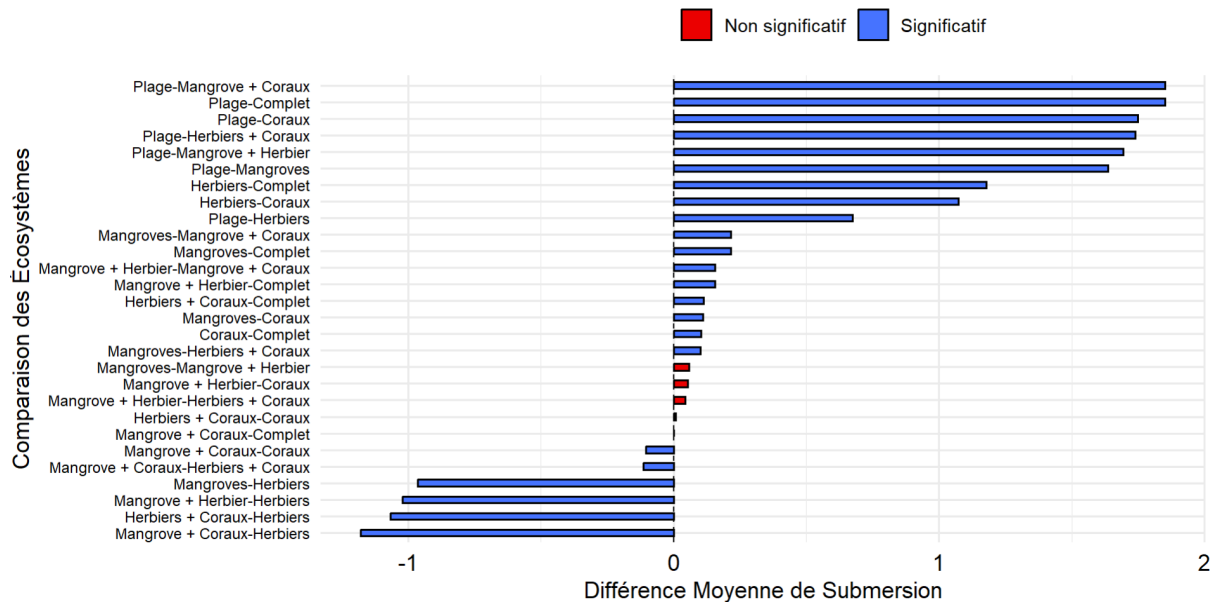


Figure 3 : Graphique représentant les résultats du test de Tukey HSD analysant des différences significatives (bleu) ou non (rouge) des volumes de submersion entre les différentes configurations écosystémiques en bon état de santé pour des vagues modérées.

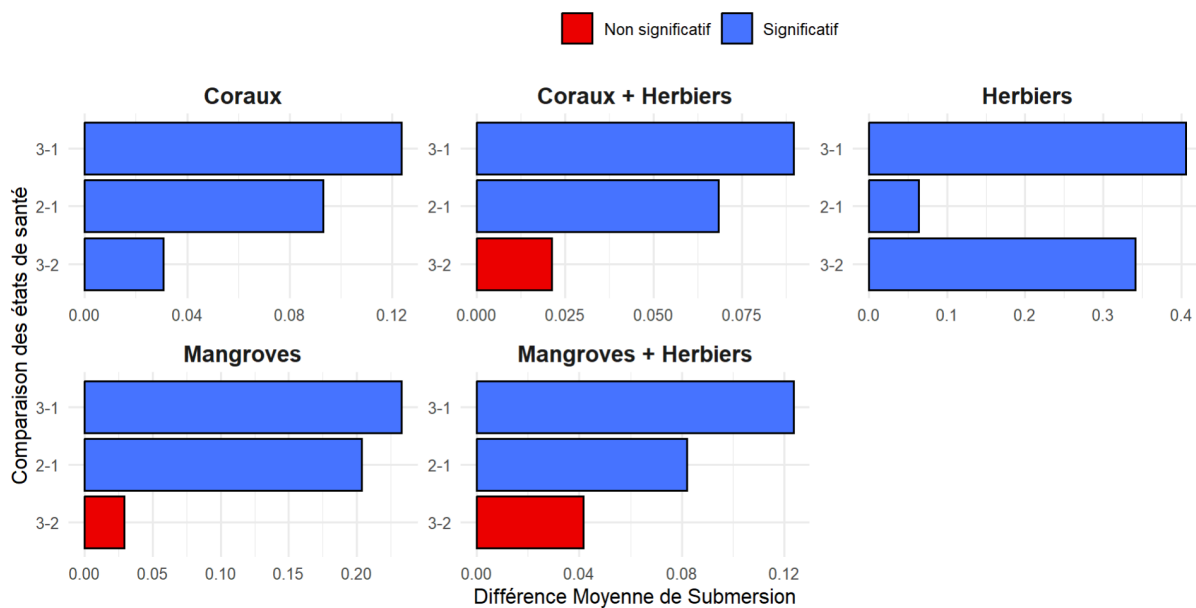


Figure 4 : Graphiques représentant les résultats du test de Tukey HSD analysant des différences significatives (bleu) ou non (rouge) des volumes de submersion entre les différents états de santé de chaque écosystème pour des vagues modérées.

### 3.2 Vagues Fortes

#### 3.2.1 Ecosystèmes

Dans les conditions de vagues fortes, une différence dans les volumes submergés est de même mise en évidence en fonction des différentes configurations de modules écosystémiques. Ici des différences significatives sont observables entre toutes les configurations (Figure 6).

La longueur d'onde plus importante entraîne un volume d'eau submergé de 5,254 L pour le module plage supérieur à celui observé dans des conditions de submersion faible (Figure 5). Cela est valable pour l'ensemble des autres configuration écosystémiques avec une baisse globale de la capacité de protection. De même que dans les conditions précédentes, le module d'herbiers est celui qui agit le moins réduisant de seulement 26% la submersion avec un volume d'eau associé de 3,892 L submergés (Figure 5). Dans ces conditions, pour les écosystèmes seuls, ce sont les mangroves qui vont le mieux agir avec une réduction de 80% (1,053 L),

significativement différente des coraux réduisant de seulement 61% la submersion par rapport au témoin.

En ce qui concerne les configurations mixtes l'association des herbiers aux coraux et mangroves seuls va cette fois impacter significativement le volume d'eau submergé avec une réduction de 88% (Mangroves et Herbiers) et 78% (Coraux et Herbiers). Enfin les configuration complète et mangroves/coraux sont encore très efficaces pour réduire la submersion de 98% et 99% (Figure 5).

### 3.2.2 *État de santé*

Une diminution du volume submergé est observée lorsque l'état de santé des écosystèmes s'améliore (Figure 7), comme cela avait déjà été mis en évidence pour des vagues modérées. Toutefois, les volumes submergés sont globalement plus importants en submersion forte, ce qui accentue les écarts entre les différents états de santé des écosystèmes.

Le module coraux présente une réduction marquée du volume submergé entre l'état 3 (3,211 L) et l'état 1 (2,039 L), avec une diminution progressive entre chaque état (Figure 5). Cette tendance est similaire à celle observée en submersion faible. De même, une tendance comparable est observée pour le module d'herbiers, où la submersion passe de 4,2 L en état 3 à 3,6 L en état 1 (Figure 5), avec cependant un absence de différence significative entre l'état 2 et 3. Pour les mangroves et l'association coraux/herbier, les différences de submersion entre les états 3 et 2 ne sont pas statistiquement significatives (Figure 7), comme c'était déjà le cas en submersion faible. En revanche, l'état 1 se distingue nettement des deux autres pour ces configurations. Par exemple, pour le module mangroves, les volumes d'eau submergés sont respectivement de 1,901 L en état 3 et 1,807 L en état 2, mais une chute significative est observée en état 1 avec 1,053 L (Figure 5). Enfin, la configuration mangroves/herbiers et complète (mangroves, coraux et herbiers) montrent une forte réduction de la submersion avec un volume significativement plus faible en état 1 comparé aux états 2 et 3 (Figure 7).

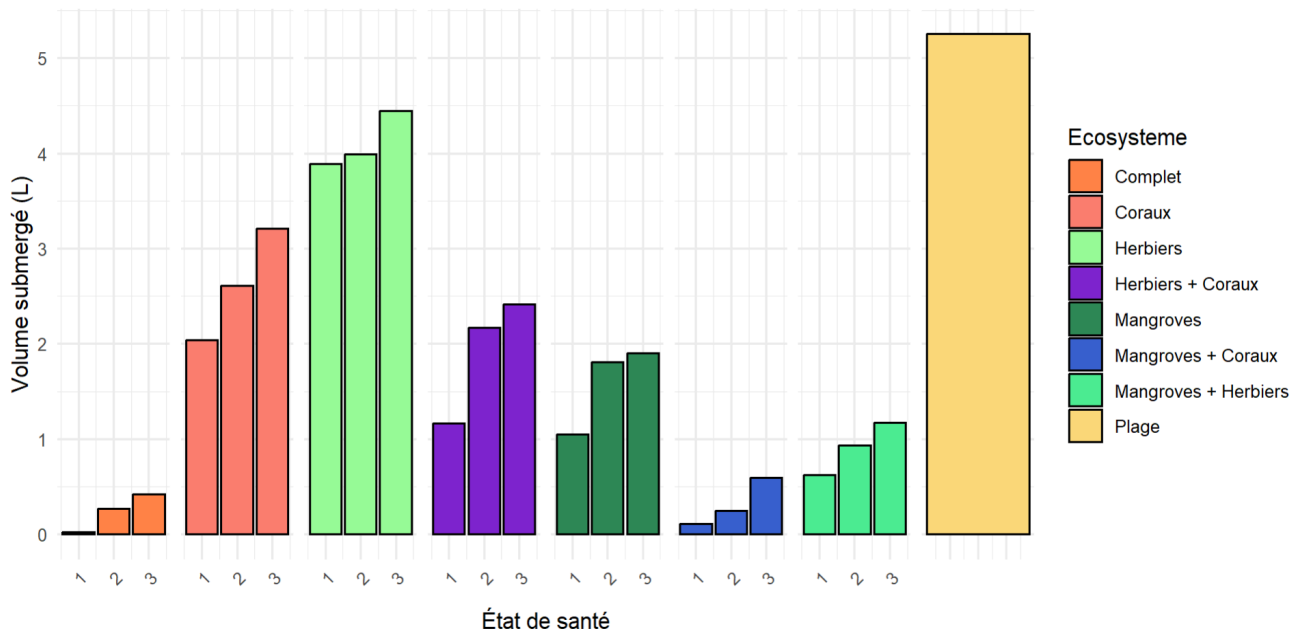


Figure 5 : Graphique en barres représentant, dans les conditions de vagues fortes, les différents volumes submergés (L) en fonction des différentes configurations de modules écosystémiques mis en place et des 3 états de santé pour chacun d'eux; bon (1), moyen (2) et mauvais (3).

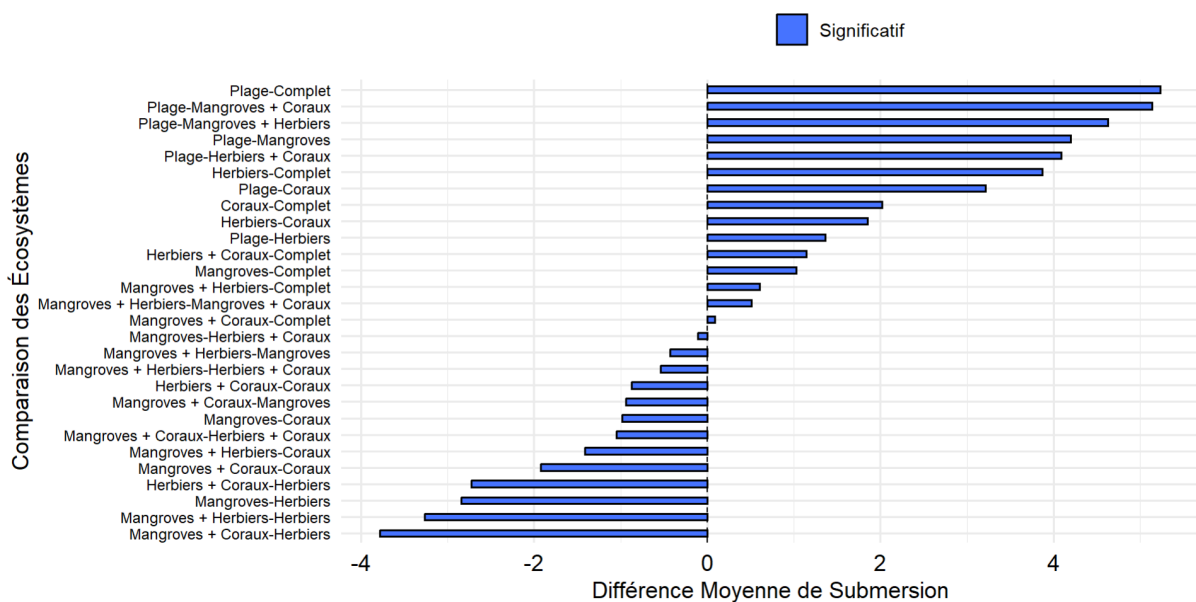


Figure 6 : Graphique représentant les résultats du test de Tukey HSD analysant des différences significatives (bleu) ou non (rouge) des volumes de submersion entre les différentes configurations écosystémiques en bon état de santé et pour des vagues fortes.

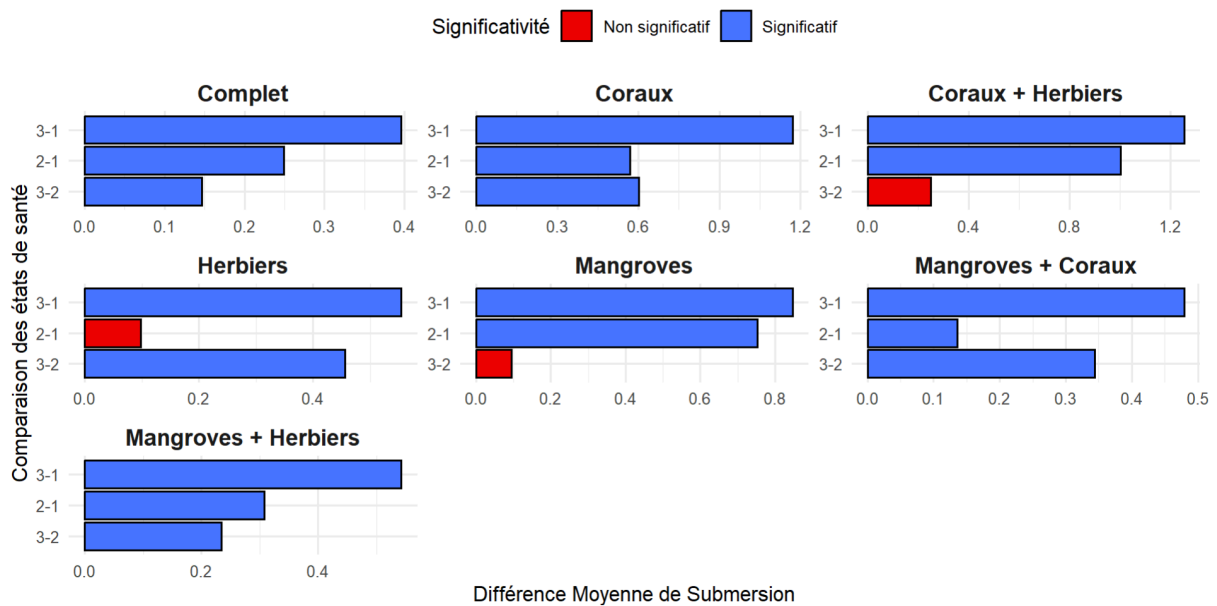


Figure 7 : Graphiques représentant les résultats du test de Tukey HSD analysant des différences significatives (bleu) ou non (rouge) des volumes de submersion entre les différents états de santé de chaque écosystème pour des vagues fortes.

## 4. Discussion

### 4.1 Rôle des écosystèmes dans la réduction de la submersion côtière

Les modules de mangroves, herbiers et coraux ont joué un rôle significatif dans l'atténuation des vagues générées par le canal à houle signifiant une certaine capacité de ces écosystèmes côtiers à pouvoir agir face à la submersion marine. L'efficacité du mécanisme de dissipation de l'énergie des vagues est directement proportionnelle à la hauteur des vagues par rapport à la profondeur de l'eau (Battjes et Stive, 1985). Les modules mis en place dans le canal, de part leur structure de base et leur éléments associés (coraux 3D, faux palétuviers, herbe synthétique), ont donc influé sur ces paramètres. Cela est visible, en milieu naturel, où ces écosystèmes vont créer une structure biogénique ou faciliter la sédimentation entraînant des conditions moins profondes et donc moins propices à la submersion (Laigre, 2023).

Bien que chaque écosystème semble avoir joué un rôle significatif, des différences dans la capacité de réduction ont pu être observées selon les modules utilisés,

démontrant une manière d'agir particulière, selon l'écosystème étudié, sur la dynamique des vagues. Cela semble logique au vu des différences de ces écosystèmes ingénieurs qui vont se développer différemment dans le milieu marin et créer des structures qui vont être plus ou moins efficaces.

La mise en place des forêts de mangroves va créer une élévation du sol, associée à une forte sédimentation et productivité primaire (Furukawa et al., 1997 ; Guo et al., 2020) qui va alors amplifier l'atténuation des vagues par mécanismes de shoaling et de déferlement (Huang et al., 2011 ; Irtem et al., 2009 ; Isfarita et al., 2019 ; Maza et al., 2016 ; Tognin et al., 2019). Les récifs coralliens quant à eux fonctionnent comme des brise-lames naturels, submergés, atténuant l'énergie des vagues (Beck et al., 2018). De plus, la rugosité des récifs joue un rôle clé dans le transfert d'énergie des eaux supérieures vers la structure récifale, atténuant ainsi de manière significative l'action des vagues (Kench et Brander, 2006 ; Monismith, 2007). Enfin, les herbiers de par leur canopée et la matrice sédimentaire développée vont réduire le débit et la profondeur de l'eau agissant directement sur l'énergie des vagues (Granata et al., 2001).

Les résultats associés aux modules herbiers ont montré les capacités les plus faibles dans la réduction de la submersion comparé aux mangroves et aux coraux, sûrement de part leur structure moins importante, et la plus faible partie de la colonne d'eau occupée. Cela est en adéquation avec ce que l'on observe en milieu naturel, où l'impact des herbiers marins sur l'atténuation de la submersion est plus faible que celui des récifs coralliens et des mangroves (Laigre, 2023).

Il est aussi intéressant de mettre en évidence la meilleure réduction de la submersion lors de l'association des modules écosystémiques observés. Cela a été le cas premièrement avec l'association entre deux écosystèmes rendant la submersion moins importante que pour les écosystèmes seuls. Ceci est confirmé par Alongi (2008) qui a souligné que la protection contre les tempêtes fournie par les mangroves sera renforcée par la présence d'habitats, tels que les récifs coralliens, les herbiers marins. D'autre part, d'après les résultats, l'atténuation des vagues serait optimale dans un milieu marin côtier présentant les trois écosystèmes réunis. Les mêmes résultats ont été observés Guannel et al. (2016) qui constatent qu'ensemble, les coraux vivants, les herbes marines et les mangroves fournissent plus de services de protection que n'importe quel habitat individuel ou n'importe quelle combinaison de deux habitats. De même, des simulations de modélisation

basées sur un paysage marin de récifs coralliens, d'herbiers marins et de mangroves dans les Caraïbes ont montré que le service de protection contre les tempêtes fourni par l'ensemble du paysage marin est plus important que pour chacun des trois habitats pris séparément (Sanchirico et Springborn, 2011).

La modélisation physique de ces écosystèmes semble ainsi bien représenter le rôle de chacun de ces écosystèmes dans la protection côtière. Cependant, il est important de rappeler que les résultats obtenus ne permettent pas d'émettre des conclusions précises, ne représentant pas les vraies conditions et proportions observées dans le milieu marin.

#### *4.2 Influence de l'état de santé*

La dégradation de l'état de santé des écosystèmes marins est une problématique d'actualité qui touche la quasi-totalité des mers et océans du globe. Il est donc important de pouvoir mettre en évidence dans cette étude la relation entre la submersion marine et les divers états de santé des écosystèmes étudiés.

Les résultats de cette étude mettent en évidence une diminution significative de la capacité à atténuer les vagues avec la baisse de l'état de santé des écosystèmes. La perte de densité de coraux, palétuviers ou densité foliaire au niveau des différents modules semble donc avoir un fort impact sur le rôle protecteur de ces écosystèmes. Cela a été montré en milieu naturel notamment par Sheppard et al. (2005) qui montrent comment la mortalité et la détérioration croissantes des récifs coralliens aux Seychelles ont considérablement augmenté l'énergie des vagues atteignant les côtes, alors que des récifs en bonne santé protègent normalement les côtes des ondes de tempête. Peterson et al (2002) ont démontré que la dégradation de l'habitat des herbiers marins augmente l'érosion et les risques de submersion. Pour les mangroves, une couverture végétale dense réduit la vitesse de l'eau, les flux turbulents, favorisant ainsi le dépôt des sédiments (Spalding et al., 2010). De plus, les racines elles-mêmes peuvent également constituer une barrière physique entre l'eau et le sol, en particulier dans les endroits où les systèmes racinaires s'étendent sous le niveau de marée basse (Gedan et al., 2011). Ainsi pour des mangroves dégradées avec une végétation moins dense, comme représenté sur les modules en moins bonne santé, on s'attend à avoir une sédimentation moindre et l'absence de racines ne permettant pas une atténuation optimale des vagues.

A partir de ces observations, le rôle protecteur de ces écosystèmes semble être de plus en plus compromis au vu des dégradations plus intenses et fréquentes que subissent ces écosystèmes. En effet, les mangroves ont montré une baisse de 30 à 50% de leur superficie au niveau global (Valiela et al., 2001) , 20% des récifs coralliens ont été irrémédiablement détruit dans le monde (Calvayrac et al., 2022) et près de 30 % des herbiers marins du globe ont d'ores et déjà disparu depuis la fin du XIXème siècle (Martin, 2021). Cela est d'autant plus préoccupant au vu du changement climatique responsable d'événements météorologiques extrêmes pouvant diminuer l'impact des écosystèmes marins dans l'atténuation des vagues.

#### *4.3 Impact du changements climatique*

Les tempêtes entraînent souvent des réponses morphologiques rapides et importantes au niveau du littoral, notamment la submersion de la plage (Gervais et al., 2012). Dans le cadre de cette étude, le scénario de vagues fortes associé à des conditions de fortes tempêtes a engendré une diminution de la capacité des différents modules à limiter la submersion. Cela semble logique car comme vu précédemment, la capacité des écosystèmes à réduire l'énergie des vagues est liée directement à la hauteur des vagues et la profondeur de l'eau, paramètres modifiés en conditions de tempêtes. Les vagues plus hautes associées à une houle plus importante ne permettent donc pas aux écosystèmes d'atténuer de manière efficace l'énergie engendrée. Guannel et al. (2016) ont de même constaté que les mangroves sont plus efficaces dans leur rôle de protection côtière en absence de conditions de tempêtes.

En ce qui concerne les herbiers, les modules ont montré les volumes d'eau submergés les plus importants, ainsi, des événements météorologiques extrêmes pourraient donc les rendre quasiment inefficaces dans le rôle étudié. En effet, il est démontré que l'augmentation des tempêtes peut entraîner des taux de changements trop rapides pour permettre aux herbiers de s'adapter et conserver leur fonction de défense côtière (Ondiviela et al., 2014).

Malheureusement, le contexte de changement climatique contribue à une augmentation de ces évènements climatiques extrêmes et donc une plus grande fréquence et intensité des inondations côtières (Vitousek et al., 2017). Outre ces évènements, une autre conséquence du changement climatique est l'élévation du

niveau de la mer qui entraîne la fonte des glaces et la dilatation thermique des océans, et enfin les mouvements géologiques verticaux des terres le long des zones côtières, qui peuvent accélérer la submersion des côtes de faible altitude. De ce fait, ce facteur est aussi à prendre en compte pour les années à venir, il aurait été intéressant de tester différentes configurations liées à des volumes d'eau différents mettant en scène l'élévation du niveau de la mer dans les années à venir.

## **5. Conclusion**

La conception de ce canal à houle a permis de modéliser physiquement la submersion côtière et d'évaluer le rôle des écosystèmes marins tropicaux (herbiers, coraux et mangroves) dans son atténuation. Toutefois, il convient de rappeler que les résultats obtenus ici restent une simplification du milieu naturel et doivent être interprétés avec précaution. Les résultats mettent en évidence des différences significatives dans cette capacité de protection, avec une atténuation plus efficace de l'énergie des vagues lorsque ces écosystèmes sont associés. Parmi eux, les mangroves et les récifs coralliens se distinguent comme les plus aptes à réduire l'impact de la submersion marine.

Cependant, la dégradation de leur état de santé entraîne une diminution de cette protection, ce qui accentue les risques d'inondations côtières. Avec les pressions anthropiques actuelles et l'augmentation des événements climatiques extrêmes, tels que les tempêtes et les fortes houles, la vulnérabilité des littoraux risque de s'aggraver dans les années à venir. Le scénario de vagues fortes étudié ici illustre bien comment ces conditions extrêmes pourraient amplifier les submersions marines et engendrer des dommages considérables sur les zones côtières. Face à ces enjeux, la gestion, la restauration et la protection des mangroves, des récifs coralliens et des herbiers apparaissent comme des priorités essentielles. Le développement de solutions fondées sur la nature permettrait de limiter les risques côtiers tout en préservant la biodiversité.

Enfin, au-delà de son aspect scientifique, ce canal à houle a été conçu comme un outil pédagogique et de sensibilisation, notamment à destination du jeune public. Il constitue un support efficace pour vulgariser les enjeux liés aux risques côtiers et à la préservation des écosystèmes marins.

## 6. Bibliographie

- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests : Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Amma, P. K. G., & Bhaskaran, P. K. (2020). Role of mangroves in wind-wave climate modeling – A review. *Journal of Coastal Conservation*, 24(2), 21.  
<https://doi.org/10.1007/s11852-020-00740-0>
- Battjes, J. A., & Stive, M. J. F. (s. d.). *Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves*. <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p09159>
- Beck, M. W., Losada, I. J., Menéndez, P., Reguero, B. G., Díaz-Simal, P., & Fernández, F. (2018). The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, 9(1), 2186. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z>
- Calvayrac, C., Gonzalez, J.-L., Minier, C., Togola, A., Vasseur, P., Burga, K., Kennouche, P., Lecoq, P., Multon, R., Catastini, C., Gilson, A., Kerkhof, O., Mathieu-Huart, A., Mateus, A., Michel, C., & Paoletti, G. (2022). *Évaluation des risques des substances chimiques pour les récifs coralliens* (p. 158 p.) [Report, Anses]. <https://anses.hal.science/anses-04244553>
- Duphil, M. (2024). *Le rôle protecteur des écosystèmes (récifs et mangroves) face au risque de submersion côtière lors d'évènements extrêmes en Nouvelle Calédonie* [These de doctorat, Sorbonne université]. <https://theses.fr/2024SORUS508>
- Duvat, V. (2015). Changement climatique et risques côtiers dans les îles tropicales. *Annales de géographie*, 705(5), 541-566. <https://doi.org/10.3917/ag.705.0541>
- Ferrario, F., Beck, M. W., Storlazzi, C. D., Micheli, F., Shepard, C. C., & Airoidi, L. (2014). The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5(1), 3794. <https://doi.org/10.1038/ncomms4794>
- Furukawa, K., Wolanski, E., & Mueller, H. (1997). Currents and Sediment Transport in Mangrove Forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3), 301-310.  
<https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0120>
- Gedan, K. B., Kirwan, M. L., Wolanski, E., Barbier, E. B., & Silliman, B. R. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines : Answering recent

- challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7-29.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7>
- Gervais, M., Balouin, Y., & Belon, R. (2012). Morphological response and coastal dynamics associated with major storm events along the Gulf of Lions Coastline, France. *Geomorphology*, 143-144, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.035>
- Granata, T. C., Serra, T., Colomer, J., Casamitjana, X., Duarte, C. M., & Garcia, E. (2001). Flow and particle distributions in a nearshore seagrass meadow before and after a storm. *Marine Ecology Progress Series*, 218, 95-106. <https://doi.org/10.3354/meps218095>
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P., & Verutes, G. (2016). The Power of Three : Coral Reefs, Seagrasses and Mangroves Protect Coastal Regions and Increase Their Resilience. *PLOS ONE*, 11(7), e0158094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>
- Guo, Y., Chen, Y., Liao, B., Huang, B., Wu, F., & Jiang, Z. (2020). The Effect of Vegetation on Surface Elevation in Coastal Mangrove Areas. *Journal of Coastal Research*, 36(3), 600-607. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00124.1>
- Huang, Z., Yao, Y., Sim, S. Y., & Yao, Y. (2011). Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation. *Ocean Engineering*, 38(10), 1080-1088. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.03.003>
- Hydrodynamics of Coral Reefs | Annual Reviews*. (s. d.). Consulté 24 mars 2025, à l'adresse <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092125>
- Irtem, E., Gedik, N., Kabdasli, M. S., & Yasa, N. E. (2009). Coastal forest effects on tsunami run-up heights. *Ocean Engineering*, 36(3), 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.11.007>
- Ismail, I., Husain, M. L., Satyanarayana, B., Ibrahim, S., & Zakaria, R. (2019). ROOT DENSITY ANALYSIS AND WAVE ATTENUATION ABILITY OF RHIZOPHORA SPECIES AT KEMAMAN, TERENGGANU. *Earth Science Malaysia*, 18-24. <https://doi.org/10.26480/esmy.01.2019.18.24>
- Kench, P. S., & Brander, R. W. (2006). Wave Processes on Coral Reef Flats : Implications for Reef Geomorphology Using Australian Case Studies. *Journal of Coastal Research*, 22(1 (221)), 209-223. <https://doi.org/10.2112/05A-0016.1>

- Lacoste, J.-P. (2024). Changement climatique, érosion côtière et enjeux politiques sur le littoral français métropolitain. *Hérodote*, 194(3), 101-113. <https://doi.org/10.3917/her.194.0101>
- Laigre, T. (2023). *COASTAL ECOSYSTEMS'ROLE IN STORM IMPACT MITIGATION IN A CARIBBEAN CONTEXT* (Doctoral dissertation, The University of the West Indies).
- Le Cozannet, G., Garcin, M., Yates, M., Idier, D., & Meyssignac, B. (2014). Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. *Earth-Science Reviews*, 138, 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.005>
- Martin, S. (2020). *Les territoires coralliens d'outre-mer*.
- Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2016). Solitary wave attenuation by vegetation patches. *Advances in Water Resources*, 98, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.021>
- Menéndez, P., Losada, I. J., Torres-Ortega, S., Narayan, S., & Beck, M. W. (2020). The Global Flood Protection Benefits of Mangroves. *Scientific Reports*, 10(1), 4404. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6>
- Monismith, S. G. (2007). Hydrodynamics of Coral Reefs. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 39(Volume 39, 2007), 37-55. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092125>
- Mulot, V., Vigneron, A.-L., & Lambert-Hadid, M.-L. (2010). Le littoral face aux changements climatiques. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean geography*, 115, Article 115. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.5264>
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., Van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J. N., Ingram, J. C., Lange, G.-M., & Burks-Copes, K. A. (2016). The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defences. *PLOS ONE*, 11(5), e0154735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154735>
- Nurse, L. A., Mclean, R. F., Agard, J., Briguglio, L. P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., Tompkins, E., & Webb, A. (2014). Small islands. In Barros, V.R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & and L. L. White (eds.) (Éds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 1613-1654). Cambridge University Press.  
<https://hal.science/hal-01090732>
- Ondiviela, B., Losada, I. J., Lara, J. L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T. J., & van Belzen, J. (2014). The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.11.005>
- Peterson, C. H., Jr, R. A. L., Micheli, F., & Skilleter, G. A. (2004). Attenuation of water flow inside seagrass canopies of differing structure. *Marine Ecology Progress Series*, 268, 81-92.  
<https://doi.org/10.3354/meps268081>
- Rulleau, B., Rey-Valette, H., Flanquart, H., Hellequin, A.-P., & Meur-Ferec, C. (2015). Perception des risques de submersion marine et capacité d'adaptation des populations littorales. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 21*, Article Hors-série 21. <https://doi.org/10.4000/vertigo.15811>
- Sanchirico, J. N., & Springborn, M. (2011). How to Get There From Here : Ecological and Economic Dynamics of Ecosystem Service Provision. *Environmental and Resource Economics*, 48(2), 243-267. <https://doi.org/10.1007/s10640-010-9410-5>
- Sheppard, C., Dixon, D. J., Gourlay, M., Sheppard, A., & Payet, R. (2005). Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats : Examples from the Seychelles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2), 223-234.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.02.016>
- Spalding, M., Kainuma, M., & Collins, L. (2010). *World Atlas of Mangroves*. Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9781849776608>
- Storlazzi, C. D., Gingerich, S. B., Van Dongeren, A., Cheriton, O. M., Swarzenski, P. W., Quataert, E., Voss, C. I., Field, D. W., Annamalai, H., Piniak, G. A., & McCall, R. (2018). Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding. *Science Advances*, 4(4), eaap9741.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9741>
- Tognin, D., Peruzzo, P., De Serio, F., Ben Meftah, M., Carniello, L., Defina, A., & Mossa, M. (2019). Experimental Setup and Measuring System to Study Solitary Wave Interaction with Rigid Emergent Vegetation. *Sensors*, 19(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/s19081787>

Valiela, I., Bowen, J. L., & York, J. K. (2001). Mangrove Forests : One of the World's Threatened Major Tropical Environments: At least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments. *BioScience*, 51(10), 807-815.

[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0807:MFOOTW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0807:MFOOTW]2.0.CO;2)

Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., & Storlazzi, C. D. (2017).

Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific*

*Reports*, 7(1), 1399. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7>

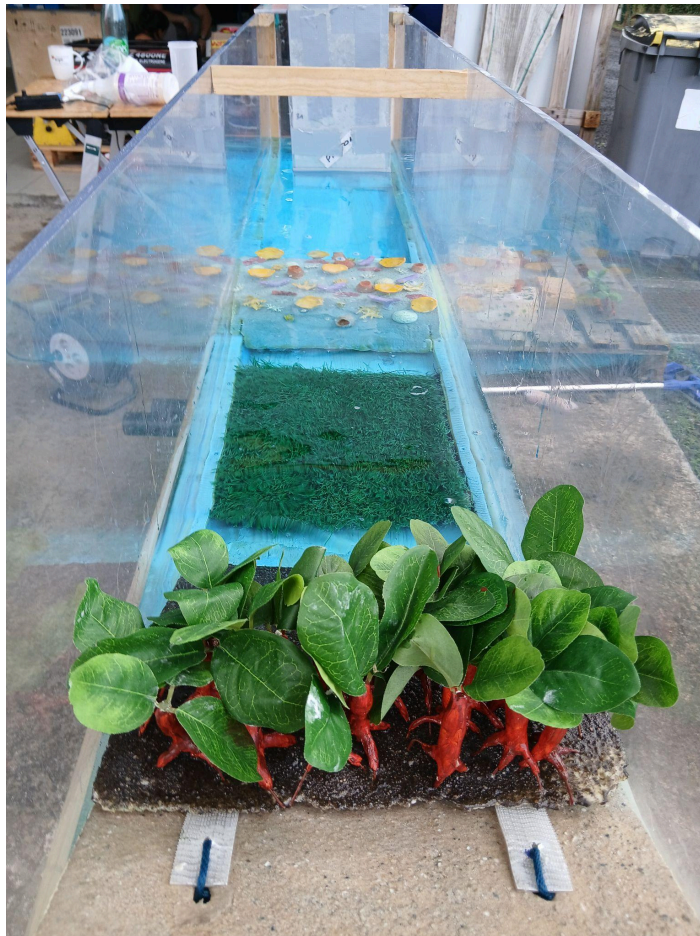
## 7. Annexes



Annexe 1 : Modules de chaque écosystème “Mangroves”, “Coraux” et “Herbiers” dans les états de santé bon (3), moyen (2) et mauvais (1).



*Annexe 2 : Module “Plage” utilisé pour les tests témoins de submersion.*



*Annexe 3: Canal à houle représentant les écosystèmes d'herbiers de récifs coralliens et mangroves en bon état de santé.*

Annexe 4 : Tableau des configurations d'écosystèmes étudiés pour la submersion et états de santé associés, bon (1), moyen (2) et mauvais (3).

Ecosysteme	Etat_sante
Plage	1
Coraux	3
Coraux	2
Coraux	1
Herbiers	3
Herbiers	2
Herbiers	1
Mangroves	3
Mangroves	2
Mangroves	1
Mangrove + Coraux	3
Mangrove + Coraux	2
Mangrove + Coraux	1
Mangrove + Herbier	3
Mangrove + Herbier	2
Mangrove + Herbier	1
Herbiers + Coraux	3
Herbiers + Coraux	2
Herbiers + Coraux	1
Complet	3
Complet	2
Complet	1