

Dispositif anti-embruns pour voie ferrée (Bages Sigean, France)

Rapport final



Dispositif anti-embruns pour voie ferrée (Bages Sigean, France)

Rapport final

Frédéric Bouchette



En bref...

Ce document est une présentation synthétique des travaux du groupe GLADYS avec la SNCF sur le tronçon de voie ferrée longeant la lagune de Bages-Sigean (Occitanie, France). Ces travaux visaient à penser une solution R&D aux problèmes de corrosion de la voie et aux incidents de signalisation. Le rapport montre quels sont les processus susceptibles de contrôler la corrosion et les incidents, en pointant le fait qu'il existe une certaine incertitude sur les mécanismes en jeu, et donc qu'il a fallu envisager une stratégie large, incluant plusieurs hypothèses. La stratégie de création et de dimensionnement de la solution est exposée. Les résultats de ce travail sont ensuite présentés sous la forme d'une famille de solutions, ainsi que sous la forme d'ajustements à considérer du fait des contraintes logistiques, matérielles et administratives sur le projet. Le rapport ayant été rédigé post-projet GLADYS/SNCF, et à un moment où un groupement d'entreprise a été constitué pour réaliser le prototype, les contenus sont ajustés pour répondre au mieux aux attentes de ce nouveau partenariat ; le rapport tient également compte de l'évolution des besoins/questions formulées par la SNCF.

Merci de citer ce document avec la référence suivante :

Bouchette, F. (2023). *Dispositif anti-embruns pour voie ferrée (Bages Sigean, France). Rapport final*. GLADYS report n° 32, Gladys Beach Institute, Université de Montpellier, pp 88.

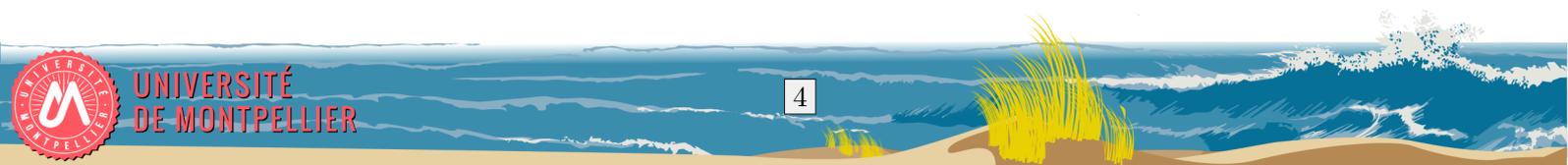


Table des matières

Introduction	9
1 Caractérisation du problème et identification des mécanismes de contrôle	11
1 Le constat de terrain	11
2 Processus physiques à l'origine de la corrosion et des incidents électriques	12
2.1 Constat général	12
2.2 Les mécanismes élémentaires candidats	14
2.3 Stratégie pour le traitement de la problématique	17
2 Exploration des solutions possibles et formulation des contraintes	18
1 Exploration décomplexée des solutions	18
1.1 Le tunnel végétal	18
1.2 Implantation de géotextile sous la voie	19
1.3 Traitement anti-corrosion de la voie	20
1.4 Modification de l'écosystème proche du talus	20
1.5 Paroi artificielle	21
1.6 Élargissement du talus de voie et implantation de haies	22
1.7 Surélévation de la voie	22
1.8 Barrage poids en béton, digues ou solutions mécaniques de protection basse de la voie	23
2 Contraintes réglementaires, techniques & acceptabilité	24
2.1 Les contraintes réglementaires environnementales	24
2.2 Les limitations techniques et réglementaires liées à la voie	25
2.3 Acceptabilité globale des solutions décomplexées proposées	25
3 Vers une famille de solutions acceptables et techniquement faisables	26
3.1 Barrière anti-diffusion	26
3.2 Filet à embruns	26
3.3 Talus revégétalisé ou repli sur solution traditionnelle barrante	27
3.4 Dispositif SfN/ biomimétique de contrôle de l'hydraulique lagunaire	28
4 La solution retenue pour la mise en place d'un pre-prototype opérationnel	29
4.1 L'émergence du pre-prototype	29
4.2 Bilan intermédiaire sur le pré-prototype retenu	31
3 Récapitulatif des travaux de mesure et de modélisation numérique	32
1 Activités en lien avec le suivi morphodynamique	32
2 Activités en lien avec la simulation numérique	34
2.1 Simulation numérique de la circulation locale et des vagues par modèle spectral	34
2.2 Autres efforts exploratoires de simulation numérique	34





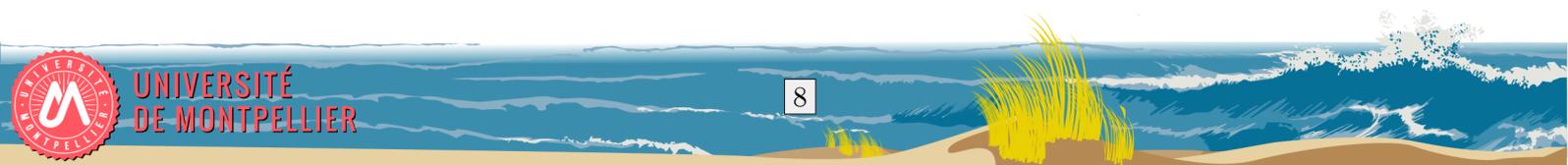
3	Génération des séries synthétiques sous scénario et production de quantités physiques représentatives (vagues, niveaux)	36
4	Activités en lien avec la mesure hydraulique	37
4	Stratégie de dimensionnement et mise en oeuvre à Bages-Sigean	41
1	Reformulation hydro-morphodynamique du problème	41
2	Identification d'une famille de solutions raisonnables	42
2.1	Les concepts de module, matériaux et forêt	42
2.2	Les services hydro-sédimentaires rendus par les modules et forêts	43
2.3	Services hydro-sédimentaires et forêts retenus pour Bages-Sigean	45
2.4	Service hydro-sédimentaire secondaire opportuniste en appui	45
3	Méthode de dimensionnement optimal	46
3.1	Le principe	46
3.2	Démarche précisée pour la problématique Bages-Sigean	47
4	Mise en oeuvre sur Bages-Sigean	49
5	La solution de protection de la voie ferrée contre la corrosion et les incidents	51
1	Résultats du dimensionnement	51
2	Recommandations pour l'élaboration d'une phase opérationnelle	52
2.1	Sur la conception et la mise en oeuvre d'un prototype opérationnel	52
2.2	Mise en place d'un suivi sur le territoire d'expérimentation	52
2.3	Instrumentation du prototype potentiellement déployé	53
	Références	55
A	Méthodologie pour la production de synthétiques	58
1	Niveau d'eau à la côte	59
1.1	Définitions	59
1.2	Forçage en niveau d'eau de la zone littorale	59
1.3	Formulation du forçage en niveau d'eau	60
2	Calcul des conditions météo-marines et des niveaux projet	61
2.1	Choix des scénarios prospectifs pour les états de mer projet	61
2.2	Calcul des $\delta\eta_i$	61
	Contribution climatique $\delta\eta_c$	61
	Contribution de la marée $\delta\eta_t$	61
	Contribution des vagues $\delta\eta_w$	62
	Contribution du vent $\delta\eta_v$	62
	Contribution de la pression atmosphérique $\delta\eta_a$	63
	Contribution de l'IG $\delta\eta_a$	63
3	Construction de séries temporelles synthétiques	63
3.1	Notion de synthétique	63
3.2	Construction d'évènement extrême / tempête	64
3.3	Résultats	64
B	Présentation du modèle de propagation de l'action des vagues	72
1	Lois fondamentales contrôlant le modèle	72
2	Croissance des vagues	74
3	Dissipation par moutonnement	75
4	Dissipation par déferlement géométrique	76
5	Dissipation par friction au fond	76
6	Prise en compte des effets non-linéaires	77





7	Conditions aux limites	77
C	Rappel historique sur le dimensionnement optimal et ses développements vers la morphodynamique de plage	79
1	Optimisation sur des structures de protection du littoral	80
1.1	Forme optimale de structures	80
1.2	Port de la Turballe	81
2	Optimisation d'emplacements de structures de protection littorale	82
2.1	Position de structure de protection optimale à la pointe de l'Espiguette	82
2.2	Position optimale de géotube	84
3	Vers la modélisation de l'hydro-morphodynamisme par optimisation	84
3.1	Modèles hydro-morphodynamiques 2D basés sur les équations de Saint-Venant	84
3.2	Modèles hydro-morphodynamique 1D basés sur la minimisation d'énergie	85
	Modèle hydrodynamique	85
	Modèle basé sur l'optimisation de l'énergie des vagues	85
	Applications avec Optimorph	86





Introduction

La lagune de Bages-Sigean (Occitanie, France) est traversée par une ligne ferroviaire SNCF réseau hautement fréquentée (ligne France/ Espagne) et soumise à des contraintes météo-marines sévères du fait de la proximité de la voie avec une étendue d'eau salée majeure connectée à la mer, dans une zone particulièrement venteuse (Figure 1). La SNCF a observé sur un tronçon de 20 km des phénomènes de corrosion anormalement intensifs de la voie, des caténaires et de l'ensemble du dispositif, ainsi qu'un nombre d'incidents de type électrique anormalement élevé. Ces observations sont évidemment reliées au fait que la voie passe dans un environnement souvent humide, soumis aux embruns maritimes, et est même directement exposée aux projections de vagues, sans qu'on puisse clairement déterminer les causes exactes des problèmes constatés. A plus long-terme, la voie est clairement menacée par les effets du changement global, en tout premier lieu l'augmentation progressive du niveau d'eau moyen et la recrudescence des événements tempétueux (forts vents, basses pressions) en contexte méditerranéen.

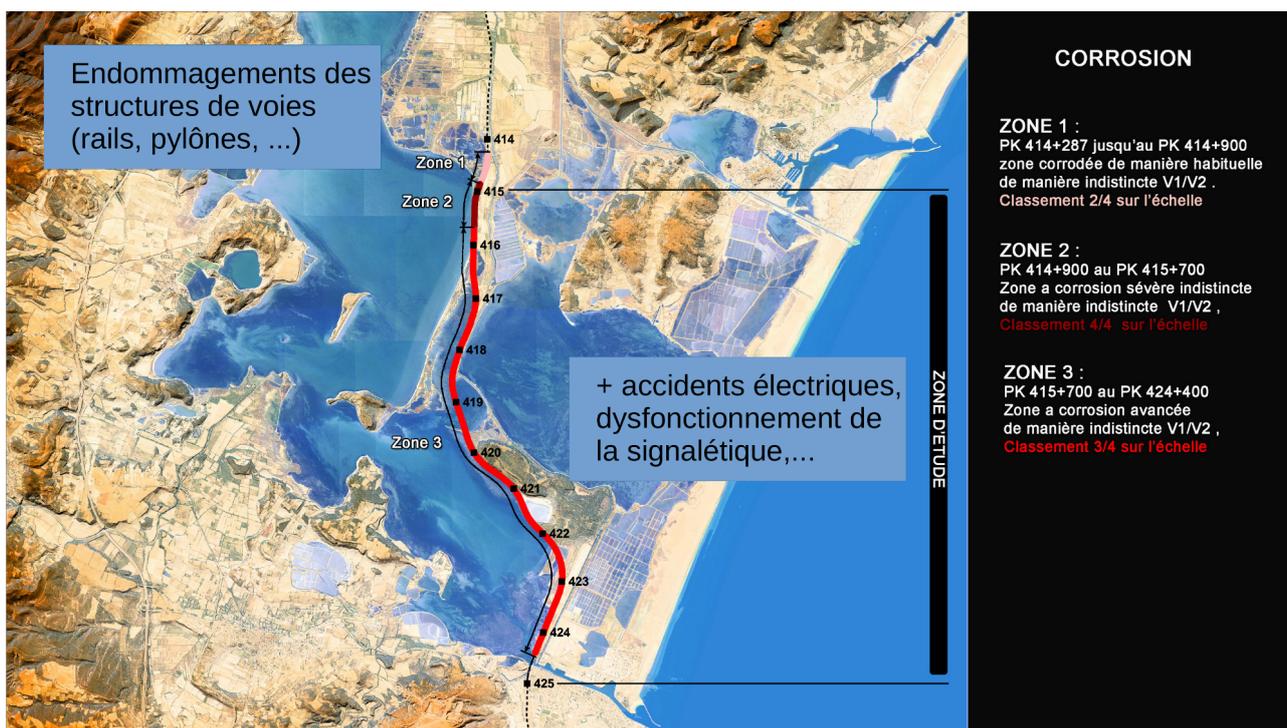


FIGURE 1 : Le site d'étude se situe dans la lagune de Bages-Sigean, sur la bordure Sud-Est là où la voie est à proximité immédiate du plan d'eau et exposée quasi continuellement aux vents dominants. Carte initialement fournie par l'étude de ECOTONE à l'amont du projet Gladys.

Dans ce contexte, le projet restitué dans ce document a pour ambition a) d'identifier les phénomènes à l'origine des problèmes de corrosion et des incidents de voie, b) de définir un ensemble de solutions permettant de maîtriser ces mécanismes et anticiper sur l'avenir de la voie à différentes échelles de

temps, et c) à partir de ces solutions, de dimensionner et proposer UNE solution pré-opérationnelle qui pourrait être testée grandeur nature sur le site d'étude. Les travaux menés pour atteindre ces objectifs sont organisés comme indiqués dans la figure 2.

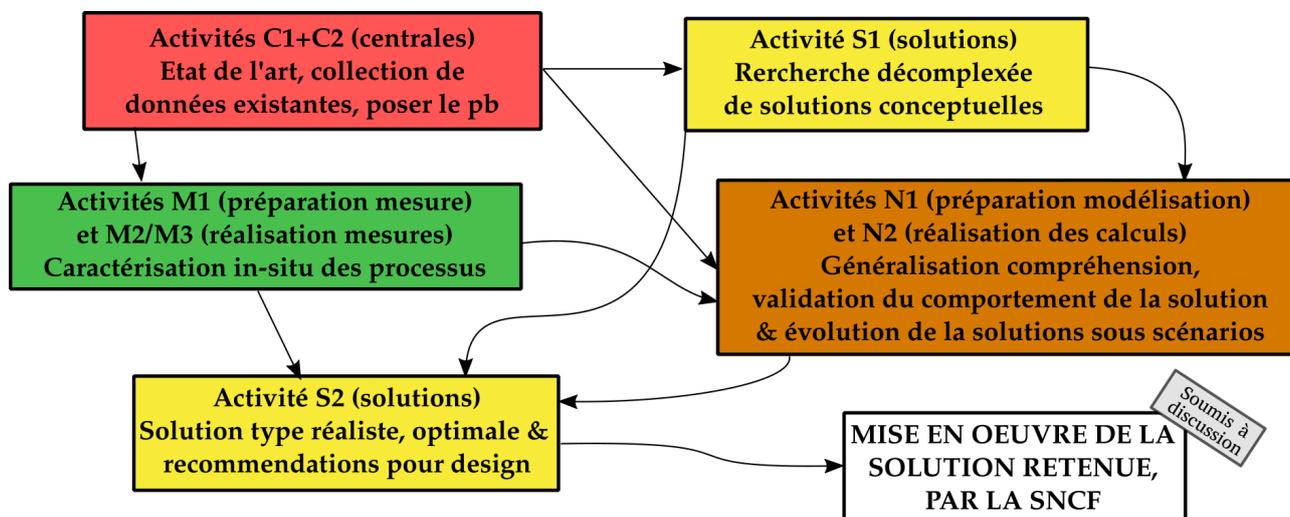


FIGURE 2 : Organisation des activités dans le cadre du projet décrit dans ce document. Cette figure est directement issue du contrat partenarial entre SNCF et GLADYS, et à ce titre représente le cadre dans lequel Gladys a travaillé. Les activités de type C1, C2 sont rapportées dans le chapitre 1. Les activités de type S1 et S2 sont présentées dans le chapitre 4. Les activités M1, M2 et M3 ainsi que les N1 et N2 sont regroupées dans le chapitre 3 et dans des annexes.

En pratique, la restitution du projet et de ses résultats est organisée sous la forme d'une série de chapitres portant respectivement sur : a) la caractérisation du problème et l'identification des mécanismes de contrôle de la corrosion et des incidents de voie, b) un résumé de la démarche mise en oeuvre pour définir les familles de solutions éligibles tant du point de vue de la réglementation, de l'acceptabilité que de la faisabilité technique et de leur pertinence en terme de service rendu, c) un récapitulatif des travaux réalisés en terme de mesure et modélisation avec des reports en annexe pour des contenus plus détaillés, non essentiels à la compréhension de l'ensemble de la démarche, d) une introduction simplifiée aux principes de dimensionnement assisté mis en oeuvre pour ce projet et e) un présentation du pre-prototype finalement retenu à partir duquel la SNCF et des opérateurs privés pourraient construire une première solution opérationnelle à tester en grandeur nature.

Il est important de rappeler que ce rapport est une restitution finale de projet, à destination d'un lectorat large, et ne reprend pas tous les détails ni les travaux réalisés. Ces travaux se sont étendus sur la période officielle de 3 ans, étendue à presque 6 ans du fait de la crise Covid, des échanges entre les parties pour converger vers une solution acceptable par tous, et des évolutions successives dans la définition même du rôle de la solution.

Chapitre 1

Caractérisation du problème et identification des mécanismes de contrôle

1 Le constat de terrain

Entre les PK (Point Kilométrique) 415 à 425 (Figure 1), et plus particulièrement entre les PK 415 et 416, la SNCF a recensé de nombreux problèmes de corrosion rapide (une usure visible en moins de 2 ans avant de devoir changer certains caténaires ou tronçons de rails) et un nombre d'incidents de voie plus important qu'ailleurs sur le réseau, se déroulant systématiquement en marge des événements météo-marins ayant tendance à agiter la lagune de Bages-Sigean.



FIGURE 1.1 : *Haut* – Gauche : endommagement d'ouvrages traditionnels de protection ; centre : discontinuité dans l'ouvrage censé contrôler le franchissement ; droite : corrosion accrue des caténaires. Cette corrosion est différentielle (plus haut sur le caténaire opposé à l'étang). *Bas* – Gauche : dimensionnement d'ouvrage aberrant pour lutter contre le franchissement ; centre : corrosion sur écou et rails.

Les figures 1.1 et 1.2 montrent quelques exemples de tels défauts. Ces figures indiquent aussi que des initiatives ont été menées pour prévenir ces problèmes. Toutefois, on doit faire le double constat

suivant : a) les solutions déployées jusqu'à présent reposent sur du génie civil strict, sans aucune prise en compte du caractère maritime de la zone, qui devrait impliquer un design particulier des solutions, en particulier dans leur capacité à contrôler le franchissement des vagues et la submersion, et b) la réponse au problème est strictement locale, c'est à dire qu'elle est imaginée au niveau de la voie à l'exclusion de tout prolongement vers la lagune.



FIGURE 1.2 : Exemple de protection non adaptée (mur vertical face aux vagues) et endommagement consécutif à la non prise en compte de la surcôte en condition de tempête, des contraintes horizontales exercées par les vagues, et l'effet de sape des vagues en pied d'ouvrage par haut niveau.

Les incidents électriques recensés et la corrosion n'ont pas fait l'objet d'un suivi quantitatif précis par la SNCF, malgré la demande expresse du partenariat au démarrage du projet. Ceci s'explique par le fait qu'un tel suivi est difficile pour des questions de ressource humaine et de capacité à définir des grandeurs objectives permettant de mesurer l'état de corrosion ; la corrosion est un phénomène lent s'exprimant sur le moyen terme et qui se manifeste bien après l'événement météo-marin potentiellement moteur du phénomène. Il est donc difficile d'établir une corrélation directe entre événement météorologique et augmentation de l'état de corrosion d'un système.

Toutefois, il a été constaté par la SNCF que les incidents électriques (dysfonctionnement du passage à niveau, dysfonctionnement des signalétiques) sont approximativement 10 fois plus nombreux sur la zone d'étude que sur d'autres portions classiques de la même voie, et que ces incidents se concentrent sur des périodes où les conditions météo-marines sont mauvaises (vent fort, haut niveau, embruns). Associée à l'évidence d'une corrosion très forte des caténaires, de la visserie et des rails eux-même, il a semblé évident à toutes les parties que le fait que la voie passe au milieu d'une lagune salée devait être la raison de cette exposition particulière. Un premier objectif a donc été de recenser et bien comprendre les processus physiques susceptibles de causer la corrosion et les incidents électriques.

2 Processus physiques à l'origine de la corrosion et des incidents électriques

2.1 Constat général

La voie SNCF traversant la lagune de Bages-Sigean est une fine ligne de terre située à 1.5 m d'altitude au dessus du plan d'eau moyen, et directement exposée à une étendue salée de quelques 10 km dans sa plus grande longueur, et près de 4 km directement devant la zone la plus exposée entre PK415 et PK416. La lagune a une profondeur faible (métrique) à peu près partout. Selon les classifications établies, le système de Bages-Sigean est donc clairement un *Wind-driven Water body* [WWB; NUTZ et al., 2018] dont l'indice I_{WWB} est autour de 4000, ce qui en fait un système très clairement dominé



par les vagues de vent.

Un tel système lagunaire peu profond exposé aux vents développe très rapidement une mer de vent saturée, c'est à dire des vagues dont la croissance (hauteur et longueur d'onde) est limitée par la profondeur d'eau. Ainsi, quand le vent souffle sur la lagune de Bages-Sigean, on observe assez vite la mise en place de vagues courtes et raides, atteignant une hauteur maximale de l'ordre de quelques décimètres. Cette surface rugueuse est en plus exposée à des efforts horizontaux très importants dus à des vents qui peuvent largement dépasser les 100 km/h . Cette situation (rugosité de la surface, fort cisaillement) favorise l'arrachement de particules liquides depuis la surface de l'eau vers l'air formant des aérosols chargés en sels. Ces aérosols sont ensuite transportés latéralement sans effort sur des distances kilométriques.

Au delà des entrées maritimes méditerranéennes, les vents dominants sur la zone sont de type Tramontane (localement appelé Cers), orientés vers l'Est à Sud-Est, c'est à dire globalement face à la voie ferrée. Le fetch (distance d'application du vent sur le plan d'eau) d'approximativement 4 km permet de lever des vagues et pousser des masses d'eau vers les bords de la lagune, en particulier vers la voie ferrée vu sa position par rapport au forçage dominant (Figure 1). Il en résulte une accumulation d'eau contre l'ouvrage ferroviaire, et une montée progressive du niveau moyen lors des événements tempétueux. Cette augmentation du niveau est accentuée par la présence de vagues, d'ondes longues dont les ondes infra-gravitaires, d'éventuelles ondes de bord, et bien sur par la surcôte barométrique (correspondant à l'élévation du plan d'eau en contexte de basse pression atmosphérique). La combinaison de toutes ces contributions définit une surcôte qui peut être significative en contexte tempétueux dépressionnaire, ramenant le niveau d'eau à quelques dizaines de centimètres sous le talus de voie ferrée.

A proximité de l'ouvrage ferroviaire, les vagues s'imposent contre le talus et se transforment en lames d'eau projetées contre et éventuellement au dessus de l'ouvrage. La forme de l'ouvrage contrôle le franchissement, c'est à dire la bascule d'eau salée directement sur la voie. Dans l'actuel la SNCF n'a jamais observé d'ennuiement de la voie. C'est un processus qui est par contre tout à fait envisageable du fait de la tendance à l'augmentation progressive du niveau d'eau moyen de la Méditerranée (actuellement autour de 3.5 mm.an^{-1}).

Dans le même temps, les aérosols transportés par le vent montent progressivement dans la colonne d'air lors de leur transport à la surface de la lagune. A l'arrivée contre l'ouvrage ferroviaire, la forme de celui-ci contrôle leur déviation sous la forme d'un jet accéléré ascendant contre le talus de voie. De cette manière, les aérosols peuvent passer au dessus du talus, pour venir impacter les rails et les caténaires. La forme du talus de voie peut contrôler la manière dont ce jet salé s'exprime au dessus de la voie. On note d'ailleurs que les poteaux le long de la voie sont clairement érodés plus haut du côté opposé à la lagune, justifiant l'existence d'un jet local ascendant dans le sens du vent dominant (Cers).

Dans un tel contexte, on utilise le terme embruns pour désigner à la fois les aérosols produits sur la lagune qui sont amenés par le vent sur l'ouvrage ferroviaire, et ceux qui sont directement produits en pieds d'ouvrage par le vent interagissant avec les vagues atterrissant contre l'ouvrage et immédiatement lancés sur l'ouvrage.

Enfin, les vagues et les niveaux d'eau moyens anormalement élevés appliquent une pression (et une sur-contrainte horizontale) sur le talus de voie qui favorisent l'advection/diffusion de flux chargés en sel au sein même du talus, et également de potentielles remontées capillaires sous la voie chargées en sel. On ne peut exclure que ces mécanismes soient à l'origine d'une partie de la corrosion au niveau du sol sur la voie.



2.2 Les mécanismes élémentaires candidats

Dans un tel contexte, on choisit de classer les impacts météo-marins sur l'infrastructure SNCF en 5 mécanismes élémentaires distincts, regroupés sur la figure 1.3. On nomme ces mécanismes **brouillard salé**, **embruns**, **surcôte** et **niveau moyen**, **franchissement** et **remontées salées**. Ce ne sont pas des mécanismes indépendants au sens où certains peuvent partiellement contrôler les effets d'autres. Mais on a choisi ce découpage car a) il permet de présenter plus loin les solutions contre la corrosion et les incidents de voie d'une manière naturelle et b) ils relèvent de principes physiques très différents. Dans la suite, on présente ces mécanismes et on évoque les blocages conceptuels les plus importants dans la compréhension et la quantification de ces mécanismes, pour pouvoir penser des solutions raisonnables vis à vis de l'état des connaissances.

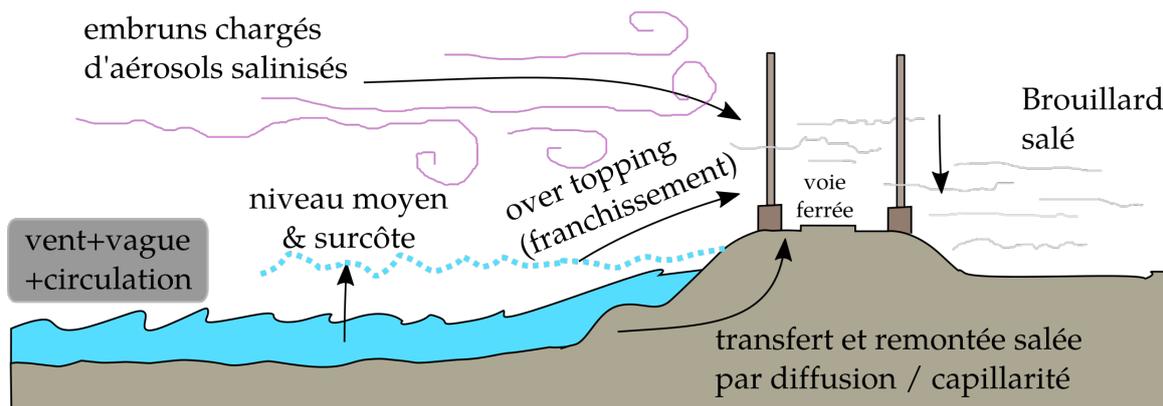


FIGURE 1.3 : La manière retenue de classer les mécanismes potentiels à l'origine de la corrosion et des incidents de voie sur le site d'étude de la SNCF. On distingue : a) le brouillard salé, b) les embruns chargés d'aérosols salinisés, c) le franchissement direct d'eau de la lagune vers la voie, d) l'élévation du niveau moyen et la surcôte, et e) les remontées capillaires sous le talus de voie.

Les **embruns lagunaires salés** désignent des aérosols marins enlevés par le vent à la crête des vagues (ou plus généralement à l'interface eau/air) et également formés par l'arrachement de gouttelettes lors de la projection des vagues sur l'ouvrage. Lorsque le vent souffle sur la lagune, il produit des instabilités de la surface appelées ondes capillaires qui se développent progressivement en rides puis en vagues de mer de vent (vagues dont les propriétés sont directement liées aux caractéristiques du vent local). En contexte de faible profondeur comme dans la lagune de Bages-Sigean, il est impossible de développer des vagues très longues et on parle rapidement de mer saturée au sens où la hauteur et la longueur d'onde des vagues obtenues restent bornées. Ces instabilités de la surface généralement assez raides favorisent l'arrachement de particules d'eau salée embarquées dans la circulation atmosphérique. Les particules sont ensuite déplacées vers et déposées au niveau de la voie et des caténaires où les sels peuvent participer à la corrosion. Les mécanismes de croissance des vagues sont très bien décrits en profondeur infinie, mais à ce jour, il n'existe pas de formalisme opérationnel pour la description de la croissance des vagues en faible profondeur d'eau. Les travaux les plus récents sont ceux de Montalvo et al. et Kern et al. () et restent relativement théoriques. Certains travaux se sont intéressés à la caractérisation de la croissance des vagues en faible profondeur à partir d'observation, mais sans que personne ne soit capable à ce jour d'écrire un nouveau formalisme exact. Il reste donc difficile d'exprimer proprement la production d'aérosols dans un contexte lagunaire sans mesure.

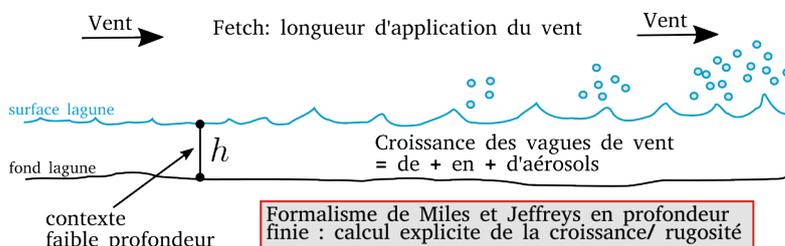


FIGURE 1.4 : Principe de formation des **embruns lagunaires salés**, des aérosols formés par le cisaillement du au vent fort observé sur le site et dont la production est renforcée par la présence de la mer de vent.

Les **embruns lagunaires salés** désignent des aérosols marins enlevés par le vent à la crête des vagues (ou plus généralement à l'interface eau/air) et également formés par l'arrachement de gouttelettes lors de la projection des vagues sur l'ouvrage. Lorsque le vent souffle sur la lagune, il produit des instabilités de la surface appelées ondes capillaires qui se développent progressivement en rides puis en vagues de mer de vent (vagues dont les propriétés sont directement liées aux caractéristiques du vent local). En contexte de faible profondeur comme dans la lagune de Bages-Sigean, il est impossible de développer des vagues très longues et on parle rapidement de mer saturée au sens où la hauteur et la longueur d'onde des vagues obtenues restent bornées. Ces instabilités de la surface généralement assez raides favorisent l'arrachement de particules d'eau salée embarquées dans la circulation atmosphérique. Les particules sont ensuite déplacées vers et déposées au niveau de la voie et des caténaires où les sels peuvent participer à la corrosion. Les mécanismes de croissance des vagues sont très bien décrits en profondeur infinie, mais à ce jour, il n'existe pas de formalisme opérationnel pour la description de la croissance des vagues en faible profondeur d'eau. Les travaux les plus récents sont ceux de Montalvo et al. et Kern et al. () et restent relativement théoriques. Certains travaux se sont intéressés à la caractérisation de la croissance des vagues en faible profondeur à partir d'observation, mais sans que personne ne soit capable à ce jour d'écrire un nouveau formalisme exact. Il reste donc difficile d'exprimer proprement la production d'aérosols dans un contexte lagunaire sans mesure.

La **surcôte** et le **niveau moyen** sont les grandeurs permettant de caractériser l'évolution de l'altitude du plan d'eau au cours du temps. La notion de niveau moyen est ambiguë. Sur des échelles de temps annuelles, elle désigne la position du plan d'eau au repos, évoluant lentement en fonction du changement global. La vitesse actuelle d'évolution de ce niveau moyen long terme est de l'ordre de 3.5 mm.an^{-1} , avec une tendance à l'accélération avérée depuis 20 ans (mesures par satellite fiables). En terme de projection, ce niveau moyen peut augmenter de

plusieurs décimètres sous quelques dizaines d'années, avec certains scénarios le plaçant à près de 1 m au dessus du niveau actuel avant 2100. Aux échelles de temps saisonnières à événementielles, le niveau moyen est caractérisé par la superposition des effets de processus hydrauliques divers (marée, pression atmosphérique, vagues, vent, ondes de bord, ondes longues, etc). Le vent pousse l'eau vers le bord, où elle s'accumule, avec une augmentation consécutive du niveau. Les vagues ont une capacité de transport de masse (dans le sens de leur propagation) qui induit un déplacement d'eau et donc – comme pour le vent – une augmentation consécutive du niveau. La pression atmosphérique déforme la surface des mer (et des lagunes) et induit des variations du niveau. Les marées sont des ondes très longues évidemment à l'origine de la modulation cyclique du niveau. Il existe d'autres types d'ondes longues en zone lagunaire. En particulier, les seiches sont des oscillations stationnaires du plan d'eau résultant de la mise en résonance de celui-ci lorsque de l'énergie est insérée dans le système (typiquement du vent). Les propriétés des seiches dépendent exclusivement de la géométrie du système lagunaire. On trouve également des ondes longues de type « infra-gravitaire » ou alternativement « de bord ». Les premières sont le résultat des interactions vague-vague lors de leur propagation libre dans le plan d'eau. Ce sont des ondes d'amplitude facilement décimétriques et de période de quelques dizaines de secondes. Elles peuvent moduler le niveau dans des proportions importantes et en mer ouverte, elles sont considérées comme potentiellement à l'origine de 50% de l'effet de submersion. Les secondes sont des ondes qui sont confinées sur le bord de la lagune et qui se propagent le long de la plage lagunaire. Elles résultent de l'interaction entre ondes incidentes et ondes réfléchies et ont tendance à s'exprimer lorsque la plage présente un profil irrégulier, ou des morphologies bloquantes à une certaine distance du bord (herbiers, haut fond rocheux, etc) ; leur effet est mal connu. Il est important de retenir que la surcôte et le niveau moyen ne sont pas des mécanismes contrôlant directement la corrosion ou les incidents de voie puisque par définition, ils ne mettent pas l'eau en contact des enjeux. Par contre, ce sont des processus qui rapprochent le plan d'eau des enjeux et qui sont donc un facteur aggravant majeur de la corrosion. En outre, sur le long terme, vu la tendance climatique actuelle, ils sont censés augmenter les effets de l'ensemble des autres mécanismes décrits ici. Le point délicat dans la quantification des évolutions futures du niveau moyen sur le long terme est la fiabilité des prédictions actuelles (scénarios RCP ; ref). Les verrous dans la quantification de la surcôte sont a) la difficulté à calculer un niveau précis en superposant simplement des contributions distinctes et b) l'incertitude qu'il existe sur les évolutions futures de l'intensité et de la fréquence d'occurrence des événements tempétueux en Méditerranée, susceptibles de perturber largement l'expression de ces surcotes.

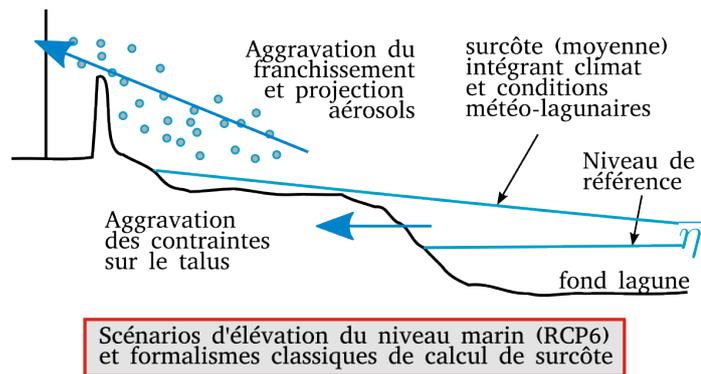


FIGURE 1.5 : Principe d'aggravation des projections sur la voie ferrée à cause de l'augmentation du niveau moyen et de la présence de surcôte en conditions tempétueuses.

Le **franchissement** désigne l'ensemble des phénomènes qui déplacent de l'eau de la lagune vers la voie sous l'effet de différents mécanismes. Pour l'essentiel, décrire le franchissement consiste à caractériser comment la vague dégénérée en lame d'eau (une déformation de la surface qui n'a plus rien à voir avec une oscillation cyclique relativement régulière) se propage sur une géométrie plus ou moins complexe faite de matériaux divers. Le franchissement est d'autant plus important/probable que la surcote et le niveau moyen sont hauts, comme précisé précédemment. Le franchissement est directement dépendant de la forme du talus de voie, et des structures qui sont mises en place entre le plan d'eau et la voie elle-même (murets, végétations, dalle de béton, pierres,...). L'analyse du franchissement repose soit sur des lois semi-empiriques issues de l'ingénierie stricte, soit sur des modélisations numériques complexes prenant en compte l'effet local des propriétés des matériaux sur la propagation de la lame d'eau. Dans le cas de l'approche par modélisation numérique, on peut aussi prendre en compte l'effet des ondes longues (infra-gravité, ondes de bord) sur le franchissement. Les lois de franchissement sur talus sont relativement bien connues, à condition de rester sur des matériaux classiques, et à condition de considérer des forçages simples (houle projet décrite par hauteur significative, période pic ou équivalente). En recherche académique, il est largement montré que ces descriptions sont toutefois insuffisantes.

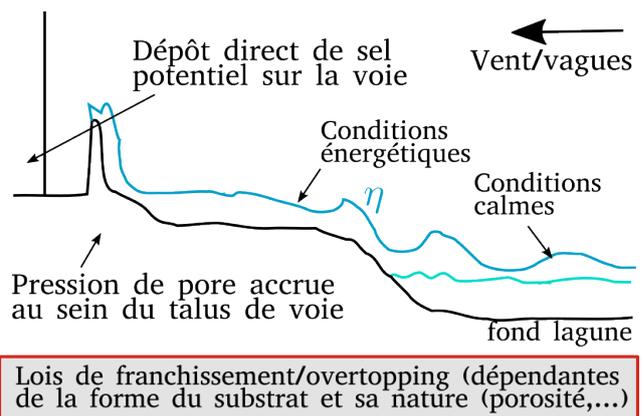


FIGURE 1.6 : Principe du **franchissement** de l'ouvrage par le milieu lagunaire.

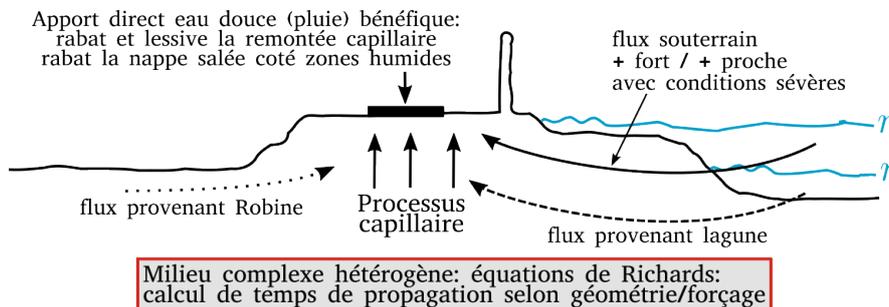


FIGURE 1.7 : Principe des **remontées salées** autour du talus de voie.

Le terme de **remontées salées** désigne les phénomènes qui permettent à du sel de se retrouver dans le talus de voie ou à sa surface par des processus de convection-diffusion à travers le milieu poral. Le talus est constitué de blocs de roche, de gravats, sable, et autre matériaux particulières positionnés en multi-couches.

La proximité de la lagune du côté Nord et de la Robine du côté Sud, ainsi que le fait que la voie n'est pas recouverte par une surface étanche, implique que le milieu poreux sous la voie subit des contraintes latérales (mise en charge de la lagune ou de la robine) et verticales (pluie) qui rentrent en compétition. Ces contraintes génèrent des écoulements au sein du milieu poral. Dans le même temps, dans la mesure où la pluie et la Robine ne sont pas salées et la lagune présente une certaine salinité, la mise en contact dans le milieu poral de ces fluides aux propriétés distinctes entraîne des effets de diffusion du sel des environnements salés vers les milieux moins salés. Enfin, les niveaux dans la Robine et la lagune étant différents, le toit de la nappe libre contenue sous la voie varie au cours du temps. Une partie du substrat est donc régulièrement saturé et désaturé en fluide. Si le matériau granulaire dans le substrat de voie est suffisamment fin, on peut aussi avoir des effets de capillarité qui font se déplacer vers le haut des fluides potentiellement chargés en sel. L'ensemble de ces processus peut conduire à concentrer du sel (ou des fluides chargés en sel) à proximité de la surface et favoriser les incidents de voie et la corrosion.

Le **brouillard salé** désigne le simple fait que pendant les périodes chaudes, on peut observer (tout particulièrement le matin) de l'évaporation directe au niveau de la lagune, mais aussi de la Robine ou des zones humides entre la mer et la lagune, qui peut concentrer au dessus de la voie de l'humidité avec des particules de sel dissous en suspension. Celles-ci peuvent se déposer sur le talus de voie, les rails, les caténaires et induire de la corrosion. Ce mécanisme est distinct des embruns au sens où il ne résulte pas de l'arrachage de particules à l'interface air/eau en condition de fort vent. Il peut être partiellement contrôlé par le vent (sans preuve réelle de cela).

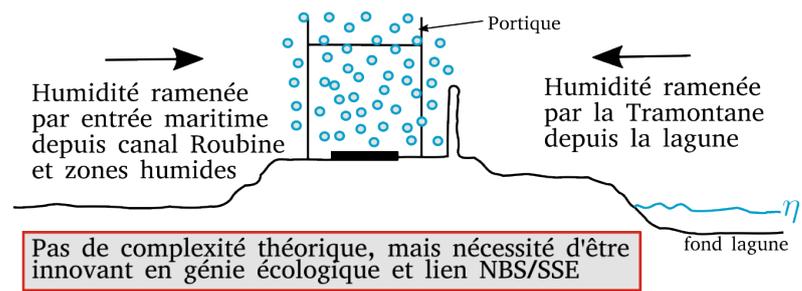


FIGURE 1.8 : Principe de **brouillard salé**.

2.3 Stratégie pour le traitement de la problématique

L'état des connaissances sur l'évolution long-terme du niveau d'eau moyen, l'expression de la surcote dans le cadre du changement global, le franchissement sur des géométries complexes, la mise en place des brouillards salés ou encore la production des aérosols en contexte lagunaire font que la détermination des mécanismes principaux à l'origine de la corrosion et des incidents de voie reste très délicate (au delà de l'incertitude sur la nature de cette relation, comme déjà mentionné). La problématique est bien définie mais elle est dans le même temps difficile à formuler en termes physiques-mathématiques. Dans un tel contexte, et dans le cadre d'une démarche de R&D comme celle qui a été privilégiée dans ce projet, la meilleure attitude est de s'appuyer sur **une stratégie de pire scénario** qui sous-entend de prendre le moins de risque possible dans le dimensionnement, et dans laquelle :

- on considère les effets potentiels les plus graves pour chacun des mécanismes identifiés ;
- on considère que tous les mécanismes identifiés peuvent avoir un effet.

L'ensemble des travaux de mesure et modélisation numérique résumés dans le chapitre 3 et dans les annexes est largement construit autour de ce principe. De la même manière, la solution générale proposée (chapitres 2 et 5) essaye de trouver un bon compromis entre acceptabilité / faisabilité d'une part et sécurité d'autre part.

Chapitre 2

Exploration des solutions possibles et formulation des contraintes

Les échanges entre le groupe GLADYS et différents organes de SNCF réseau ont tout d'abord consisté à réfléchir, tout d'abord sans tenir compte des contraintes réglementaires, d'acceptabilité ou financières, à la manière de limiter l'impact des embruns et projections sur la voie ferrée et son environnement immédiat. Le travail de recherche de solutions dites « décomplexées » est résumé dans la première section. Dans la section suivante, ces solutions sont confrontées à la réalité réglementaire et des aspects plus techniques. Enfin, la dernière section présente la famille de solutions qui a reçu une approbation par les parties prenantes, en tenant compte des contraintes formulées à ce moment du projet. Après le projet, d'autres contraintes ont été formulées, qui rendent finalement difficile la mise en oeuvre de cette famille de solutions sur le cas d'étude de Bages-Sigean, sans remettre en cause l'intérêt de la démarche et l'exercice de conception largement portable sur d'autres sites.

1 Exploration décomplexée des solutions

1.1 Le tunnel végétal

La solution défendue en tout premier lieu pour la protection de la voie est celle d'un **tunnel végétal** (Figure 2.1). Idéalement, un tunnel végétal est une structure artificielle entourant un axe de circulation recouvert par des plantes grimpantes ou tout autre espèce végétale qui peut assurer l'isolement de l'axe de circulation vis à vis de l'environnement extérieur. L'isolement peut être recherché pour contrer une nuisance sonore (dans un sens comme dans l'autre, par exemple garantir un cheminement piétonnier serein en milieu urbain), pour protéger partiellement de la pluie, du soleil, pour limiter le ressenti de la pollution, etc. La forme donnée au tunnel végétal peut permettre de construire des solutions adaptées à une voie ferrée (Figure 2.1C). Sur le principe, un tunnel végétal peut être constitué exclusivement d'éléments naturels, en particuliers des arbres formant haie, ou des arbres majeurs formant arche associés à une végétation plus petite garantissant l'opacité des bords latéraux (Figure 2.1D).

Dans le cas de voies ferrées actuelles, on trouve souvent des « tunnels » végétaux partiels, c'est à dire plutôt des zones où un tampon végétal existe de part et d'autre de la voie sans être recouvrant (Figure 2.1E) ; ce type de solution peut rendre des services environnementaux, mais n'est pas adapté à la protection contre les embruns puisque ceux-ci peuvent arriver par le haut. Par contre, ces dernières approches du tunnel végétal sont de véritables solutions fondées sur la nature.

Le concept de tunnel végétal est une solution parfaite pour traiter la question du brouillard salé et des embruns salés. Il peut être efficace pour lutter contre le franchissement, dès lors que le tunnel s'appuie

par exemple sur une ossature qui présente à sa base une opacité totale (Figure 2.1A). En soi, il est inefficace contre les effets de remontées salées et il n'a pas d'influence particulière sur la surcôte et la dynamique du niveau moyen, facteurs aggravants de la corrosion et des incidents de voie.

C'est un type de solution qui a des avantages esthétiques évidents. C'est une solution qui nécessite un certain temps de mise en place et a sa propre dynamique (croissance des espèces végétales implantées). Il nécessite un certain entretien (taille, remplacement) et il est soumis potentiellement à certains aléas (incendie, tempêtes de vent).

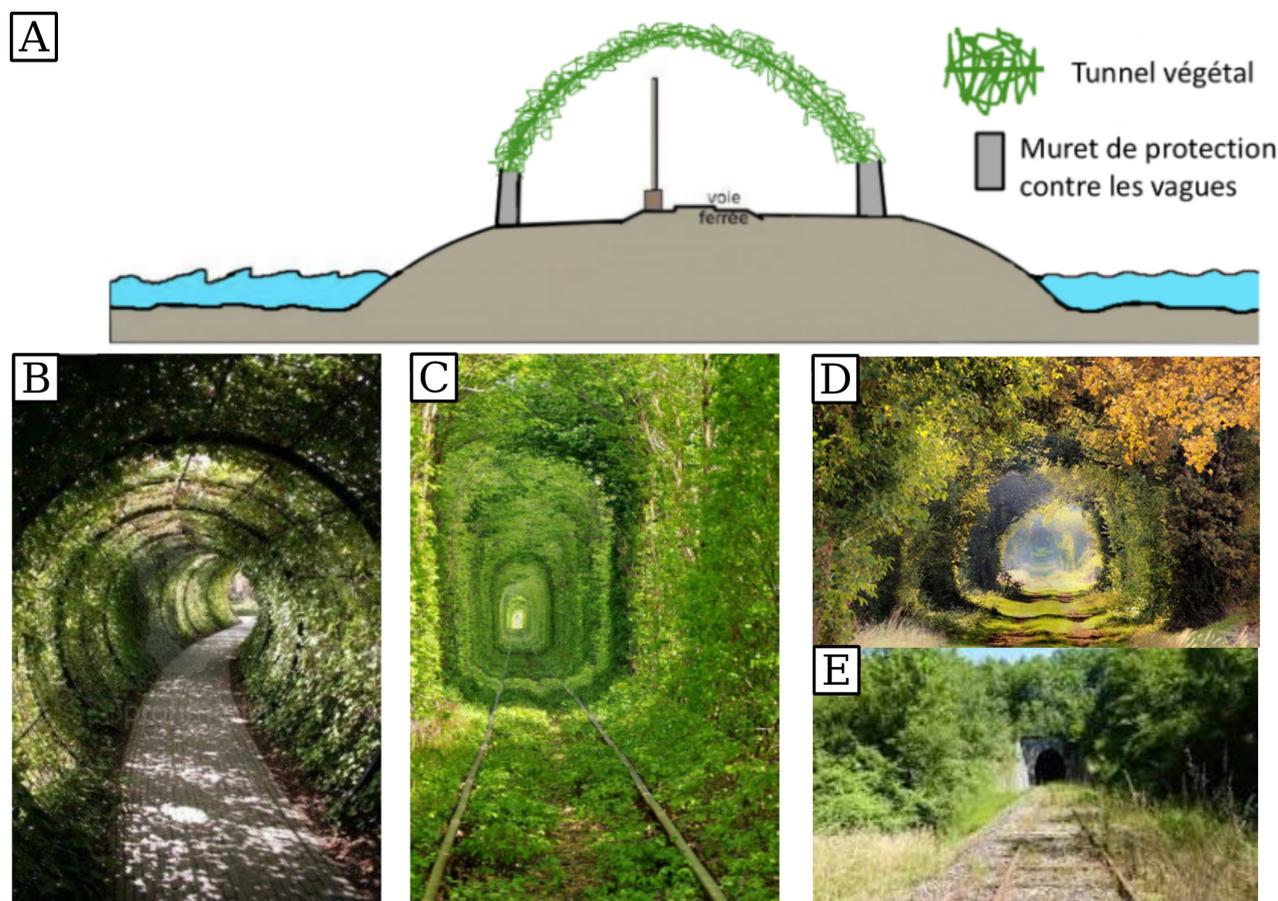


FIGURE 2.1 : A : principe du tunnel végétal autour d'une voie ferrée et de ses équipements. L'idée est d'isoler la voie de l'impact des embruns en érigeant une barrière naturelle. B : exemple de tunnel végétal utilisé pour isoler la circulation de l'environnement (ici dans un objectif de réduction de la nuisance sonore par exemple). C : principe d'un tunnel végétal artificiel construit pour une micro-voie-ferrée. D : tunnel végétal naturel construit sur la base d'arbres massifs régulièrement disposés le long de l'axe de circulation. E : entrée d'un tunnel en dur caractérisée par la présence d'un encadrement végétal fort, servant de tunnel partiel (potentiellement insuffisant pour l'idée de contrôle des embruns qui peuvent arriver par en dessus).

1.2 Implantation de géotextile sous la voie

Cette seconde stratégie consiste à insérer dans le multi-couche constituant le talus de voie un **film géotextile imperméable** isolant les rails et les caténaires des remontées salées ou des phénomènes de circulation souterraine d'eau chargée (Figure 2.2). Cette solution ne permet pas de traiter les questions de brouillard salé, embruns, franchissement ou effets de surcôte. Elle est strictement axée sur le traitement des remontées capillaires (et évidemment totalement efficace pour s'affranchir de celles-ci). Elle ne permet pas de bloquer les apports latéraux de fluide chargé au travers du talus, sauf si on envisage un géotextile s'étendant sur les bords descendants du talus ; et même dans ce cas là, la solution a certaines limites (décrites plus bas). Cette solution est de l'ingénierie lourde car elle nécessite de refaire entièrement le sous-révettement de voie.

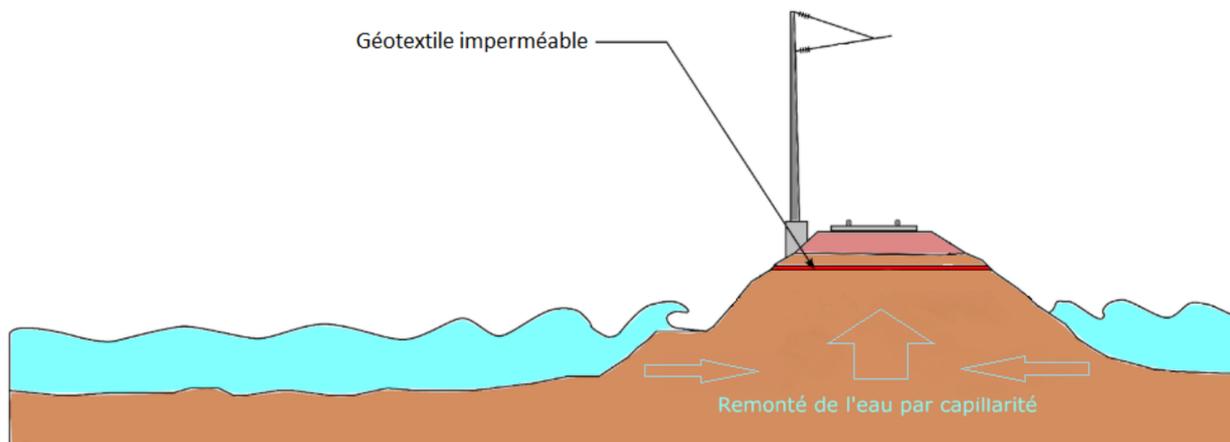


FIGURE 2.2 : Le principe d'un géotextile imperméable (ou équivalent) placé sous la voie, dans le multi-couche, garantissant l'absence de remontées salées par capillarité ou circulation souterraine forcée par les niveaux d'eau sur les bords. Il s'agit ici de l'idée initiale.

1.3 Traitement anti-corrosion de la voie

Une idée avancée dès le départ par la SNCF Réseau et d'avoir recours à un traitement des voies directement par le passage d'un train spécialisé sur des horaires adaptés. Le traitement peut être un simple lessivage de la voie avec de l'eau douce, ou avec des produits adaptés. La technique requiert que des dispositifs de concentration/récupération du produit projeté soient mis en place pour éviter la perte de ces produits dans l'environnement. En effet, même dans le cas de projection d'eau douce, le lessivage induit l'évacuation des résidus polluants du passage des trains et favorise/ accélère le dépôts de ces résidus alentours. Cette technique traite le problème à l'aval des processus moteurs de la corrosion : les embruns, le brouillard, le franchissement et les autres processus ne sont pas empêchés, mais compensés. Il est difficile d'évaluer la fréquence à laquelle il faudrait faire passer le train d'entretien pour obtenir un effet efficace sur la corrosion et les incidents de voie.

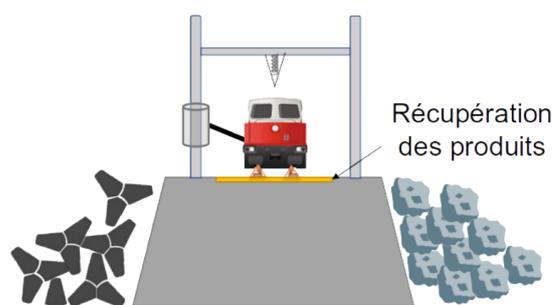


FIGURE 2.3 : Principe du traitement des voies par un train d'entretien et mise en place de systèmes de concentration/récupération des produits de lessivage.

les embruns, le brouillard, le franchissement et les autres processus ne sont pas empêchés, mais compensés. Il est difficile d'évaluer la fréquence à laquelle il faudrait faire passer le train d'entretien pour obtenir un effet efficace sur la corrosion et les incidents de voie.

1.4 Modification de l'écosystème proche du talus

Le site d'étude a ceci de particulier que la voie ferrée passe directement au sein de la lagune de Bages-Sigean sur son bord droit en direction du Sud. La distance entre la voie et l'eau est de moins de 10 m. Ce constat fait, il semble évident que le contrôle direct de l'état d'agitation de la lagune (les vagues), de l'altitude du plan d'eau et des courants à proximité du talus doit permettre de réduire les projections d'embruns salés, le franchissement, et l'aggravation de ces mécanismes par la surcôte de tempête. Il est peu probable qu'un tel contrôle puisse réduire la mise en place d'un brouillard salé. De manière moins directe, il est par contre possible qu'un tel contrôle puisse réduire les flux souterrains allant de la lagune vers le talus de voie (et donc susceptibles de remonter sous la voie).

La modification de l'écosystème peut s'imaginer de multiples façons. La première option est d'implanter des espèces caractéristiques de cet environnement ou étrangères mais présentant des effets intéressants. La seconde option est d'avoir recours à des modules bio-mimétiques, qui rendent les mêmes services hydro-sédimentaires qu'une famille d'espèces végétales définie. Une troisième option est de s'appuyer sur l'implantation de structures plus classiques mais basées sur des matériaux naturels (comme des

pieux de bois plantés verticalement) qui ont un comportement et des effets sur l'hydraulique bien mieux connus et donc qu'on peut anticiper.

Les matériaux déployés agissent alors de plusieurs manières sur l'hydraulique. Tout d'abord, ils sont à l'origine d'une dissipation du flux d'énergie des vagues s'approchant du talus (« dissipation des vagues »). Ces matériaux peuvent aussi modifier la charge *i.e.* le produit de la vitesse moyennée en temps par le niveau d'eau moyenné sur le même temps (« perte de charge », dissipation du niveau/courant vers la turbulence et les petite échelles). En jouant sur leur distribution spatiale et leur densité, les matériaux déployés peuvent aussi induire une rotation du champ de vagues (favorisant des flux de matière dans une certaine direction), voire une divergence ou convergence du champ, donnant in fine une réduction ou augmentation locale de l'énergie des vagues / du niveau d'eau. En fait, les utilisations possibles de ces matériaux naturels ou assimilés sont infinies et largement sous-employées actuellement, mais font l'objet de nombreux travaux de recherche.

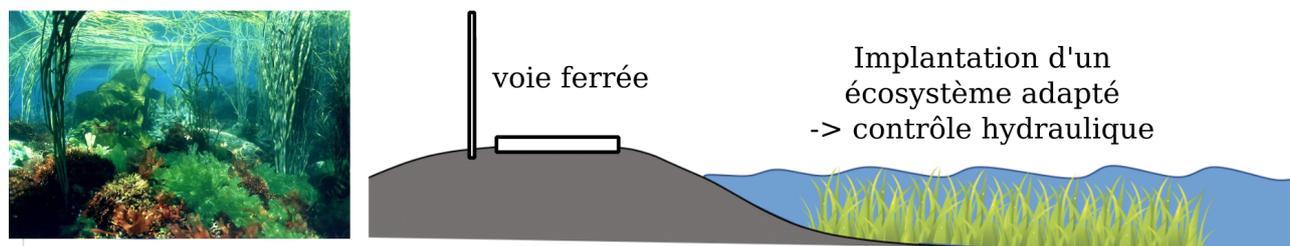


FIGURE 2.4 : Certains processus potentiellement moteurs de la corrosion et des incidents de voie peuvent être contrôlés par la transformation de l'écosystème à proximité du talus. L'implantation de plantes, de structures en bois, ou de matériaux biomimétiques (mimant le comportement d'espèces naturelles) bien choisis permet de modifier l'hydraulique autour du talus de voie et limiter l'impact de certains des mécanismes recensés, tout particulièrement le franchissement, la surcôte et les embruns salés.

Privilégier les plantes naturelles, les matériaux naturels bio-mimétiques ou d'autres matériaux est un débat récurrent. L'enjeu derrière ce choix est celui de l'impact des plantes naturelles sur l'environnement (ex. libération de toxines), la difficulté à implanter des espèces utiles dans un environnement hostile (plantes inadaptées, fragiles), le coût de ces différentes options, etc.

1.5 Paroi artificielle

Certaines approches plus technologiques ont également été envisagées. En particulier, on peut imaginer une paroi haute verticale transparente, implantée en bord de voie, et apportant un visuel paysager tout en assurant une protection mécanique contre le franchissement et dans une certaine mesure les embruns (Figure 2.5).

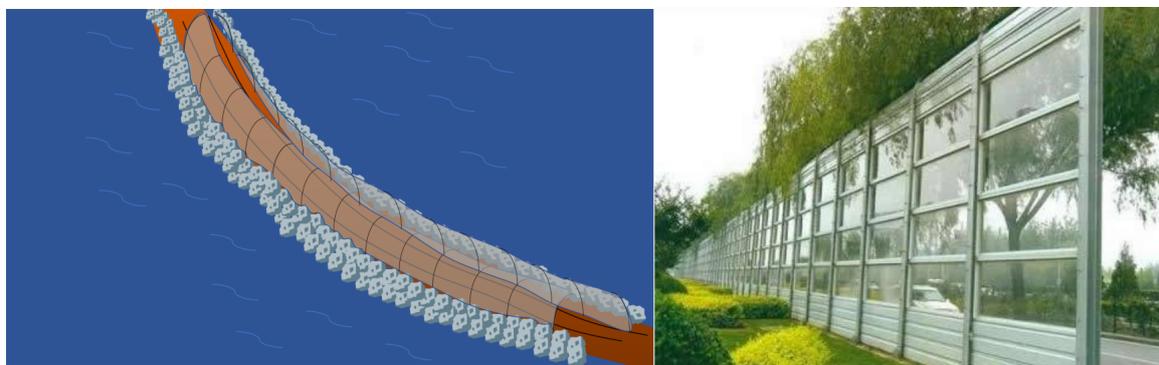


FIGURE 2.5 : Principe d'une solution basée sur une paroi transparente (exemple à droite), le long de l'ouvrage (à gauche).

Cette solution a le défaut mentionné dans le paragraphe suivant, à savoir le fait qu'elle constitue un obstacle totalement impénétrable pour les flux d'air en mouvement, favorisant de la vorticité à l'arrière et la dispersion des aérosols.

1.6   largissement du talus de voie et implantation de haies

Une manière radicale de traiter certains aspects du problème de la corrosion et des incidents de voie est de considérer un élargissement du talus, en gagnant du terrain sur la lagune. Un tel élargissement se fait en remblayant le talus latéralement à l'altitude de la voie. Sur la partie élargie, on implante des espèces végétales halophiles qui garantissent la stabilisation des sols et exercent un effet de haie entre la lagune et la voie. L'effet de haie consiste à piéger une partie des aérosols en transit, limitant leur arrivée sur la voie. L'utilisation de haies permet de réduire la vitesse moyenne des flux aériens tout en limitant la turbulence qu'on observerait à l'arrière de la protection, avec une protection totalement opaque (mur parfait) ; en effet, un mur force la déformation du flux et favorise la création d'un vortex turbulent à l'aval de la structure, éparpillant les aérosols sur le sol et contre les caténaires.

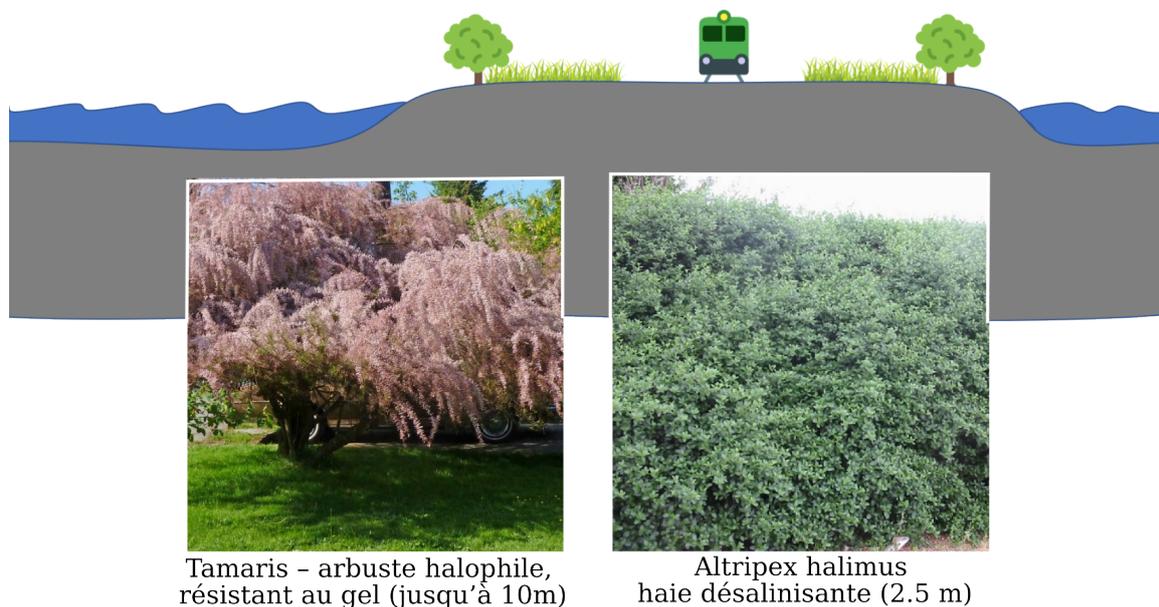


FIGURE 2.6 : Une solution assez naturelle est d'envisager des haies réparties sur un espace important à coté de la voie, crée par un remblaiement latéral du talus. Cette solution requiert d'empiéter sur le domaine maritime lagunaire. Cette solution offre l'avantage d'augmenter la distance entre l'eau et la voie, qui est le paramètre très largement dominant dans le contrôle du franchissement, de la projection des embruns salés, la pénétration souterraine des eaux lagunaires sous la voie et les effets de surcôte.

1.7 Surélévation de la voie

Une stratégie pour se protéger essentiellement du franchissement, des effets de surcôte et des effets d'élévation long-terme du niveau moyen est de relever la voie par rapport à son altitude actuelle (Figure 2.7).   videmment, une telle solution nécessite de

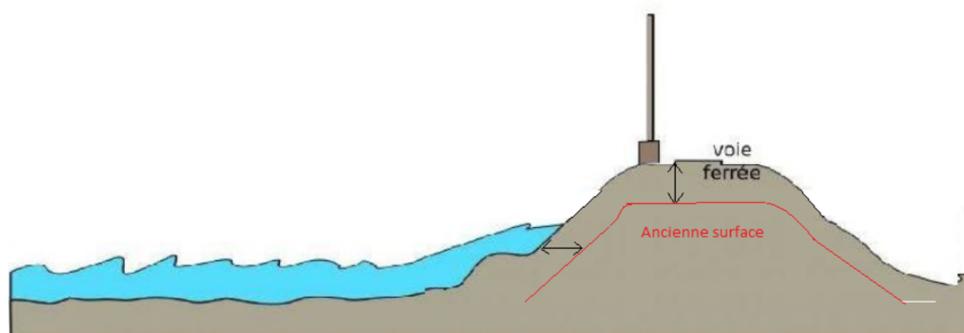


FIGURE 2.7 : Principe d'une surélévation de la voie (avec sans doute élargissement pour maintenir la forme d'ouvrage).

gros travaux localement dans la lagune, avec un démontage de la voie et des caténares et une reconstruction du talus. Pour des raisons de forme de l'ouvrage (pente max, matériaux), une telle élévation s'accompagnerait sans doute d'un élargissement partiel (si la géométrie est conservée, une surélévation de 1 m correspondrait à peu près à 4 m d'élargissement en tout). Il serait toutefois possible, en combinant cela avec des aménagements sur les bords de voie, de conserver l'empatement actuel.

1.8 Barrage poids en béton, digues ou solutions mécaniques de protection basse de la voie

On ne peut pas ne pas évoquer les solutions traditionnelles de protection de la voie, qui sont typiquement les barrages poids en béton et les digues positionnées en pieds d'ouvrage le long du talus pré-existant (Figure 2.8). Dans ce cas, l'idée est de déployer des obstacles totalement opaques (et parfaitement continus pour assurer l'étanchéité sur la longueur concernée par l'aléa) visant à réfléchir les vagues, empêcher le franchissement par les vagues pour un niveau d'eau max donné, limiter le déport d'embruns sur la voie si c'est possible, limiter les flux souterrains entre lagune et talus de voie si c'est possible. Selon la forme et la taille prise par ce type de solutions, les travaux sur la voie peuvent être substantiels (sur la figure 2.8, les exemples dessinés nécessiteraient de reconstruire totalement le talus de voie ; d'autres options pourraient être plus légères, en déplaçant vers la lagune les ouvrages, donc en empiétant sur le domaine maritime). La taille et la forme de ces ouvrages relèverait d'un travail de dimensionnement en génie côtier évidemment. Les formes présentées sur la figure 2.8 sont classiques mais absolument pas optimisées pour lutter efficacement contre le franchissement (en particulier le barrage poids en béton). On peut donc imaginer d'autres types d'ouvrage ayant la même fonction, mais issus de la R&D en génie côtier, montrant une efficacité accrue en terme de protection contre le franchissement, résistance aux efforts, ou imperméabilité (en profondeur).

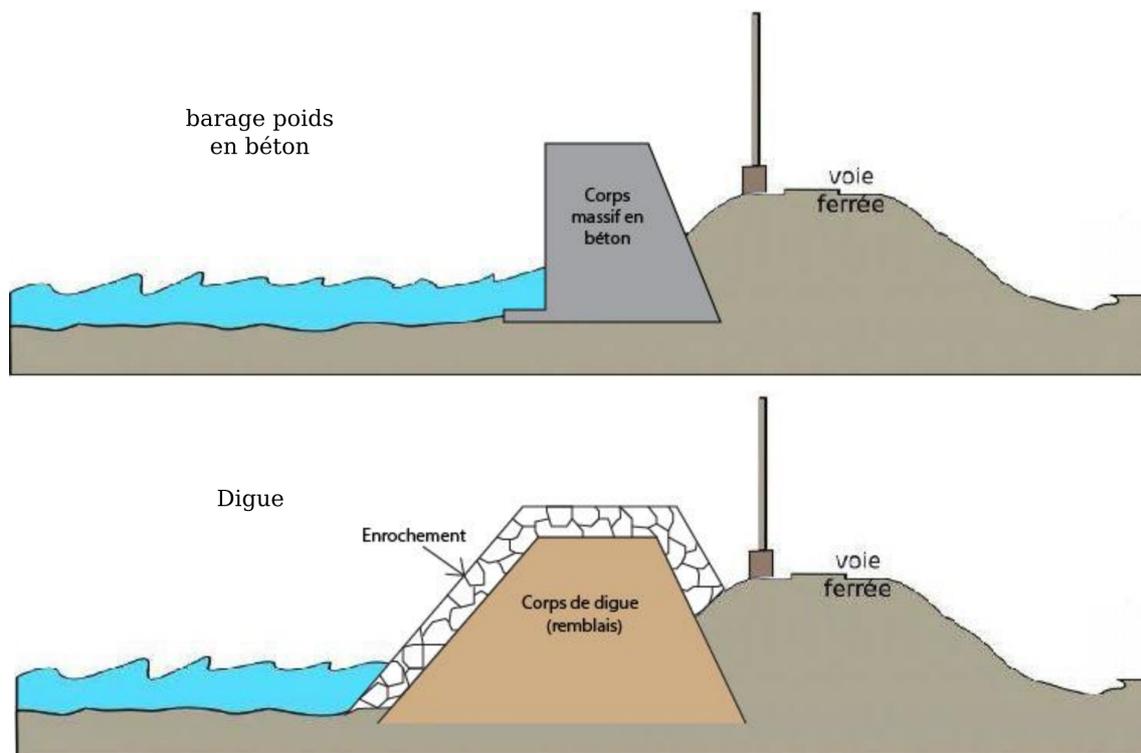


FIGURE 2.8 : Des solutions de protection de la voie et des caténares avec de l'ingénierie plus lourde : barrage poids en béton (haut) et digues (bas). Dans les deux cas, les ouvrages traditionnels requièrent de rogner un espace de lagune pour être correctement dimensionnés. Une approche alternative est de conserver l'idée d'ouvrages barrant physiquement le passage des vagues et des lames d'eau, mais reposant sur des technologies moins invasives et moins larges.



2 Contraintes réglementaires, techniques & acceptabilité

2.1 Les contraintes réglementaires environnementales

Le site d'étude où on envisage un prototype expérimental de protection de la voie ferrée contre la corrosion et les incidents de voie (entre les points kilométriques 415 à 425 sur la voie entre Montpellier et Perpignan, à hauteur de Bages) est situé dans le parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée (ci-après PNR), comme l'ensemble de l'étang de Bages-Sigean. La voie ferrée est la propriété de la SNCF réseau sur une largeur de part et d'autre des rails qui est de quelques mètres, avec un empâtement sur le domaine maritime quasi nul. Le dialogue SNCF / PNR a été régulier tout au long du projet (et parfaitement rodé du fait de l'historique partenarial des deux structures autour des tronçons de voie SNCF au sein du parc). Bien évidemment, le projet de prototype a été discuté avec le PNR et ses propres partenaires et ces échanges ont amené un certain nombre de contraintes.

Il existe une réglementation nationale sur la manière de gérer les voies et leur talus, en particulier sur les questions environnementales. Cette réglementation est mise en oeuvre par SNCF réseau et elle est combinée à la propre stratégie de la structure en matière de protection de l'environnement. La tendance est à abaisser le niveau de pollution le long de la voie en renonçant par exemple au désherbants chimiques.

Les points importants soulevés par les parties concernées par les aspects environnementaux sont les suivants :

- la solution ne doit pas être invasive sur le milieu lagunaire. Idéalement, elle ne doit pas pénétrer le domaine sous la responsabilité du PNR et être cantonnée à la partie en gestion par SNCF Réseau, c'est à dire quelques mètres de part et d'autre des rails, jusqu'au pieds d'ouvrage actuel. Si elle est déployée dans la lagune, la solution ne doit en aucun cas consister en une perte de surface immergée ;
- si tout ou partie de la solution est déployée dans la lagune, les matériaux utilisés ne doivent pas avoir d'impact environnemental négatif sur l'environnement, les espèces animales et végétales en place. En particulier, les matériaux dérivés du pétrole (plastiques etc ...) ne sont pas une option envisageable ;
- si tout ou partie de la solution est implantée au milieu d'espèces végétales endémiques (herbiers en particulier), la preuve doit être faite que la solution ne menace pas le développement de l'herbier. Si la preuve que la solution peut améliorer le développement de l'espèce, la preuve doit être apportée ;
- si tout ou partie de la solution repose sur des SfN (Solutions fondées sur la nature) et en particulier l'implantation d'espèces végétales naturelles, il faut faire la preuve que ces espèces implantées ne peuvent en aucun cas menacer l'écosystème de la lagune de Bages-Sigean et être idéalement déjà recensées dans cet environnement ;
- une contrainte identifiée moins visible est celle de l'impact environnemental paysager. Certaines des solutions décomplexées envisagées barrent la vue de la voie ferrée sur la lagune. Ceci a été considéré par les parties comme une nuisance en propre dans la mesure où la SNCF et le parc (pour des raisons différentes) souhaitent que le paysage lagunaire ne soit pas altéré outre mesure. La SNCF défend l'idée de maintenir la vue sur la lagune lors du passage des trains (il y a même des animations dans les trains l'été qui consistent à commenter le paysage lagunaire). Le PNR défend évident l'idée que le paysage lagunaire ne doit pas être trop dégradé, tout en ayant conscience que la voie ferrée fait partie de cet environnement.



2.2 Les limitations techniques et réglementaires liées à la voie

Le déploiement de structures à proximité de la voie est soumis à un contrôle et une réglementation stricte. En particulier, il est impossible d'imaginer une solution pénétrant la zone où sont déposés les rails en deçà d'une certaine distance critique. De même, une distance minimale (de l'ordre de 3 mètres) doit être respectée entre le câble d'alimentation des trains et toute structure autre que le caténaire lui-même.

La présence de végétation à proximité de la voie est mieux acceptée que dans le passé. En particulier, l'entretien des pieds de voie ne passe plus par une éradication systématique de la petite végétation (herbes, fleurs). Par contre, la présence d'arbre est malvenue dans la mesure où leur portée en cas de chute peut menacer la voie elle-même.

SNCF Réseau dispose d'un droit d'utilisation d'une bande de terre assez réduite de part et d'autres des rails. Les solutions qui s'étendent au delà du talus sont donc soumises à l'avis de structures tiers (en particulier le PNR dans le cas de cette étude).

2.3 Acceptabilité globale des solutions décomplexées proposées

L'acceptabilité de l'ensemble des familles de solutions décomplexées présentées dans la section 1 a été estimée à partir des retours sur leur présentation lors d'intervention au sein de la SNCF (Montpellier, Paris, sur site), lors de présentations devant le PNR à plusieurs occasions (administrateurs, conseil scientifique,...) et en audition plus large, lors de rencontres avec des porteurs de projets tiers (écologie, environnemental lagunaire, changement globaux en façade Méditerranée, Pôle Mer, etc ...). De l'ensemble de ces échanges, en particulier ceux avec le PNR et ceux réalisés en interne avec la SNCF, on dégage des évidences.

Tout d'abord, les ouvrages hauts (paroi, tunnel végétal, ...) reçoivent un accueil froid car ils sont trop visibles et impactent le paysage lagunaire, qui doit être préservé. Ils pourraient être envisagés si leur hauteur est vraiment limitée, mais ceci réduit leur intérêt en terme de protection anti-embruns salés.

Il semble exclu d'un point de vue technico-financier de repenser le talus multi-couches portant les rails en y introduisant de nouveaux matériaux assurant l'imperméabilité et donc empêchant les potentielles remontées capillaires. Une telle stratégie nécessiterait de reprendre totalement le design du talus de voie et n'est pas réaliste sur un plan financier (sans avoir à se poser la question d'une étude des coûts).

Les solutions lourdes sont à exclure dans la partie lagunaire. Dans l'eau, seule des solutions garantissant un impact écologique nul sont envisageables, et la pénétration de ces solutions dans le milieu lagunaire doit rester limitée.

L'élargissement du talus est à exclure, et comme la végétation haute doit être tenue à distance des voies, toutes les solutions visant à créer un tampon végétal (pourtant ultra-efficace) entre la voie et la lagune sont à exclure.

3 Vers une famille de solutions acceptables et techniquement faisables

La confrontation entre la base de données de solutions décomplexées et les contraintes émises par les partenaires a fait émerger une famille de solutions qui pourraient être acceptables et qui seraient en même temps techniquement faisables. On présente d'abord les éléments envisagés, et on résume ensuite la solution globale défendue. Enfin, on limite la suite du projet à une partir de cette solution à cause de risques trop forts restants sur certains éléments de la solution retenue.

3.1 Barrière anti-diffusion

Une barrière anti-diffusion entre la lagune et le talus de voie (Figure 2.9) peut être envisagée sur les rebords externes du talus, au delà de la zone interdite réglementaire. Cette barrière imperméable doit descendre assez profondément dans le sol en direction de la lagune. Il faut envisager son fonctionnement de la manière suivante : (i) pendant

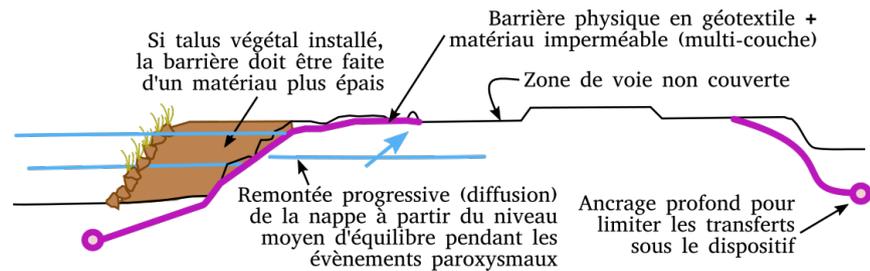


FIGURE 2.9 : Principe de la barrière anti-diffusion compatible avec les contraintes réglementaires, techniques et économiques existant sur le site d'étude.

les périodes de surcôte, la partie lagunaire se met en charge jusqu'à la barrière imperméable qui par définition empêche une mise en charge immédiate du talus ; (ii) dans le milieu poral, la vitesse de filtration permet à la charge hydraulique coté lagune de se répartir progressivement du coté du talus ; (iii) mais si le temps pendant lequel le niveau d'eau dans la lagune est haut est suffisamment petit (1 ou 2 jours) devant le temps que met la charge à s'équilibrer des deux cotés de la barrière, alors le retour au niveau d'eau normal annule le flux vers le talus et les composés salés sont peu/moins/pas du tout entraînés sous le talus. Si c'est bien le cas, les remontées capillaires ne sont plus salées (le talus est régulièrement lavé par la pluie) et la corrosion et les incidents de voie induits potentiellement par les remontées salées sont mieux maîtrisés.

Il est important de comprendre que l'usage de la barrière selon le principe décrit ci-dessus rend totalement inutile sur le long terme (évolution du niveau d'eau sous changement climatique) dans la mesure où sur ces échelles de temps, le passage des composés salés entre lagune et talus peut largement se faire par diffusion, en contournant la barrière perméable ; en outre, l'effet tampon décrit ci-dessus n'a pas de sens au delà d'une dynamique du niveau d'eau sur 1 ou 2 jours.

Pour que le dispositif soit efficace, il faut évidemment que la barrière imperméable se prolonge vers la voie aussi loin que possible, et au moins jusqu'au niveau de franchissement maximal. Si celui-ci est plus haut que l'altitude de la voie, il faut que la barrière imperméable soit remontée le long d'un muret (ou autre solution de contrôle du franchissement) interdisant totalement le franchissement.

3.2 Filet à embruns

Un filet à embruns (Figure 2.10) est un dispositif qui peut se substituer (partiellement ou complètement) aux concepts de tunnel végétal, de parois artificielle ou végétale, en terme de service rendu pour le contrôle des projections et embruns salés. Le filet à embruns peut être disposé sur une ligne unique (en haut de talus), avec une altitude suffisante pour bloquer les embruns susceptibles de se rabattre sur la voie. On peut aussi les envisager sur plusieurs lignes le long du talus et moins hautes pour avoir un effet globalement moins haut, mais éventuellement plus puissant sur la partie basse de la colonne d'air. La forme du filet est incurvée pour faciliter la collecte des particules humides. Le filet en lui-même est constitué d'une maille fine synthétique ou grillagée, dimensionnée pour être capable

de capturer les particules aérosols comme le font certains insectes avec les membranes disposées sur leur carapace ou leurs ailes. Un système de collecteur des fluides captés doit être pensé à la base du filet afin de ne pas sur-concentrer les composants salés dans le talus au pied du mat du filet.

Si le filet est disposé directement dans la lagune, son encrage doit être particulièrement soigné (matériaux meubles sollicités par les vagues). Ce type de solution doit respecter les contraintes de distance aux caténaires (électricité) et à la voie. Vu la configuration de la voie ferrée, ces contraintes imposent sans doute l'élargissement du talus pour pouvoir disposer les filets réglementairement.

Le filet à embruns est un dispositif permettant de contrôler les embruns salés exclusivement. Il est inefficace contre le brouillard salé, les remontées capillaires, toute la dynamique du niveau d'eau et le franchissement. Parce qu'il ne contrôle pas plus d'un paramètre et qu'il reste très complexe à rendre compatible avec les contraintes réglementaires sur le site, son déploiement a été largement contesté par le partenariat en seconde lecture. Il est présenté dans la solution totale, mais n'a pas été retenu pour la phase de dimensionnement optimal.

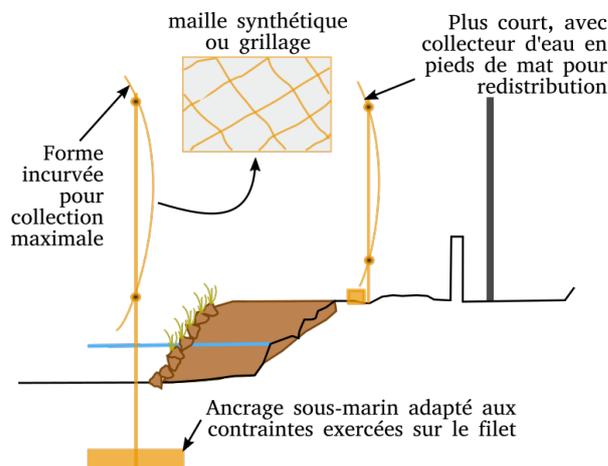


FIGURE 2.10 : Principe d'un filet à embruns artificiel, basé sur un principe biomimétique (le revêtement de certaines carapaces d'animaux vivants en zone aride et captant l'humidité grâce à la texture de celles-ci).

3.3 Talus revégétalisé ou repli sur solution traditionnelle barrante

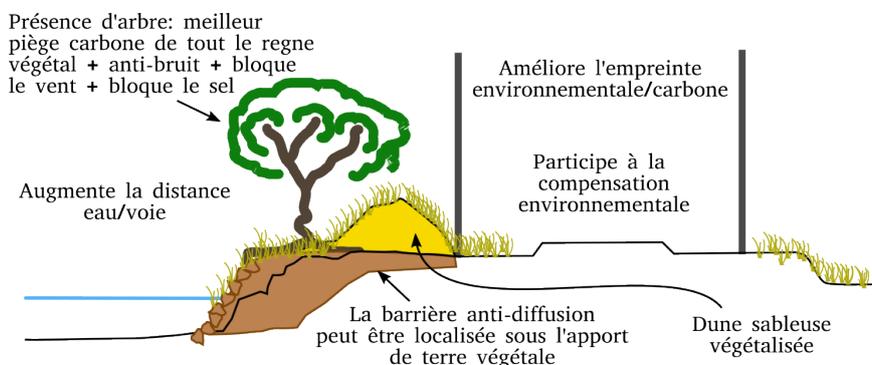


FIGURE 2.11 : Principe d'un talus végétalisé compatible avec les contraintes de distance à la voie/caténaire et de non comblement du milieu lagunaire. L'idée est de reprendre le talus de telle sorte qu'un sol adapté puisse être installé à la place des ouvrages en dur dégradés actuels. Le talus revégétalisé est associé à une dune sableuse reconstruite sur la terre végétale et consolidée avec des espèces adaptées, et des dispositifs habituels de maintien des dunes (par exemples des ganivelles). Cette solution est compatible avec la barrière imperméable si celle-ci est largement enfouie et qu'elle remonte à la surface au plus près de la voie dans la zone d'action autorisée.

L'idée de re-végétaliser le bord de talus a largement été exploitée dans plusieurs solutions décomplexées. Elle est intéressante car une haie ou un tampon végétal dense peut largement contribuer à réduire l'impact des embruns salés, gérer pro-parte le problème du franchissement si elle comprend la mise en place d'une dune sableuse reconstruite (Figure 2.11). Si on tient compte des contraintes lourdes sur l'installation de structures de protection (y compris des espèces végétales) sur le bord de voie, il reste une certaine marge

de manoeuvre pour installer un tel dispositif, en rajoutant de la terre dans sa zone d'extension actuelle à la place d'une partie des enrochements (qu'on peut utiliser pour asseoir et régulariser la base du talus, actuellement très irrégulière). Mais en fait, même cette proposition reçoit un avis globalement négatif (dont la justification est difficile à cerner) alors qu'elle constitue une solution très positive d'un point de vue de la compensation environnementale. La seule issue pour offrir le même service tout en renonçant aux espèces naturelles et à toute forme de modification du talus actuel est de remplacer l'essentiel de ce dispositif par une solution traditionnelle, c'est à dire un barrage physique contre le

franchissement. Bien évidemment, une telle solution traditionnelle doit être issue de la R&D pour garantir la que sa forme soit réellement efficace. Actuellement, les dispositifs mis en place le long de la voie sont des ouvrages de génie civil, mais sont des aberrations d'un point de vue génie côtier, avec des formes pouvant largement exagérer les projections d'eau sur la voie quand le niveau monte (Figures 1.1 et 1.2).

3.4 Dispositif SfN/ biomimétique de contrôle de l'hydraulique lagunaire

Une partie de la lutte contre les mécanismes moteurs de la corrosion et des incidents de voie repose sur l'utilisation de dispositifs déployés dans la lagune et assurant un contrôle de l'hydraulique lagunaire permettant un maintien d'un niveau d'eau raisonnable, une réduction de l'agitation de la surface, une réduction du franchissement et une réduction du décollage des aérosols, une réduction des forces exercées sur le talus et ses aménagements (potentiellement des aménagements doux, qu'on ne souhaite pas exposer à des mers de vent violentes). Ces dispositifs sont par définition à déployer dans la lagune donc dans la zone sous la responsabilité du PNR. Dans ce contexte, les solutions retenues doivent être aussi conformes que possible à une approche SfN (Solution fondée sur la nature) ou biomimétique. La première correspond au fait que des espèces végétales et des principes propres au fonctionnement naturel de l'environnement sont utilisés pour penser et construire la solution. L'approche biomimétique a la même ambition mais repose sur des objets artificiels mimant des comportements naturels, et affichant un impact environnemental aussi faible que possible, avec idéalement des mesures environnementales compensatoires (augmentation biodiversité, effet de nurserie,...).

Pour illustrer cette idée, la figure 2.12 montre un exemple de solution douce biomimétique qui pourrait figurer sur le cahier des charges du dispositif déployé en lagune. La solution est tout d'abord composée d'un treillis lesté (ancres, poids) sur le fond et largement poreux (ne bloquant pas les échanges sédiment/colonne d'eau ni l'implantation naturelle de plantes aquatiques). Sur ce treillis, des filaments mous de longueur supérieure à la colonne d'eau sont attachés et des flotteurs sont fixés à leur extrémité de telle sorte que le filament couvre la totalité de la colonne d'eau quel que soit son niveau. Les caractéristiques détaillées du filament ne sont pas à préciser ici, mais le principe serait que ce filament puisse porter des ramifications ou des structures annexes capables d'influencer l'hydraulique par dissipation par exemple (ces aspects là seront présentés en détails au chapitre 4). La densification de ces « herbes sous-marines artificielles » permettrait de constituer une structure à positionner correctement pour qu'elle puisse rendre un service hydraulique utile au traitement de la problématique.

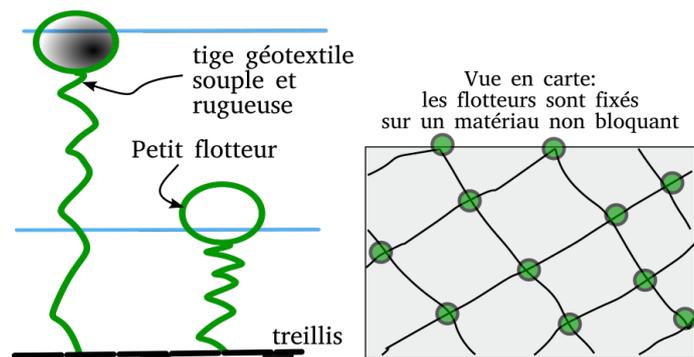


FIGURE 2.12 : Un exemple de solution biomimétique qui pourrait être utilisée dans la lagune devant le talus afin de contrôler l'hydraulique dans le but de réduire l'impact des mécanismes à l'origine de la corrosion.

En pratique, le dispositif mis à l'eau doit être composé de plusieurs solutions bio-mimétiques ou SfN assurant différents services hydrauliques qui, intelligemment combinés et disposés dans l'espace, doivent permettre de contrôler globalement la dynamique du niveau d'eau, l'agitation des vagues et les autres mécanismes de réduction de l'endommagement de la voie ferrée.

La recherche et la R&D sont extrêmement actives sur ces questions, et les possibilités sont nombreuses, et largement sous-estimées par la société civile qui n'est pas au fait de ces développements récents (moins de 10 ans). On peut envisager des solutions biomimétiques basées sur des structures molles mimant le comportement d'herbiers (zostères, kelp, ...), ou sur des structures en dur mimant celui d'une végétation plus lourde (arbres à feu, palétuviers,...). On peut envisager l'utilisation de matériaux



naturels (matte d'herbier mort) pour modifier le comportement rhéologique d'un autre matériau (par exemple la matte mélangée à du sable pour former un matériau plus résistant à l'érosion, par analogie avec le comportement d'un béton fibré). Dans ces approches, il faut distinguer les formes utilisées pour rendre le service hydraulique et les matériaux utilisés (en général garant de la résistance des solutions à l'agression du milieu marin/lagunaire). D'une manière générale, ces solutions tendent à – ou ab minima tentent de – privilégier les matériaux naturels ou biosourcés.

4 La solution retenue pour la mise en place d'un pre-prototype opérationnel

Sur la base des réflexions et échanges reportés ci-dessus, un cycle de réunions à vocation décisionnaire a permis de converger vers une solution constituant la proposition officielle de **pre-prototype**. Le terme pre-prototype correspond dans ce projet à une solution concrète, qu'on peut décrire précisément dans un cahier des charges par les **services hydro-sédimentaires qu'elle va rendre**. On ne s'intéresse pas par contre aux caractéristiques exactes et définitives des structures à déployer (ceci relève de propositions à faire par les entreprises engagées par la SNCF réseau dans la phase opérationnelle) mais on fixe définitivement et on s'entend sur :

- les services hydrauliques (réduire l'agitation, contrôler le niveau, ...) qui doivent être correctement couverts,
- les mécanismes à l'origine de la corrosion qui doivent être correctement traités,
- la disposition d'ensemble de la solution, sa composition, la position relative de ses éléments constitutifs et
- les informations quantitatives minimales sur ce que les éléments installés sur le site d'étude doivent garantir en terme d'efficacité.

4.1 L'émergence du pre-prototype

Les débats ayant permis de passer des idées de solutions décomplexées, aux solutions réalistes puis au pré-prototype ont suivi le cheminement suivant :

- renoncement à toutes les solutions très orientées bio-mimétisme/SfN sur la partie terrestre pour :
 - (i) satisfaire les contraintes réglementaires autour de la voie et en lien avec le PNR,
 - (ii) limiter les craintes liés à l'introduction d'espèces végétales ou de matériaux à risque à proximité de la lagune,
 - (iii) limiter les craintes concernant l'efficacité des solutions douces vis à vis du franchissement ;
- renoncement aux solutions hautes quelles qu'elles soient, c'est à dire les filet à embruns, les parois, le tunnel végétal, et même les haies et la mise en place d'un simple tampon végétal sur le talus actuel ;
- renoncement à traiter le problème des intrusions salines souterraines et remontées capillaires dans la mesure où leur traitement nécessite une reprise lourde de la voie inacceptable pour la SCNF Réseau.

Ce cheminement et son aboutissement en pré-prototype sont résumés sur la figure 2.13.

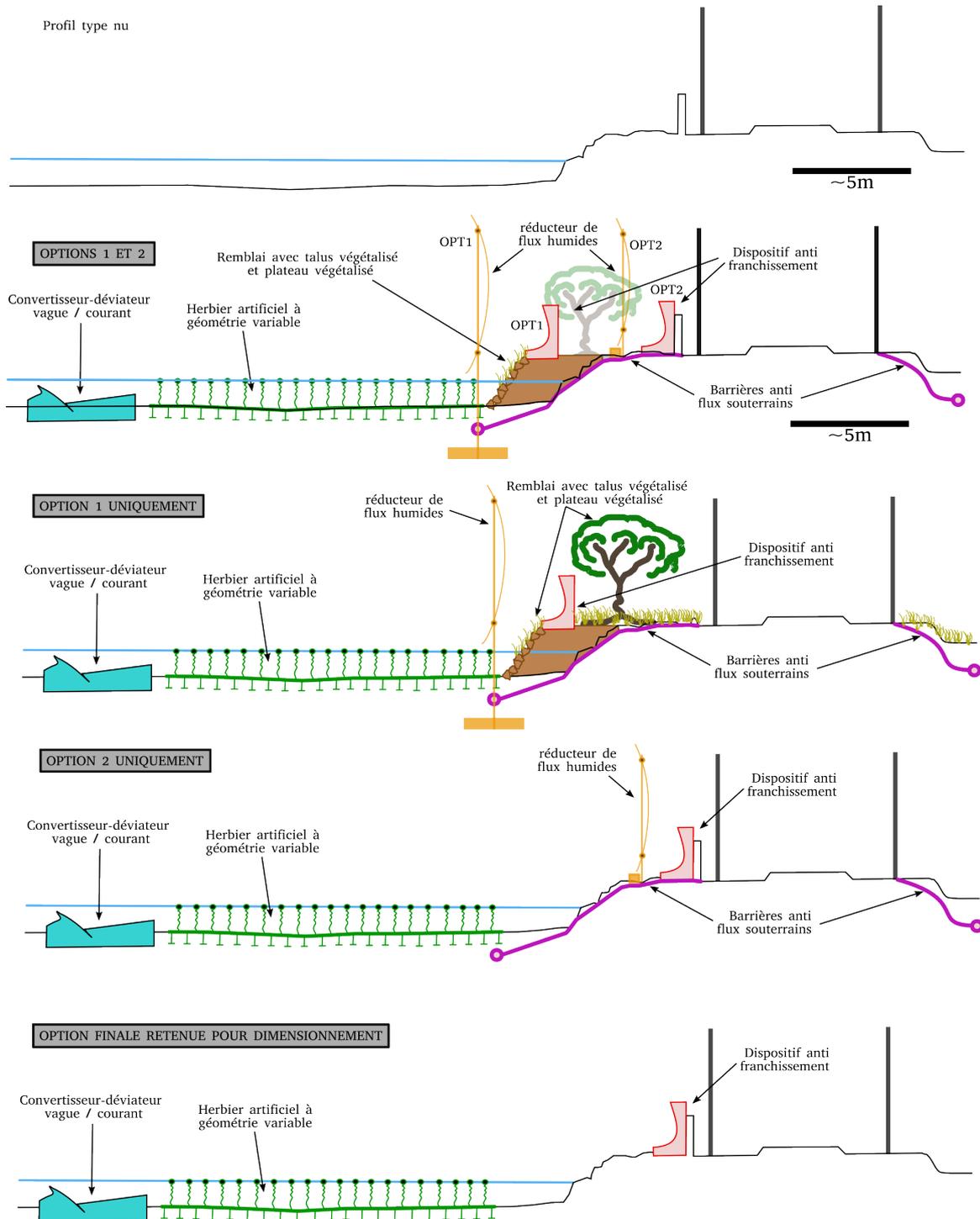


FIGURE 2.13 : La convergence progressive vers le pré-prototype à partir de la combinaison de solutions initialement proposées suite au travail de recherche décomplexée de solutions et confrontation aux contraintes réglementaires et techniques identifiées. Le pré-prototype (figure du bas) envisagé fait ensuite l'objet d'un dimensionnement pour en préciser les caractéristiques géométriques précises et pour établir l'efficacité minimale demandée à chacun de ses éléments vis à vis du service hydraulique attendu. Le pré-prototype est composé d'un système solide rendant un service hydraulique de type convertisseur-déviateur de vagues et courant, d'un herbier artificiel garantissant une atténuation du champ de vagues et de la rugosité de surface, et d'un système plus traditionnel de barrage au franchissement. Le contrôle direct des embruns projetés sur la voie (filets à embruns, parois) n'est finalement PAS considéré, pas plus que les solutions visant à contrôler les flux souterrains et remontées capillaires sous la voie ferrée. Les dessins sont représentés sur un profil nu (figure du haut) qui est établi à l'échelle avec des levés GNSS (positionnement GPS centimétrique) de terrain; l'échelle horizontale indiquée montre que la totalité de la solution s'étend à maximum quelques dizaines de mètres de la voie, mais la taille exacte de la solution relève d'une démarche de dimensionnement (chapitre 4).

En outre, il a été décidé que le pré-prototype doit être pensé de manière à ce que sa capacité à endiguer la corrosion et les incidents de voie ferrée ne soit pas lourdement dégradée par les modifications de l'environnement à moyen et long termes (décades) liées aux changements globaux. La figure 2.14 résume le comportement du pré-prototype tel qu'il a été présenté vis à vis de l'augmentation moyenne du niveau d'eau, principale manifestation des changements globaux sur le site d'étude. Il semble évident que la solution opérationnelle doit aussi tenir compte de ces aspects là.

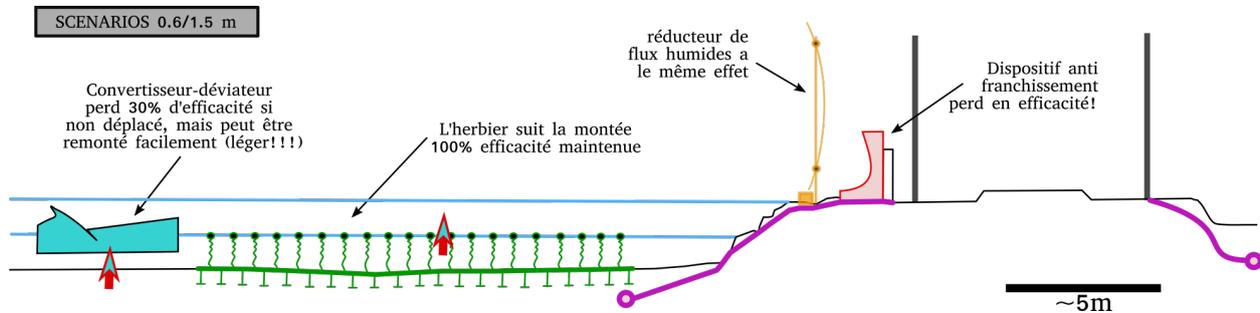


FIGURE 2.14 : Le pré-prototype retenu doit être suffisamment résilient dans sa conception pour s'adapter durablement aux manifestations du changement global. A titre d'illustration, la figure montre un scénario dans lequel le pré-prototype (sur lequel on a volontairement laissé un filet à embruns et une barrière anti flux souterrain) est impacté par un scénario de hausse du niveau moyen faisant que l'altitude du plan d'eau dans le repère choisi passe de 0.6 m à 1.5 m (90 cm d'augmentation, typiquement l'ordre de grandeur d'une hausse pour la famille de scénarios RCP8x à l'horizon 2080). Cette situation correspond à l'arrivée du niveau d'eau moyen à l'altitude du haut du talus de la voie ferrée, mettant l'ensemble du dispositif dans une situation de type « les pieds dans l'eau ».

Tel qu'il est proposé à ce stade, le pré-prototype est capable de s'adapter à la montée du niveau d'eau. Le dispositif convertisseur-déviateur, ouvrage biosourcé (pieux, structure solide, etc ...) ancré sur le fond peut être remonté à moindre coût pour que sa position relative par rapport au plan d'eau reste la même. L'herbier artificiel ou son équivalent est capable de s'auto-adapter à la montée du niveau d'eau. Le dispositif en dur sur le talus de voie visant à contrôler le franchissement est forcément moins efficace puisque le niveau d'eau est plus proche du sommet de la structure de protection. La seule issue est de le faire évoluer (rallonge, prolongement vertical, remplacement). Dans le cas contraire, il y a une augmentation de la probabilité d'occurrence d'un franchissement pour une condition de forçage météo-marin donnée.

4.2 Bilan intermédiaire sur le pré-prototype retenu

Le pré-prototype retenu pour le projet (Figure 2.13, ligne du bas), c'est à dire la solution qui fait l'objet des travaux de dimensionnement du chapitre 4, est donc un dispositif composé de 3 éléments distincts, deux dans la lagune à proximité immédiate du talus (quelques dizaines de mètres) et un sur le talus lui-même, sans que celui-ci ne soit modifié autrement que marginalement, et sans ajout de végétation. Le dispositif à terre vient du génie côtier traditionnel, et les 2 dispositifs dans l'eau doivent reposer sur des solutions biomimétiques ou SfN. L'ensemble de la solution présente une bonne adaptation propre (ou rendue possible par des actions limitées de l'homme) à la montée du niveau marin due au changement global. Le prototype est pensé pour lutter en priorité contre le franchissement, la surcôte et la génération locale d'aérosols. On renonce à traiter frontalement les flux allochtones d'aérosols, les flux souterrains / remontées capillaires, et le brouillard salé. On fait donc tacitement le pari que ces mécanismes ont des effets secondaires sur la corrosion et/ou les incidents de voie.

Les chapitres 4 et 5 apportent d'autres éléments de définition du pré-prototype, en particulier la définition des services hydrauliques effectivement rendus par la solution, et la quantification de l'efficacité minimale attendue par les 3 éléments de la solution.

Chapitre 3

Récapitulatif des travaux de mesure et de modélisation numérique

Ce chapitre porte sur des aspects plus techniques, en relation avec la mesure in-situ, le traitement de données et la modélisation numérique. Le projet était pensé autour d'un objectif final simple : proposer un pré-prototype expérimental pour tester une solution de lutte contre la corrosion sur une voie ferrée. Les activités programmées pour atteindre ce but n'étaient pas cadrées au sens où il n'y avait aucune obligation particulière en matière d'acquisition de données ou simulation numérique. En pratique, il y a eu de nombreuses campagnes de mesures et efforts exploratoires de simulation qui ont été menés principalement pour vérifier ou tester des hypothèses utilisées dans la réflexion générale. La plupart des travaux de mesure ou de simulation n'ont finalement pas été centraux dans le projet.

Il est donc hors de propos de restituer ces travaux intermédiaires qui ne constituent pas des résultats en soi. Dans ce chapitre, on fait surtout un tour d'horizon des activités menées afin d'en garder trace. Lorsque certains points méritent un complément, celui-ci est donné en annexe.

1 Activités en lien avec le suivi morphodynamique

La figure 3.1 montre un exemple de levé topo-bathymétrique sur le site de déploiement du prototype.

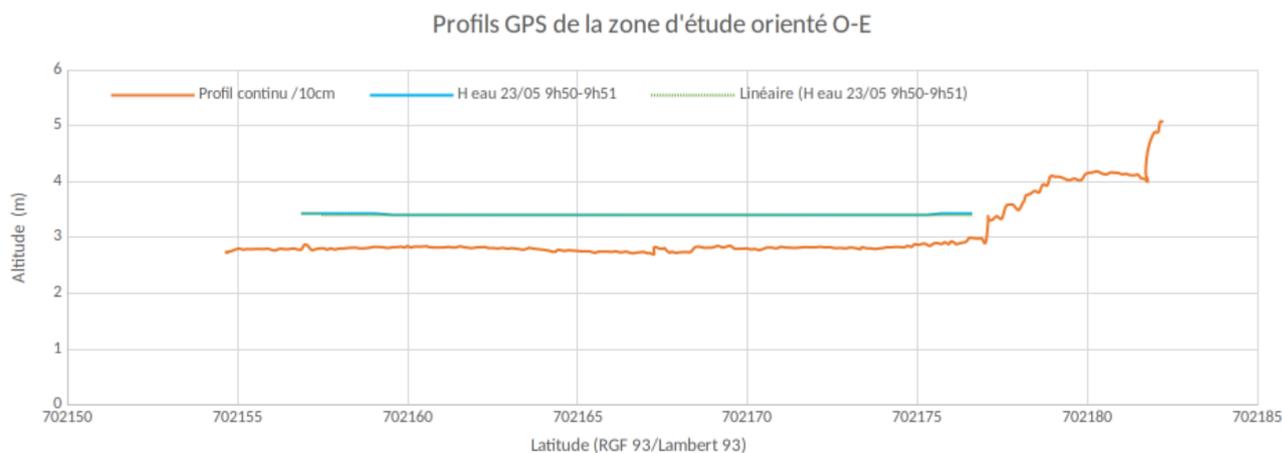


FIGURE 3.1 : Un exemple de levé GNSS (RTK Trimble R8 base et mobile) sur le site du PK 416 (lieu de déploiement probable du prototype) en date du 23 mai 2019. Le talus de voie est à droite. Le fond est globalement plat sur la zone d'intérêt. Le talus lui-même (roches et remblais) apparaît comme une surface rugueuse par mesure GNSS.

Pendant toute la durée du projet, des levés de ce type ont été réalisés exclusivement par GNSS RKT (Trimble R8 base et module) avec une résolution centimétrique. Il n'y a jamais eu recours à un échosondeur dans le domaine marin vu les très faibles bathymétries sur la zone concernée. Les levés se sont concentrés essentiellement sur le site du PK 416, mais certaines campagnes ont été faites plus au Sud sur Sainte Marie ou au niveau de La Palme. En pratique, elles n'ont pas été utilisées dans la démarche de dimensionnement.

Les données acquises montrent qu'on a une relative stabilité du fond sur l'ensemble des parties couvertes, en particulier au niveau du site PK 416. La morphodynamique n'est donc pas un enjeu majeur à considérer dans la démarche d'optimisation de la solution.

Dans les travaux de modélisation numérique, on a utilisé un profil / MNT bathymétrique représentatif (comme celui de la figure 3.1) ou une version épurée de la micro-variabilité.

La figure 3.2 montre un exemple de profil épuré utilisé régulièrement avec certains des modèles numériques (Swash, Shoaling-Xpress, Xbeach) pour tester des configurations de solution ou vérifier certains comportements hydrauliques. Les travaux d'optimisation de forme avec l'outil de Gladys (Chapitre 4) sont également réalisés avec un fond simplifié comme celui-ci.

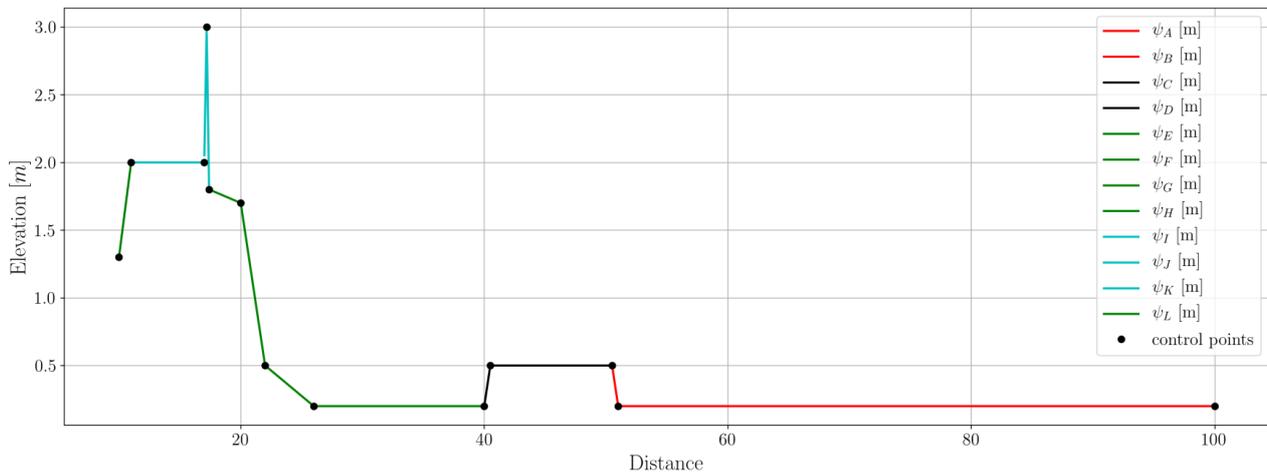


FIGURE 3.2 : Exemple de profil simplifié au travers du site expérimental du PK 416 (lieu probable de déploiement du prototype). Hérité des profils mesurés, ce type de profil est utilisé en simulation pour explorer les solutions. Sur cet exemple, on voit (en noir) un bloc rectangulaire posé sur le fond globalement horizontal. Cette donnée est utilisée comme condition de fond dans des modèles comme Xbeach, Swash ou Shoaling-Xpress décrits dans le texte. Il est également utilisé (en version 2D cartographique) dans les travaux de dimensionnement de la solution par optimisation de forme.

Plus précisément, dans l'outil d'optimisation de forme, on utilise une version épurée du fond comme dans la figure 3.2 et on fait varier légèrement le fond pour tester la sensibilité de la solution (en terme de service rendu) à cette variabilité. Si la solution est trop sensible à ces variations, ce n'est pas une bonne solution puisqu'elle est susceptible de ne plus être la solution optimale si le fond change trop. Les travaux de mesure topo-bathymétrique ont donc aussi permis d'estimer cette variabilité naturelle et borner les perturbations qu'on introduit dans l'outil d'optimisation. En pratique, on a introduit des variations libres du fond de l'ordre de 10 cm d'amplitude (en z) sur des longueurs d'ondes décimétriques à décimétriques.



2 Activités en lien avec la simulation numérique

2.1 Simulation numérique de la circulation locale et des vagues par modèle spectral

L'effort principal de simulation numérique a été mené avec le modèle Delft3D-SWAN déployé localement à l'échelle du site où le prototype doit être déployé. En particulier, c'est le modèle qui a été utilisé pour produire certaines grandeurs (hauteur de vague H , niveau d'eau moyen $\bar{\eta}$) requises dans la démarche de dimensionnement par calcul optimal présentée au chapitre 4.

La présentation du modèle est déportée en annexe B. Le domaine sur lequel les calculs ont été faits avec Delft3D-SWAN est indiqué sur la figure 4.4.

2.2 Autres efforts exploratoires de simulation numérique

D'autres modèles ont été utilisés pour explorer certains mécanismes, discuter des stratégies de protection, vérifier des hypothèses. Les modèles engagés reposent sur des hypothèses physiques différentes :

- code Gladys de calcul des modes propres (Helmoltz) pour vérifier l'existence d'ondes résonnantes stationnaires à l'échelle du bassin Nord de Bages-Sigean ;
- code Gladys de calcul de Berkhoff (equation de mild-slope elliptique) pour calculer la réfraction et réflexion du champ de vagues sur certaines structures pensées comme éléments de la solution ;
- Code REFDIF (v2.5)¹. Le code repose sur une équation de mild-slope couplée à une équation de diffraction (Mei99) dans une formulation parabolique (la réflexion des vagues n'est pas restituée). Le code a été utilisé pour préciser le comportement des vagues sur des idées de structures de protection imaginées au début du projet ;
- code Swash². SWASH est un outil numérique permettant de simuler les phénomènes d'écoulement et de transport instationnaires, non hydrostatiques, à surface libre et rotationnels dans les eaux littorale sous l'effet des vagues, des marées et du vent. Il a été utilisé pour analyser le comportement vague à vague de certains forçages météo-marins contre le talus de voie.
- Code XBeach³. XBeach est un modèle 2DH pour la propagation des vagues, les vagues longues et le flux moyen, le transport des sédiments et les changements morphologiques de la zone littorale, des plages et des dunes pendant les événement tempétueux. XBeach a été utilisé pour évaluer la réponse du fond aux forçages météo-marins lagunaires et les niveaux d'eau contre le talus de voie.
- Code Shoaling-XPress de calcul simple de la transformation des vagues par shoaling et déferlement géométrique. Le code a été utilisé pour tester de nombreuses formes de protection et évaluer rapidement la réponse en shoaling et déferlement.

Ces différents codes (sauf REFDIF et Helmholtz) ont été essentiellement déployés sur des profils 2DV comme sur la figure 4.4. En plus de la condition de fond, la plupart de ces modèles nécessitent la définition de propriétés rhéologiques/ de friction pour les matériaux constitutifs de l'interface eau/fond. La figure 3.3 montre un exemple de telle définition.

¹<https://www1.udel.edu/kirby/programs/refdif/refdif.html>

²<https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swash>

³<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>

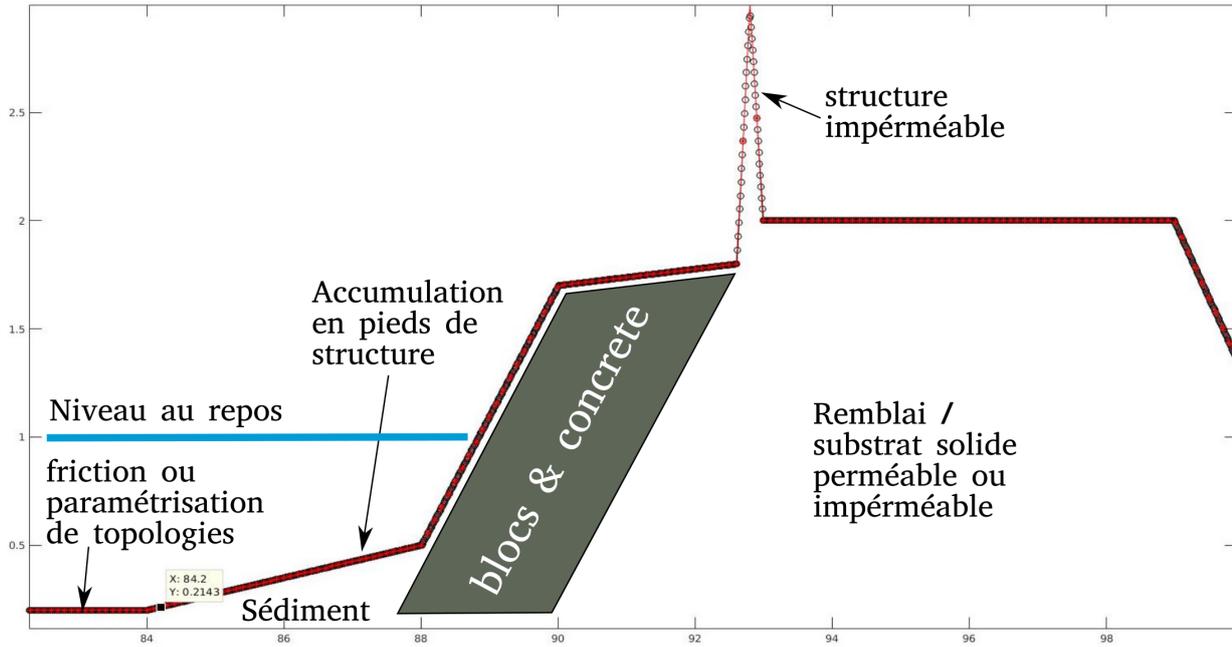


FIGURE 3.3 : Un exemple de paramétrisation des propriétés du fond pour les modèles exploratoires. Quand le modèle le permet ou le requiert, on doit préciser les propriétés dissipatives du fond et des structures aux conditions limite. Chaque modèle dispose de sa propre prise en charge de ces aspects là ; il n'y a pas de stratégie unique.

Les figure 3.4 et 3.5 sont des exemples de simulation.

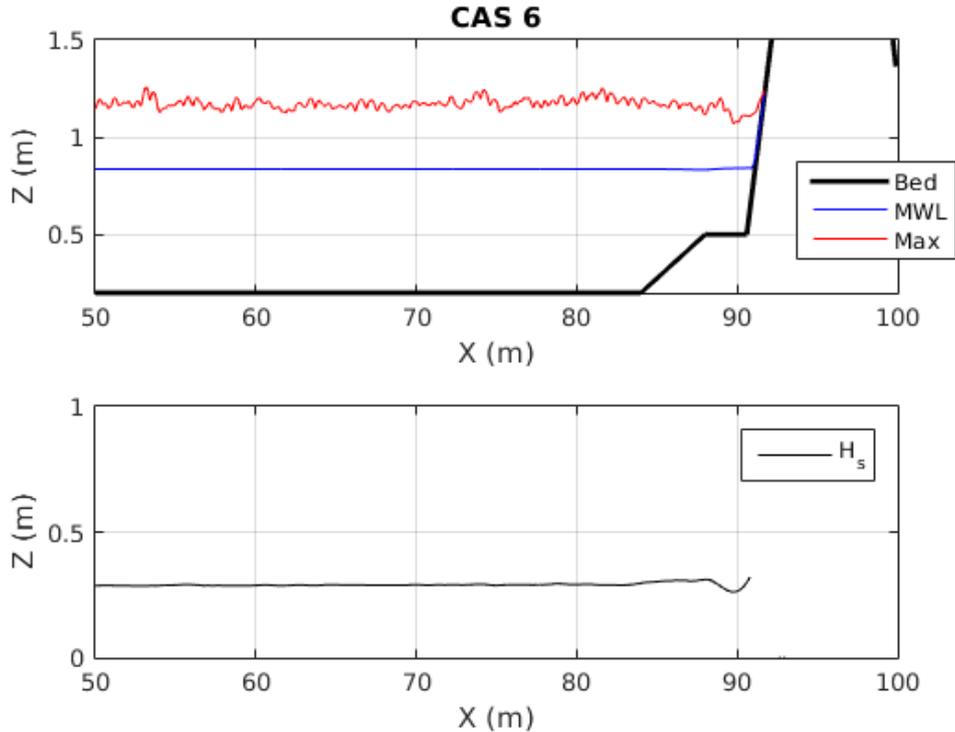


FIGURE 3.4 : Exemple illustratif de simulation avec Swash. Ce type de simulation a été utilisée pour analyser l'impact des vagues sur le talus de plage et la génération de surcôte. *Haut* : propagation du champ de vagues et surcôte (distance entre courbe rouge et bleu). *Bas* : calcul de l'évolution de la hauteur des vagues correspondante.

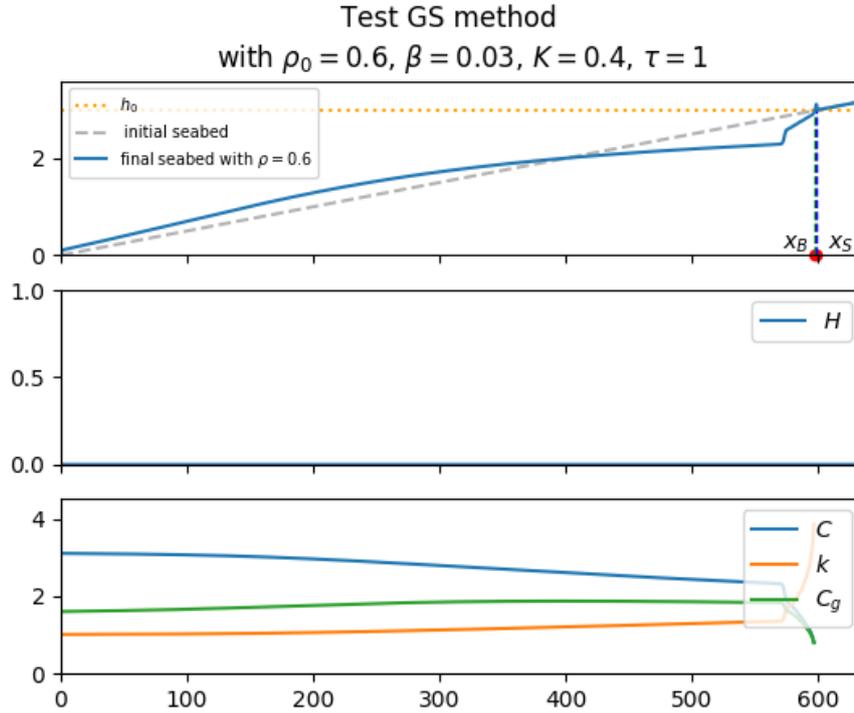


FIGURE 3.5 : Exemple illustratif de simulation avec Shoaling Xpress. Ce type de simulation a été utilisée pour analyser la transformation simple des vagues à l’approche du talus selon le profil morphologique.

3 Génération des séries synthétiques sous scénario et production de quantités physiques représentatives (vagues, niveaux)

Les travaux réalisés en dimensionnement ou analyse des processus réalisés sur la zone d’étude reposent sur la production de forçages en hauteur significative des vagues H_s , période pic T_p , angle d’incidence moyen θ_0 et niveau d’eau moyen $\bar{\eta}$. Les trois premiers de ces paramètres sont directement déduits de spectres de vagues fournis par l’expérimentation (ou les sorties de modèles dans le cas de simulations emboîtées), en partant de la définition de la hauteur significative suivante :

$$H_s = 4 \sqrt{\int_{\theta_0} \int_{\sigma} E(\sigma, \theta) . d\sigma d\theta} \quad (3.1)$$

où $E(\sigma, \theta)$ représente la densité spectrale d’énergie des vagues pour la fréquence σ et la direction θ . La fréquence pic T_p correspond à la fréquence du pic du spectre de $E(\sigma)$ (intégré en direction). La direction moyenne est la moyenne des directions pour chaque fréquence σ associée à une densité d’énergie non nulle, partant du principe que cette grandeur a un sens car le champ de vagues dans le GAM reste relativement étroit avec peu de mers croisées.

Ces trois grandeurs sont produites un peu au large de la zone où le prototype doit être positionné, en autant de points qu’on le souhaite, dans une profondeur d’eau de l’ordre de 2 m.

Le dernier paramètre statistique $\bar{\eta}$ est calculé à partir a) soit d’informations générales bien établies comme les caractéristiques de la marée, b) soit à partir d’hypothèses ”expert” comme par exemple pour la contribution de l’infra-gravité au niveau d’eau instantané pendant les tempêtes, c) soit à partir des paramètres de vagues précédents et d’informations morphologiques (pente de la plage par exemple) pour tout ce qui est surcôte ou run-up, d) soit à partir d’autres informations météo-marines comme

les caractéristiques du vent pour tout ce qui est contribution du fetch et de la pression à l'élévation de la surface libre. Le niveau total est calculé comme une somme de contribution, sans que l'on prenne en compte les interactions non-linéaires possibles entre les contributions ; une telle prise en compte n'a de toutes manières jamais été réalisée en sciences du littoral.

On décrit en annexe A la totalité de la procédure utilisée pour construire des synthétiques aussi précis que possible. A partir de cette méthode, on peut définir un ensemble de scénarios. Pour résumer, chaque scénario est construit sur la base d'un évènement énergétique comme par exemple celui décrit sur la figure A.4 et d'une tendance à l'élévation du niveau marin relatif. Les évènements tempétueux incluent des variations du niveau du à la marée, au setup, éventuellement l'infra-gravité, et bien évidemment des oscillations directement induites par les vagues. Dans le domaine spectral, ces signaux sont représentatifs de conditions de vagues H_s et T_p dont la période de retour égale celles des conditions observées actuelles, éventuellement modifiées selon une prospective (par exemple, pour illustration, un scénario d'augmentation de 30% de l'énergie des vagues en 20 ans).

On peut alors ensuite utiliser librement ces grandeurs physiques prospectives (synthétiques) dans tout travail nécessitant de telles données. Sur un site d'étude où il n'existe pour caractériser l'hydraulique locale que les campagnes de mesures réalisées par GLADYS, cette stratégie est la plus robuste.

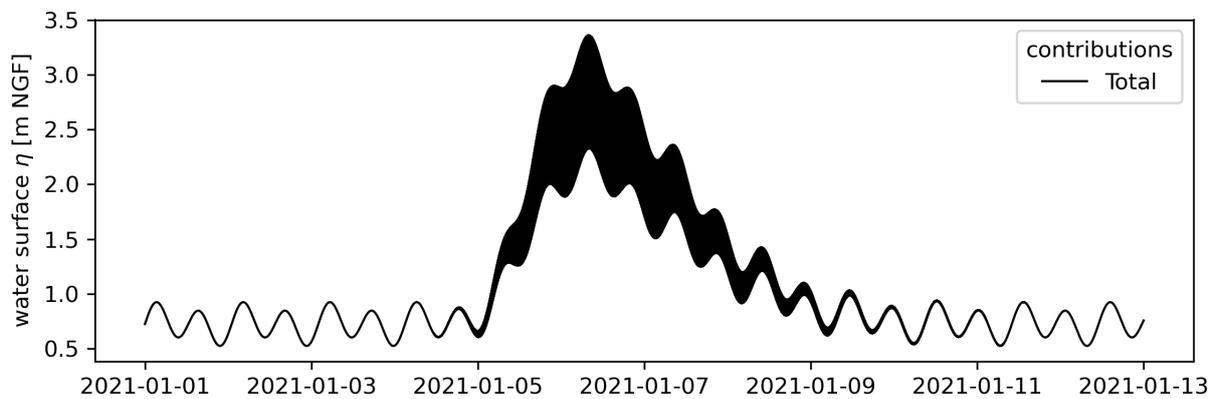


FIGURE 3.6 : Un exemple d'évènement très énergétique (peu réaliste sur le site d'étude) sur une durée de 13 jours. Les forçages météo marins synthétiques sont construits à partir des H_s et T_p déduits de ces séries, qui sont reproduites en temps sur des durées aussi longues que nécessaires. Les conditions de vagues sont aussi associées à une évolution du niveau moyen à la hausse selon un scénario choisi. On voit bien également la signature de la marée (oscillations bi-diurne), celui du setup atteint pendant la tempête (la forme en cloche principale), et l'augmentation des conditions de vagues (la partie foncée au centre, qui masque en fait le fait qu'on a des oscillations plus fortes qu'au début et à la fin de l'évènement parce qu'on a des vagues, c'est à dire des oscillations haute fréquence du niveau d'eau qui se superposent entre-elles à cette échelle de représentation).

4 Activités en lien avec la mesure hydraulique

Tout au long du projet, des campagnes de mesure hydraulique (vagues, niveau d'eau, courantologie, ensemble ou séparément selon le besoin) ont été réalisées sur la lagune de Bages-Sigean, et plus particulièrement à partir de 2021 sur le site du prototype au PK 416, pour caractériser l'hydraulique à proximité de la voie ferrée et son talus. Le nombre d'expérimentations réalisées en pratique est mal défini dans la mesure où une bonne partie de ces opérations ont été menées ponctuellement pour répondre à des questions précises au fil du déroulement du projet sans volonté de bancarisation et consolidation de la mesure.

Les déploiements principaux sont les suivants :

- un déploiement central situé sur le PK416 sur le lieu probable du futur prototype (Figure 3.8). Ce déploiement (en pratique une série de déploiements sur structures fixes, sur des périodes

variables selon besoin) a été le plus instrumenté et les données ont été utilisées pour choisir les caractéristiques des modèles numériques utilisés pour l'optimisation de forme ;

- des déploiements courts (quelques semaines) plus exploratoires, en début de projet, pour définir le site d'expérimentation (Figures 3.9, 3.10 et 3.11). Le site PK416 a été retenu en partie pour la simplicité de ses forçages météo-marins par rapport au PK420 ou PK435.

La figure 3.7 montre quelques une de ces activités de terrain à titre illustratif.

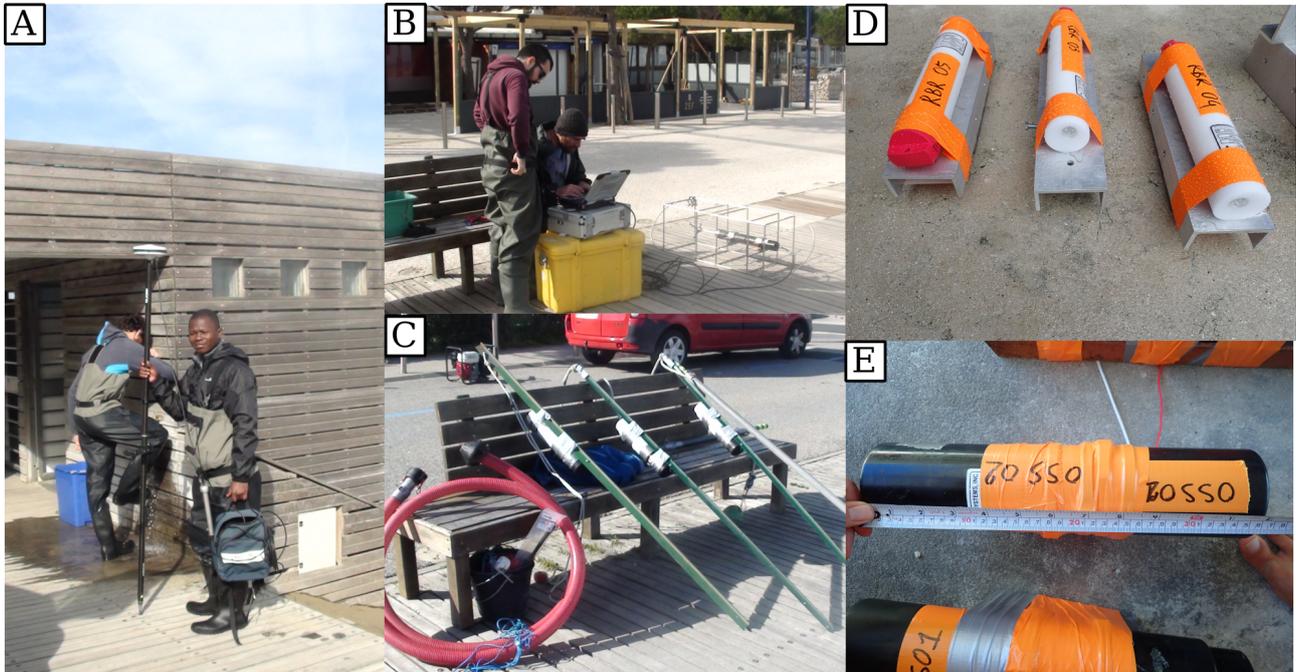


FIGURE 3.7 : Exemples d'activité de terrain. A : Opérateur de terrain pour mesure GNSS (avec une canne et un dispositif RTK). B : séance de programmation d'instrument (ADV) avant déploiement en lagune. C : perches (à enfouir dans le sédiment lagunaire) portant des appareils de mesure. D : pressiomètres de type RBR Ruskin installés sur des supports poids posés sur le fond de la lagune. E : pressiomètres OSSI en préparation pour déploiement en lagune.

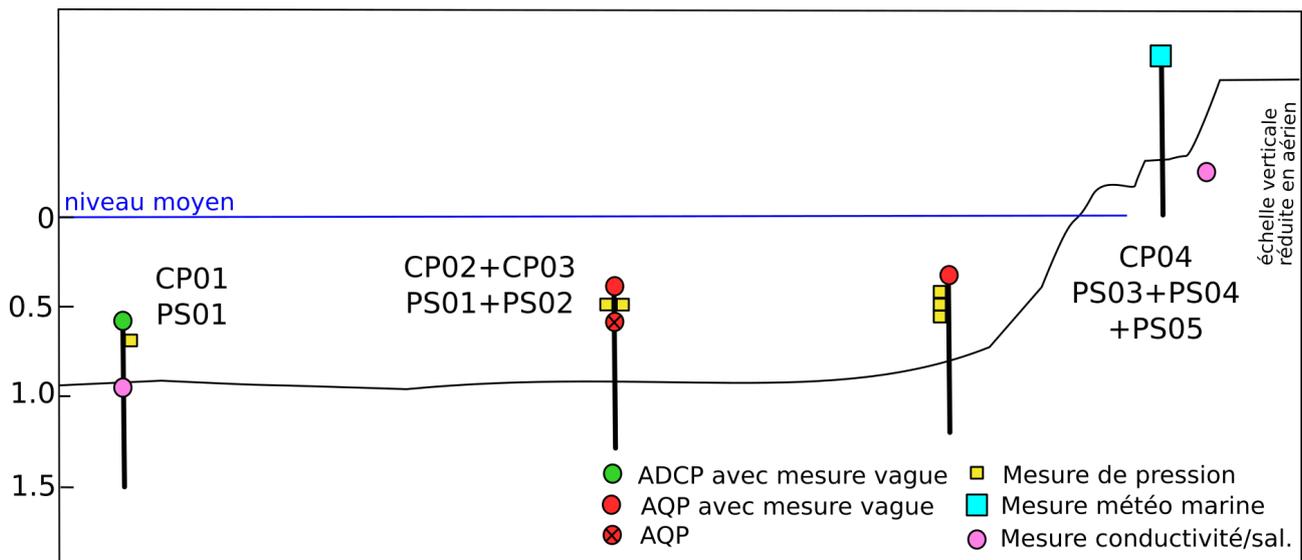


FIGURE 3.8 : Le déploiement principal au niveau du PK416 a été organisé autour de 3 stations de mesures (à des distances variables à la voie au cours du temps). Les instruments étaient déployés sur des pieux enfoncés dans le sédiment par jetting. Les données ont été utilisées pour mieux comprendre certains mécanismes locaux, estimer la dissipation naturelle sur le profil, caractériser la réflexion et choisir les modèles numériques à mettre en oeuvre pour l'optimisation.

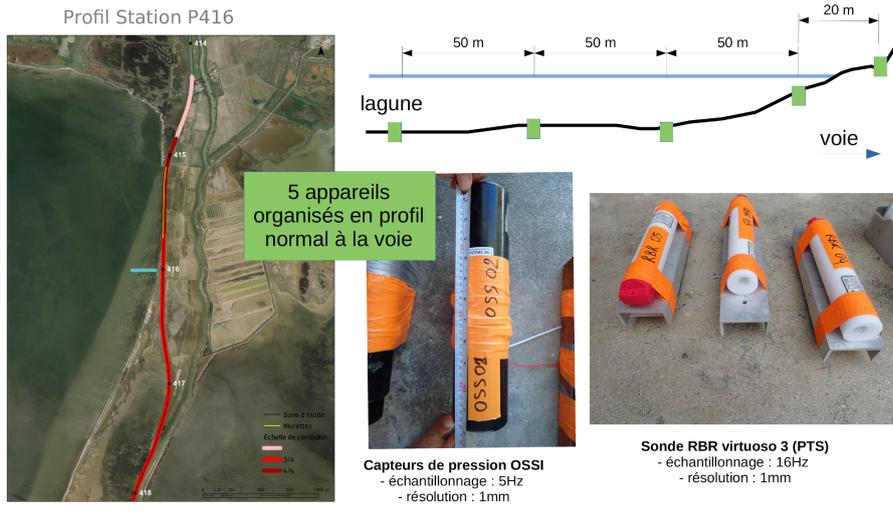


FIGURE 3.9 : Déploiement type au PK416 pour analyse propagation de vagues

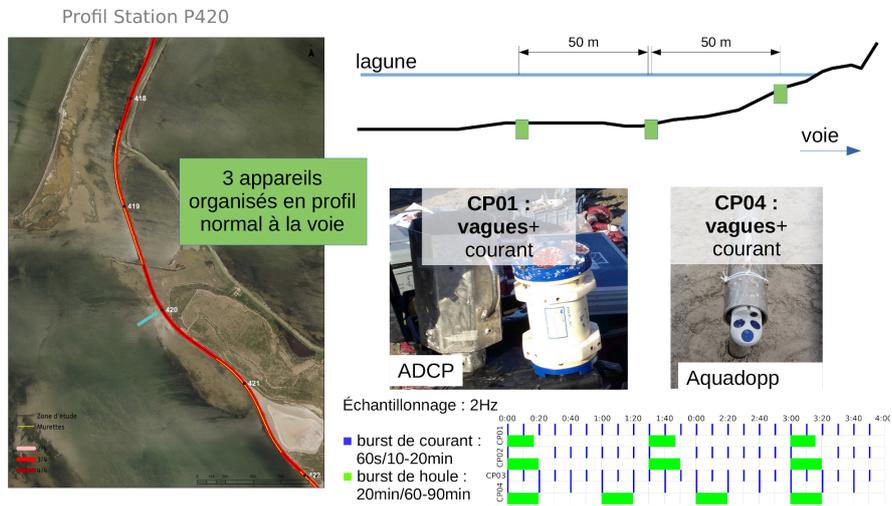


FIGURE 3.10 : Déploiement type au PK420 pour analyse propagation de vagues et effets de dérive littorale

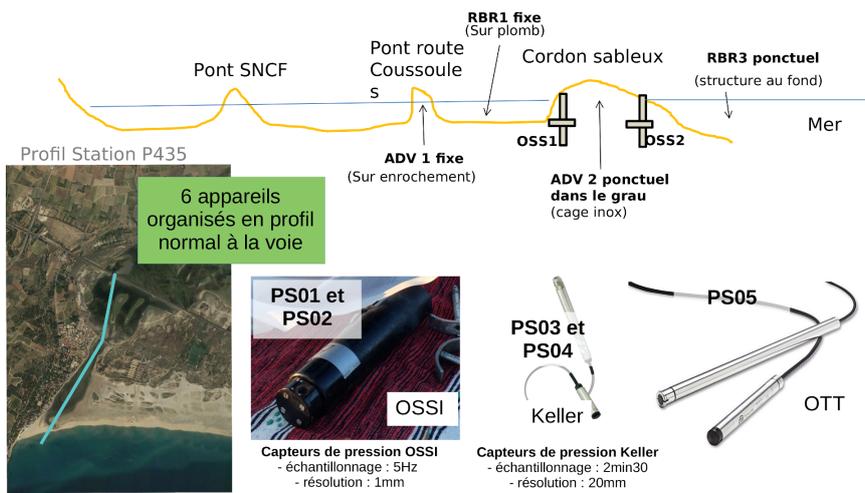


FIGURE 3.11 : Déploiement type au PK435 pour analyse propagation de vagues et flux au niveau des passes

La figure 3.12 est une simple illustration des spectrogrammes (contenu fréquentiel du champ de vagues) obtenus à partir de ces campagnes. Les spectrogrammes permettent de calculer des propriétés statistiques des vagues (hauteur significative H_s , période pic T_p ,...) au cours du temps. Ils peuvent être aussi utilisés pour l'élaboration de synthétiques comme indiqués dans la section 3. Ce sont donc des éléments importants dans la démarche de recherche de solution.

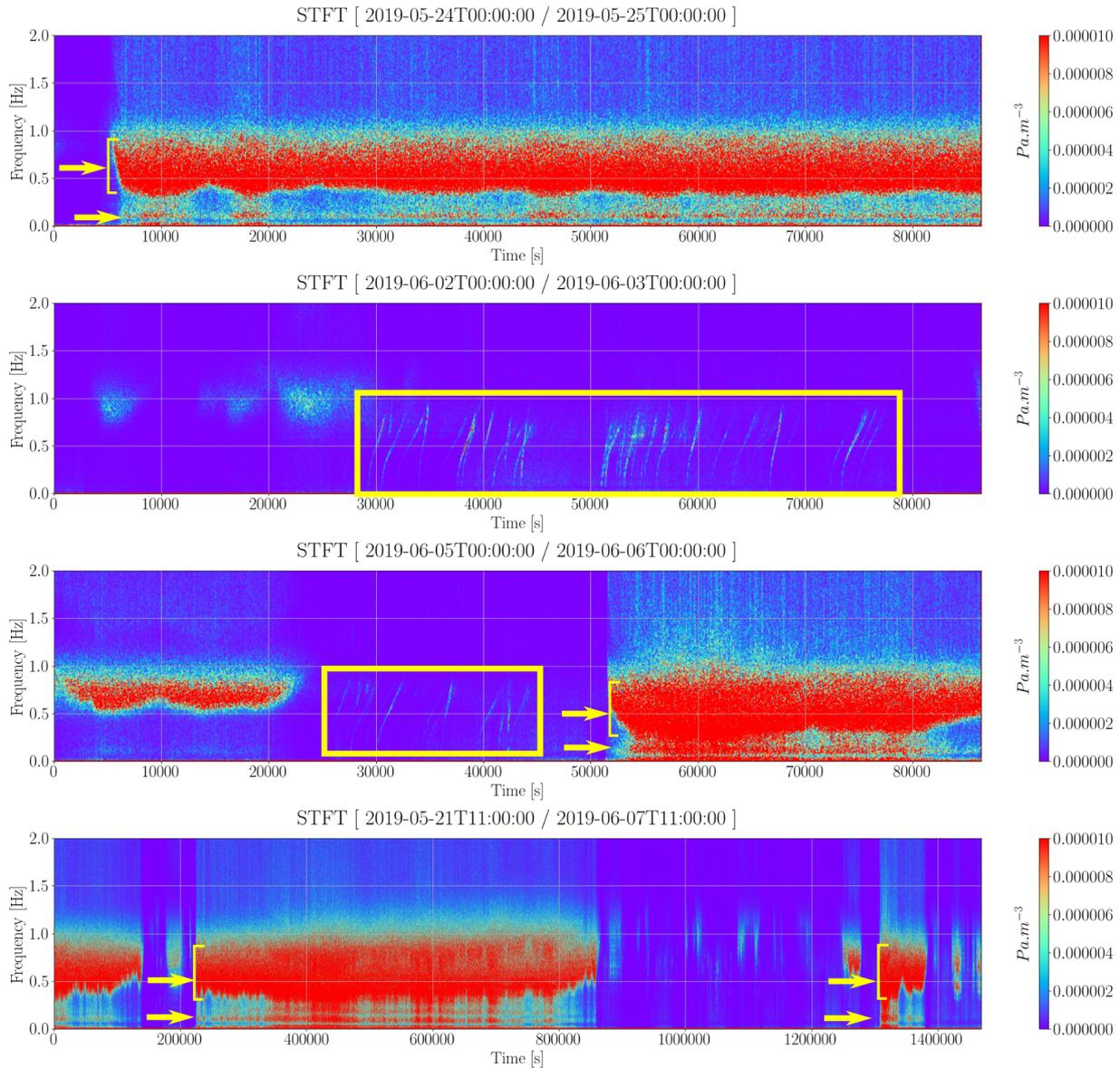


FIGURE 3.12 : Spectrogrammes établis à partir d'une série temporelle de mesure de la pression acquise dans la lagune au PK416 entre les 24 et 25 mai 2019. Sur cet exemple illustratif, on voit clairement de l'énergie dans une mer de vent résiduelle ou des rides de beau temps. On voit également de l'énergie ponctuellement (et cycliquement) sur un champ de vagues résiduel (autour de 0.1Hz). Sur cette figure, on remarque surtout la présence (cadres jaunes) de petites signatures énergétiques durant quelques minutes et se déplaçant en fréquence (des basses vers les hautes) autour de 0.5 Hz. Après analyse, ces signatures très singulières correspondent au passage des trains, induisant des vibrations du plan d'eau et donc une signature en pression. Le décalage en fréquence pourrait être dû à un effet Doppler du fait du déplacement de la source de ces vibrations (le train en mouvement).



Chapitre 4

Stratégie de dimensionnement et mise en oeuvre à Bages-Sigean

Dans ce chapitre, on reformule tout d'abord la problématique en termes strictement hydrauliques et en épurant tout ce qui ne relève pas de l'optimisation au sens strict. On présente ensuite un ensemble de concepts et le vocabulaire nécessaire à la compréhension des outils mis en oeuvre plus loin et on en profite pour préciser les paramètres qu'on peut envisager de faire varier sur les solutions optimisées qui sont recherchées. Dans une troisième section, on réalise le délicat exercice consistant à décrire la démarche du calcul optimal en termes vulgarisés, mais suffisamment précis pour garantir une bonne compréhension des calculs réalisés. Dans une quatrième section, on décline de manière pratique la méthode utilisée pour le dimensionnement optimal sur le site de Bages-Sigean.

1 Reformulation hydro-morphodynamique du problème

L'ambition du projet est de minimiser l'arrivée des aérosols sur le talus de voie et d'empêcher le franchissement des vagues vers la voie, en disposant devant le talus de voie (i) un dispositif de contrôle de l'hydraulique dans la lagune qui est à définir et (ii) un dispositif anti-franchissement sur le talus. Le dispositif anti-franchissement, nécessairement bas du fait des contraintes imposées, ne peut avoir qu'un rôle très limité dans l'arrêt des aérosols en transit vers la voie. On fait donc intégralement reposer sur le dispositif situé dans la lagune la responsabilité de limiter ce flux. Inversement, on ne peut pas exclure que le dispositif dans la lagune puisse avoir un rôle même indirect sur le franchissement.

Les dispositifs anti-franchissement envisageables relèvent tous de l'ingénierie (classique ou R&D) et leur forme a pour but essentiel de (i) barrer la route à la lame d'eau, (ii) renvoyer la lame d'eau en arrière en minimisant son déport vertical au dessus de la structure qui, en présence de vent, peut induire des franchissements non souhaités. Les formes garantissant une protection maximale sont connues et correspondent à des structures avec un flanc courbe face aux vagues, comme ce qui a été indiqué qualitativement dans le chapitre 2. Il ne relève pas du travail de dimensionnement optimal dans ce projet de donner la forme exacte d'une telle solution. En effet, le prototype opérationnel sera réalisé par une entreprise qui amènera avec la solution anti-franchissement son expertise sur la forme de celle-ci. Pour la suite, on enlève donc du travail d'optimisation le dispositif anti-franchissement, partant du principe qu'il sera déjà dimensionné ; sa capacité éventuelle à aider au contrôle des aérosols ne sera pas du tout discutée.

Sur le site de Bages-Sigean, on peut donc reformuler la problématique sous la forme d'une première question déjà plus ciblée : **quelle est la nature et la forme d'un dispositif déployé dans la lagune permettant de minimiser (i) la charge d'aérosols au niveau de la voie et (ii) le franchissement.**



Pour traiter la charge en aérosols, l'idée qui consisterait à modéliser (en présence de solutions) la concentration en aérosols dans un contexte si complexe que celui du site d'étude serait une erreur, les incertitudes sur ce type de calcul étant trop fortes. Il est beaucoup plus pertinent de reformuler le problème d'une autre manière en s'appuyant sur des grandeurs qu'on peut étudier de manière plus robuste. Comme on l'a vu au chapitre 1, la charge en aérosol est directement liée à la capacité du vent à emporter des particules d'eau à l'interface air/eau, elle-même déterminée par la vitesse du vent et la rugosité de la surface de l'eau, c'est à dire l'agitation par les vagues. Avec les dispositifs envisagés pour le prototype (Chapitre 2), on n'a aucun contrôle possible sur la vitesse du vent elle-même. Par contre, on peut travailler sur la minimisation de la rugosité de surface et donc l'agitation des vagues.

De même, pour traiter le franchissement, il est totalement illusoire de chercher à modéliser un dispositif dans la lagune dans la perspective de contrôler directement le franchissement au niveau du talus (où on place en outre un autre dispositif dont on ne sait que peu de chose à ce stade). Par contre, il est tout à fait raisonnable de formuler l'idée que maintenir le niveau d'eau aussi bas que possible devant le talus de voie est un facteur clair de réduction du risque de franchissement de ce même talus.

On peut donc encore reformuler la problématique pour la partie du projet concernant l'optimisation de la solution de la manière suivante :

quelle est la nature et la forme d'un dispositif déployé dans la lagune permettant de minimiser (i) l'agitation à l'interface air/eau sur le domaine d'étude et (ii) le niveau d'eau moyen devant le talus ?

Cette reformulation de la problématique permet en particulier de définir des dispositifs dont le rôle est de modifier le comportement de l'environnement marin dans lequel ils sont eux-mêmes déployés, et non pas un milieu adjacent. En outre, les mécanismes que doivent contrôler ces dispositifs sont tous relatifs aux vagues, à la courantologie et au niveau d'eau, donc restent dans le cadre strict de l'hydraulique en faible profondeur d'eau. Ces deux remarques fondamentales montrent que la stratégie choisie apporte de la robustesse à la démarche d'ensemble car la physique finalement considérée est bien mieux contrainte et connue que dans la première formulation. Dans la suite de ce travail, on s'applique à mettre en oeuvre une démarche de dimensionnement optimal pour résoudre strictement cette « problématique reformulée » à l'exclusion de toute autre considération.

2 Identification d'une famille de solutions raisonnables

2.1 Les concepts de module, matériaux et forêt

En dimensionnement optimal, on propose de décrire les solutions sur la base de trois notions :

- le concept de **module** : c'est la notion fondamentale dans notre approche. Le module représente la plus petite unité indivisible constituant une solution. Une solution est construite sur l'accumulation et l'association de modules, et peut être éventuellement basée sur différents types de modules. Par définition, une partie de module ne peut pas être utilisée en tant que telle dans une solution. Si cela doit être, il faut envisager cette partie comme un module différent. Cette démarche permet d'associer le module à un ou plusieurs **services élémentaires** rendus bien déterminés (dissipation des vagues, déviation du courant, contrôle de la turbulence, blocage sédimentaire ; voir section 2.2). En outre, cette règle permet d'imaginer la conception et la construction des modules d'une manière systématique (coût réduit, création d'une filière éventuelle). Enfin, le travail d'étude du comportement du module (résistance, comportement hydraulique, caractérisation de propriétés diverses) est plus simple et plus efficace si ceux-ci sont en nombre limité et sont parfaitement définis. Bien évidemment, les modules peuvent évoluer au fur et à mesure que les travaux de R&D portant sur la compréhension de leur effet avancent.

- **les matériaux** : ce sont les constituants permettant de construire un module. Les matériaux répondent en général à des attentes précises en terme de réglementation (pas de plastique en mer par exemple) de respect environnemental (revêtement non polluant, matériaux naturels obligatoires,...) ou de rhéologie (être capable de résister aux sollicitations subies dans sa configuration de déploiement au sein du module). Des matériaux différents peuvent former le même module (par exemple des tiges de bois ou de métal associées pour former une structure poreuse). Toutefois, la nature des matériaux participe à l'action du module (sur le même exemple, des tiges en bois et en métal n'ont pas la même rugosité de peau, ne sont pas concernées de la même manière par le foiling, n'ont pas la même élasticité sous déformation, ...). Plus fondamentalement, le choix de certains matériaux peut largement orienter la nature profonde du module. Par exemple un module reposant sur l'association de matériaux de forme sphérique va pouvoir agir sur l'hydraulique seulement de certaines manières bien précises ; le choix du matériau conditionne aussi en partie la géométrie du module et son potentiel ;
- la notion de **forêt** (sous entendu forêt de modules) : la forêt est une association de un ou plusieurs types de modules tels que définis ci-dessus assurant à l'échelle d'un site d'étude le service attendu, c'est à dire qu'il permet de répondre à l'attente formulée. La différence entre le module et la forêt est que la forêt utilise les services élémentaires offerts par les modules pour permettre un contrôle de l'hydro-morphodynamisme d'une part à plus grande échelle, et d'autre part d'une manière plus fine. En d'autres termes, une forêt fait ce qu'un module ne peut pas faire. Certaines forêts sont de simples associations de modules répétés à l'identique sur un domaine grand devant la taille du module. D'autres forêts combinent un ou plusieurs types de modules pour assurer un service hydro-sédimentaire beaucoup plus complexe que ne le permet un ou plusieurs types de modules considérés séparément. La forêt est avant tout définie par sa position générale sur le littoral, sa forme et l'agencement (densité, position relative, ...) des modules qui la composent.

2.2 Les services hydro-sédimentaires rendus par les modules et forêts

L'expérience acquise sur les questions de dimensionnement optimal (Aperçu dans l'annexe C) incite à formuler systématiquement la question du service hydro-sédimentaire rendu sous la forme d'une altération d'une des formes d'énergie qu'on peut trouver au sein du système étudié (Figure 4.1).

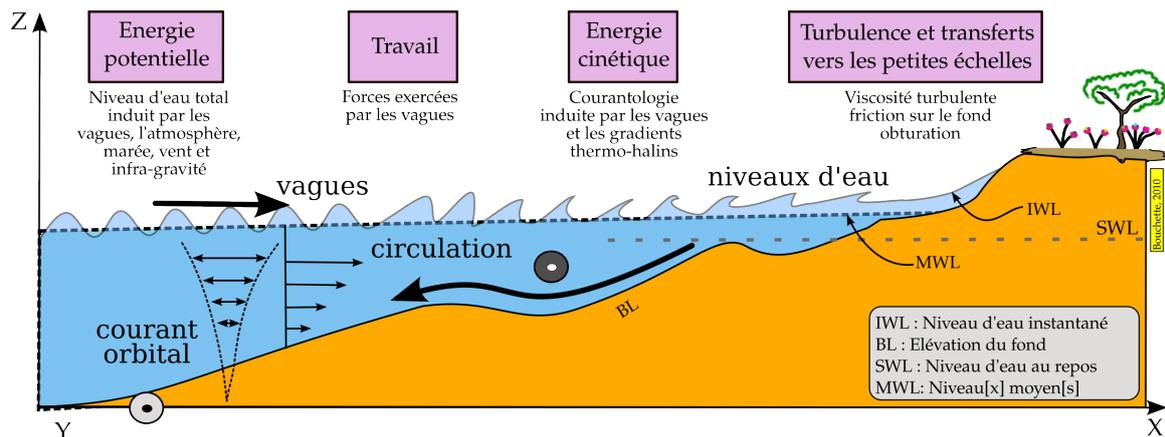


FIGURE 4.1 : Les quatre formes d'énergie qu'on peut considérer en zone littorale pour reformuler les services hydro-sédimentaires rendus par des modules ou des forêts. Les grandeurs qui sont décrites ici sont toujours moyennées en temps et dans l'espace *ab minima* à l'échelle de la vague. L'énergie potentielle représente l'état du système vis à vis de l'accumulation d'eau sur la verticale (effet de la pression atmosphérique, surcôte, setup du au vent,...). L'énergie cinétique représente l'état du système vis à vis du transport de masse d'eau par la circulation régionale, la présence de vagues, la présence de vent. Le travail (même dimension qu'une énergie) représente l'état du système vis à vis des forces horizontales induites par la présence de vagues. L'énergie turbulente et la dissipation décrivent l'état du système vis à vis de l'ensemble de l'énergie cascasant vers la petite échelle (tourbillons, dissipation par viscosité, par frottement sur le fond, chaleur,...). Un système littoral est capable de transformer une énergie en une autre, à l'exception de la turbulence/dissipation qui peut recevoir mais pas donner.

On ramène ainsi l'analyse de la dynamique littorale à l'évolution de quatre grandeurs physiques parfaitement définies. Ceci étant convenu, on peut ensuite décrire et classer l'ensemble des dispositifs de protection déjà conçus et déployés en génie côtier (modules et forêts) sous la forme d'**une famille de 5 services hydrosédimentaires élémentaires** (Figure 4.2). Un module ou une forêt donnés peuvent bien sur rendre plusieurs services hydro-sédimentaires. Souvent, on désigne un module ou une forêt avec un nom évoquant le service hydro-sédimentaire dominant (par exemple, un dispositif de type « atténuateur de vague »).

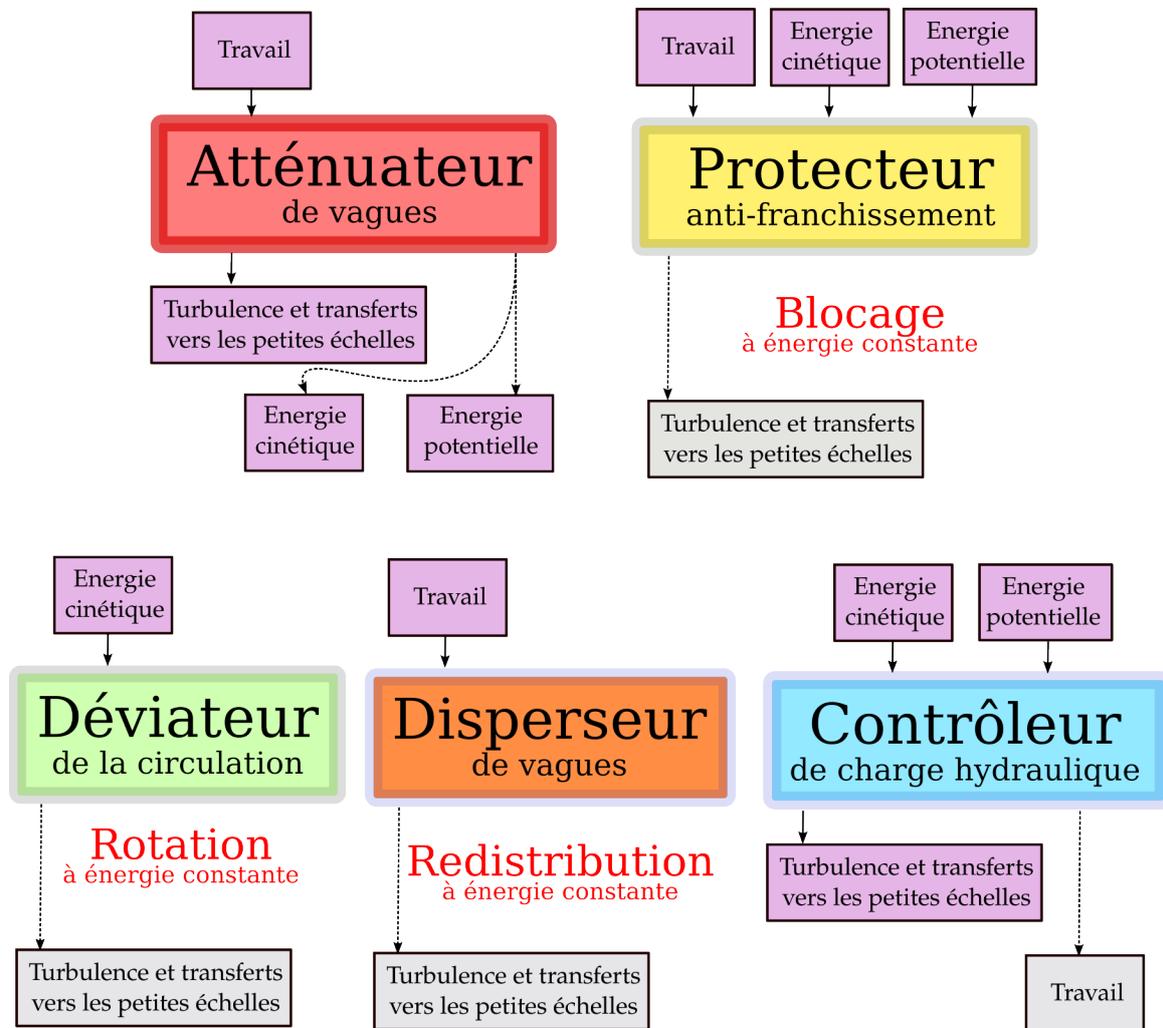


FIGURE 4.2 : Les 5 services hydro-sédimentaires élémentaires permettant de construire n'importe quel service hydraulique pour un module ou une forêt. L'atténuateur (sous-entendu de vagues) transforme du travail en turbulence/dissipation d'une part, et peut avoir un effet secondaire (potentiellement non voulu) de production de courant et de niveau d'eau. Le protecteur anti-franchissement est essentiellement une barrière qui renvoie toutes les formes d'énergie, et peu avoir un effet dissipatif. Le déviateur de circulation est capable de faire pivoter à énergie constante le champ de vitesse ; marginalement, il peut participer à la dissipation. Le disperseur de vagues est un dispositif qui modifie les directions de propagation du champ de vagues à énergie totale constante ; à l'aval d'un disperseur, la densité d'énergie spectrale peut être augmentée ou abaissée selon que le disperseur a eu tendance à concentrer ou au contraire écarter les directions de propagation du spectre ; marginalement, le dispositif peut participer à la dissipation. Le contrôleur (sous-entendu de charge hydraulique) est capable à partir de courant et de niveau de créer de la turbulence ; en d'autres termes, le dispositif peut réduire la charge hydraulique (produit du niveau moyen par la vitesse intégrée) ; accessoirement le dispositif peut créer du travail (création d'un mascaret, création d'ondulations à l'aval de la structure,...).

Dans la suite, en combinant (i) les contraintes sur les dispositifs que le partenariat peut accepter et (ii) la problématique reformulée, on peut proposer un cadre général pour la recherche d'une solution optimale, qu'on va décliner en forêts. Il appartiendra aux entreprises mandatées pour la réalisation du prototype opérationnel de préciser les modules constitutifs des forêts demandées.

2.3 Services hydro-sédimentaires et forêts retenus pour Bages-Sigean

L'objectif reformulé/recentré du projet est de **minimiser l'agitation dans le domaine littoral et le niveau d'eau devant le talus de voie**. On fait le choix de traiter cette question en séparant le problème en deux sous-problèmes distincts, à savoir celui de l'agitation d'une part et celui du niveau d'eau de l'autre. On va donc considérer **deux forêts distinctes**, l'une principalement consacrée à la réduction de l'agitation, l'autre au contrôle du niveau d'eau. La stratégie doit pouvoir garantir qu'aucune des deux forêts ne travaille contre le service hydro-sédimentaire dominant de l'autre. Ainsi, on envisage dans la lagune :

- une forêt rendant un service de déviateur ou déviateur-contrôleur (selon les caractéristiques du produit proposé par l'entreprise choisie pour cette partie du travail), qu'on appellera simplement **déviateur** dans la suite. Le service de type contrôleur garantit une réduction de la charge donc potentiellement du niveau. Le service déviateur peut permettre d'évacuer l'eau qui s'accumule à la côte plus rapidement et contribuer au maintien d'un niveau bas contre l'ouvrage ;
- une forêt rendant un service d'**atténuateur** de vagues qui agit directement sur l'agitation de surface (et donc sur la rugosité de l'interface air/eau).

2.4 Service hydro-sédimentaire secondaire opportuniste en appui

Lorsqu'il s'agit de protection des plages contre la submersion – ce qui n'est pas strictement le cas ici – une solution en génie côtier consiste à reconstituer une plage sableuse large et bien nourrie en sable qui fait office de zone tampon entre la mer et les enjeux et permet de minimiser (en général avec un cordon dunaire bien entretenu) les effets de la surcôte. Pour cela, on utilise en dimensionnement une caractéristique relativement universelle des littoraux sableux, à savoir le fait que les vagues au dessus d'un certain seuil (dites « destructives ») ont tendance à prendre du matériel sédimentaire à la plage et le déporter au large pendant que les vagues plus modérées (dites « constructives ») ramènent du sable vers la plage émergée (Figure 4.3). Ce constat à l'esprit, on dimensionne un dispositif qui maximise les petites vagues et minimise les grosses. En d'autres termes, on cherche un atténuateur avec une fonction de filtre passe bas (au sens des petites vagues).

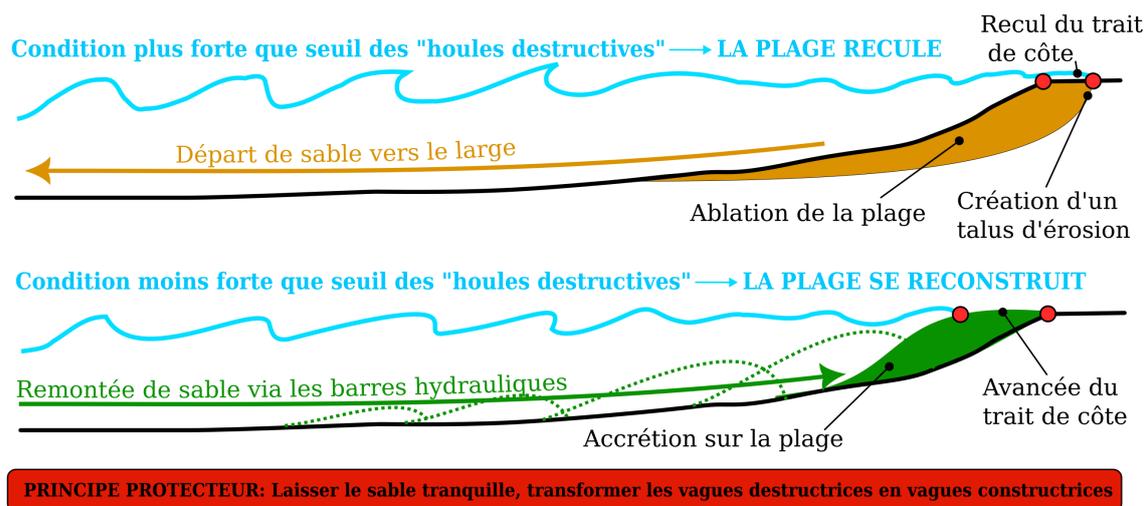


FIGURE 4.3 : Le principe selon lequel les grosses vagues « destructives » ont tendance à déporter du sable vers le large et les petites vagues « constructives » à le ramener à la côte détermine la dynamique du trait de côte. En d'autres termes, si on veut élargir une plage, il ne faut surtout pas supprimer les petites vagues, mais seulement transformer les grosses vagues en petites vagues, maximisant le potentiel constructif du système. Ce principe n'est pas directement nécessaire au traitement de la problématique à Bages-Sigean mais son utilisation peut améliorer l'efficacité de la solution d'ensemble.



Dans le cas des travaux sur Bages-Sigean, on ne cherche pas particulièrement à élargir une plage ou travailler sur la mobilité sédimentaire. Par contre, on a déjà convenu de baser la solution pro parte sur un service atténuateur. Ayant en tête le principe décrit sur la figure 4.3, on peut envisager de demander à cet atténuateur d'être filtre passe bas, de telle sorte qu'il dispose de la capacité à maximiser le retour de sable sur le haut du profil, c'est à dire en pieds de talus. Si suffisamment de sable s'accumule au pieds de la voie, on dispose d'un tampon protecteur renforçant la dissipation des vagues à l'approche du talus et donc le service atténuateur de la forêt elle-même.

Dans le travail sur le dimensionnement plus bas, on a cherché la forme de forêt idéale qui renforce cet effet de retour de sable.

3 Méthode de dimensionnement optimal

3.1 Le principe

Le dimensionnement de la solution consiste à proposer une configuration idéale – c.a.d que chaque forêt est placée au mieux – apportant la meilleure réponse possible au problème tel qu'il est posé dans problématique reformulée. Pour cela, nous faisons appel à une approche par **théorie de l'optimisation de forme et de placement** (OFP) qui a été développée à l'Université de Montpellier par B. Mohammadi et F. Bouchette, ainsi que plusieurs de leurs doctorants, et qui a fait ses preuves en génie côtier. Cette méthodologie s'appuie sur les concepts suivants :

- on définit un domaine spatial Ω (typiquement la portion de lagune devant la voie ferrée concernée par la corrosion) dans lequel on définit une série de sous-domaines $(D_i)_{i \in [1;N]} \subset \Omega$; dans la suite, on indicera avec un mot-clé pour être plus parlant (par exemple D_{F1} pour décrire un sous-domaine en lien avec une forêt $F1$) ;
- on se donne un ou plusieurs modèles physiques (numériques ou analytiques) sur Ω qui sont capables de calculer raisonnablement des quantités $(U_j)_{j \in [1;M]}$ (M quelconque mais < 10 est un bon ordre de grandeur) définies sur cet espace Ω , comme la hauteur des vagues, leur période, une vitesse moyenne de courant, un flux,... ;
- on définit une grandeur scalaire \mathcal{J} appelée fonctionnelle qui est représentative de l'état du système Ω étudié vis à vis des services hydro-sédimentaires, et on exprime cette fonctionnelle comme la somme d'intégrales sur les fonctions (F_j) de \mathbb{R}^N dans \mathbb{R} des paramètres (U_i) susmentionnés. La fonctionnelle \mathcal{J} s'écrit donc

$$\mathcal{J} = \sum_{i=1}^N J_i \quad \text{avec} \quad J_i = \int_{D_i} F_i(U_1, \dots, U_M) dx \quad (4.1)$$

- chacun des termes intégraux de l'Eq. 4.1 porte sur un sous-domaine D_i où doit être calculé une certaine physique F_i pour rendre compte d'une partie de l'état du système. La fonction F_i peut inclure le calcul de différentes conditions de forçage pour rendre compte correctement de l'état moyen du système (par exemple sur une période annuelle). A titre d'illustration, sur Bages-Sigean, on peut imaginer qu'on doit rendre compte de plusieurs conditions de vagues entrantes représentatives de la variabilité des vents incidents à l'origine des mers de vent, et en tenant compte de leur poids respectif sur l'année ; dans ce cas, F_i s'écrit sous la forme d'une somme pondérée du même calcul (avec le modèle adéquat) mais pour chacune des conditions représentatives du régime annuel ;
- pour garder un sens physique clair à la démarche – même si la théorie ne le nécessite pas – il convient que tous les termes J_i aient la même dimension physique ;



- On définit ensuite un vecteur $(\Psi_k)_{k \in [1;K]}$ où K peut être très grand (plusieurs centaines ou milliers). Ce vecteur représente une **configuration**, c'est à dire l'ensemble des paramètres qu'on peut faire évoluer sur la forêt considérée, et dont on veut connaître la meilleure combinaison. On appelle espace des configurations \mathcal{P} l'ensemble des vecteurs Ψ possibles et la solution optimisée est dans \mathcal{P} ;
- le problème optimal est alors reformulé de la manière suivante :

$$\text{Trouver } \Psi \text{ tel que } \min [\mathcal{J}] \quad (4.2)$$

- Pour mener à bien cette tâche, on a recours à une méthode de descente de gradient, c'est à dire une recherche récursive par tirs successifs du minimum de la fonctionnelle \mathcal{J} , ce qui revient à résoudre en Ψ , avec un critère d'arrêt convenu, l'équation vectorielle

$$\Psi_t = -\rho \nabla_{\Psi} \mathcal{J} \quad (4.3)$$

où ρ est un petit scalaire (typiquement 10^{-2} à 10^{-4}). En pratique, on peut imposer des contraintes quelconques sur $\nabla_{\Psi} \mathcal{J}$ qui font que le Ψ retenu correspondra à un fonctionnelle \mathcal{J} plus grande, mais plus réaliste car en accord avec l'observation (contraintes sur la morphologie, contraintes sur l'emplacement de la solution, contraintes sur les propriétés du milieu,...). Pour ce faire, on dispose de plusieurs stratégies dont a) des techniques jouant sur les variations de la valeur de ρ , b) des méthodes de pénalisation, c) des méthodes de projection et d) des méthodes de contrôle direct de la configuration (refus du résultat d'un tir). L'introduction des contraintes est subtile et fait toute la puissance de l'approche par optimisation ; la description des mécanismes de prise en compte de ces contraintes est un sujet au delà du cadre de ce document, mais plusieurs d'entre elles ont été mobilisées dans ce travail.

3.2 Démarche précisée pour la problématique Bages-Sigean

Dans le cadre de l'approche théorique qui est donnée ci-dessus, après un travail d'analyse approfondi et plusieurs tests, on a convenu de définir deux forêts distinctes portant chacune un service hydro-sédimentaire dominant bien défini : d'une part une forêt A (pour atténuateur) et d'autre part une forêt D (pour déviateur[-contrôleur]).

On pose alors deux espaces de configurations \mathcal{P}_A et \mathcal{P}_D correspondant à l'ensemble des configurations autorisées pour chacune des forêts A et D et on appelle Ψ_A et Ψ_D des configurations relatives aux forêts A et D respectivement. On appelle aussi Ψ_{A+D} une configuration dans $\mathcal{P}_A \cup \mathcal{P}_D$ quand on veut considérer les deux forêts comme un même ensemble. On verra dans la section 4 les différents types d'espace de configurations qu'on a bien voulu explorer pour les forêts A et D .

L'autre point très important est bien évidemment la définition des fonctionnelles. On définit une fonctionnelle totale \mathcal{J} comme étant celle décrivant l'état du système vis à vis de l'ensemble de la problématique posée. Plus la valeur de \mathcal{J} est basse plus le système, combinant une forêt A et une forêt D , est dans un état avantageux vis à vis de la réduction de l'agitation et du niveau d'eau en pieds de talus. On va ensuite écrire :

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_A + \mathcal{J}_D \quad (4.4)$$

où \mathcal{J}_A représente l'état du système vis à vis de la réduction de l'agitation des vagues, et \mathcal{J}_D représente l'état du système vis à vis de la réduction du niveau d'eau en pieds de talus.

On appelle aussi D_A le domaine s'étendant entre le pieds de talus et un point située assez loin au large (quelques centaines de mètres). C'est sur ce domaine qu'on souhaite réduire l'agitation des vagues et

donc limiter le départ d'aérosols. De la même manière, on définit D_D comme étant le domaine étroit (quelques mètres) localisé directement devant le talus au sein duquel on souhaite que le niveau d'eau soit le plus proche possible du niveau d'eau au repos. Les 2 domaines définissent les zones sur lesquelles chacune des fonctionnelles doit être calculée.

Enfin, en termes physiques, la fonctionnelle \mathcal{J}_A doit être une bonne mesure de l'état d'agitation dans D_A . On peut donc écrire :

$$\mathcal{J}_A = \int_{D_A} \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4.5)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, et H la hauteur des vagues. Très logiquement, on a utilisé pour le calcul de la fonctionnelle l'expression de l'énergie totale des vagues (en théorie linéaire). La grandeur est une densité surfacique d'énergie en $[J.m^{-2}]$.

La fonctionnelle \mathcal{J}_D doit être une bonne mesure du niveau d'eau dans D_D . On peut donc écrire

$$\mathcal{J}_D = \int_{D_D} \frac{1}{2} \rho g (\bar{\eta} - \eta_0)^2 \quad (4.6)$$

où $\bar{\eta}$ est un niveau d'eau moyenné en temps représentatif de la surcôte et η_0 est le niveau d'eau de la lagune au repos. L'expression est une énergie potentielle et la grandeur est une densité surfacique d'énergie en $[J.m^{-2}]$ et est homogène avec la fonctionnelle \mathcal{J}_A .

Ci-dessus, les grandeurs H et $\bar{\eta}$ sont calculées avec une code hydraulique séparément en considérant que $H = H(\Psi_A)$ puisque la fonction atténuateur est portée par la forêt A et $\bar{\eta} = \bar{\eta}(\Psi_D)$ puisque la fonction déviateur est portée par la forêt D .

La fonctionnelle donnée en Eq. 4.4 avec comme définition pour les sous-fonctionnelles les expressions des équations Eq. 4.5 et Eq. 4.6 est l'approche la plus simple de la problématique.

On peut aussi vouloir faire évoluer librement les forêts A et B pour que chacune d'entre elle puisse agir indifféremment comme atténuateur ou déviateur. Ceci revient à utiliser la fonctionnelle de l'équation 4.4 avec des grandeurs $H = H(\Psi_A + \Psi_B)$ et $\bar{\eta} = \bar{\eta}(\Psi_A + \Psi_D)$ calculées sur un domaine où les forêts A et D sont présentes en même temps. Les essais réalisés dans ce cas montrent que – le rôle des 2 forêts étant finalement le même – cette approche n'a pas d'intérêt majeur sauf si on veut absolument avoir 2 types de modules distincts (ceux de la forêt A et ceux de la forêt B) dans la même solution sur lesquels on n'a pas les mêmes contraintes de forme (Ψ_A et Ψ_D ne sont pas du tout de même nature).

Si on souhaite en plus introduire l'opportunité de faire remonter du sable vers le talus pour des vagues inférieures à une hauteur de vagues seuil H_{critic} , alors on peut introduire une troisième sous-fonctionnelle \mathcal{J}_S (S pour Sédiments) calculée sur le domaine D_A . Pour l'intégrer dans le raisonnement, on définit le coefficient suivant (adimensionnel) :

$$\alpha_S = \int_{D_A} \frac{\hat{J}_{H > H_{critic}}}{\hat{J}_{H < H_{critic}}} \quad (4.7)$$

où $\hat{J} = \frac{1}{8} \rho g H^2$ représente une densité d'énergie des vagues en $[J.m^{-2}]$ moyennée sur l'année, $\hat{J}_{H > H_{critic}}$ est cette même densité mais considérée uniquement pour les vagues de hauteur supérieure à H_{critic} et $\hat{J}_{H < H_{critic}}$ a la même définition à ceci près qu'elle prend en compte les vagues de hauteur inférieure à H_{critic} . On peut préférentiellement définir α_S à partir des valeurs normalisées des \hat{J} par rapport à leur maximum sur le domaine, afin de faire de α_S une fraction. On peut alors définir :

$$\mathcal{J}_S = \alpha_S \mathcal{J}_A \quad (4.8)$$

Si les vagues constructives tendent à dominer la situation, \mathcal{J}_S tend à diminuer. \mathcal{J}_S est homogène avec \mathcal{J}_A et \mathcal{J}_D . Minimiser \mathcal{J}_S revient à maximiser les petites vagues et minimiser les grosses vagues, c'est



à dire favoriser la transformation des grosses vagues en petite vagues. Pour prendre en compte cette sous-fonctionnelle, il suffit de considérer la fonctionnelle totale suivante :

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_A + \mathcal{J}_D + \mathcal{J}_S \quad (4.9)$$

Comme vu plus haut, on peut bien sur considérer les deux forêts A et B dans un même mouvement, ce qui revient à demander à la forêt B de faire remonter du sable au talus de voie comme la forêt A .

D'autres fonctionnelles peuvent être envisagées (et un certain nombre ont d'ailleurs été testées pour exploration). Mais à l'amont de toute démarche réellement opérationnelle, il convient de rester sur des fonctionnelles simples, offrant la possibilité de dégager les grandes lignes de la forme de la solution optimale. Complexifier le problème est une erreur stratégique.

4 Mise en oeuvre sur Bages-Sigean

Il n'y a pas de stratégie d'aménagement sans contrainte. Dans ce projet, on a pris le parti de réduire le champ possible des solutions à la combinaison de deux forêts ayant des rôles bien définis (une forêt = un service dominant). Ce choix est fait pour pouvoir éventuellement donner une suite opérationnelle rapide à la proposition sans passer par de lourdes étapes de validation de structures trop originales. Les contraintes sur la forme des forêts sont les suivantes :

- la forêt A est de forme quadrilatère, occupant toute la largeur autorisée pour le dispositif de protection (ses deux bords latéraux sont donc parallèles entre eux mais de longueur potentiellement différente) et affichant un taux d'atténuation au sens de Dalrymple de l'ordre de 8% tous les 50 m de structure (à l'image de dispositifs déjà déployés comme les herbiers artificiels du Port de Palavas, les pieux d'ouvrages de protection en Nouvelle-Calédonie, les géotubes du lido de Sète, ...);
- la forêt B présente exactement la même variabilité de forme et a la possibilité de réduire de $N\%$ le niveau d'eau (où N a été exploré entre 0.5 et 5, et doit être précisé sur la solution opérationnelle);
- on a recherché des solutions optimales en imposant une distance maximale autorisée à la voie pour la forêt la plus distale (800 m par défaut, 200 m a été testé).

Les données de forçage météo-marins utilisées pour le calcul des grandeurs physiques moyennes sont des synthétiques comme présentés au chapitre 3 et annexe A.

Les grandeurs physiques embarquées dans les fonctionnelles sont relativement simples (H et $\bar{\eta}$) et ont été calculées avec le modèle SWAN/DELFT3D (chapitre 3) nourri par des spectres de vagues calculés à partir des synthétiques. Mais en aucun cas on ne peut exclure qu'un processus particulier, non pris en compte, pourrait avoir un rôle dans le contrôle du niveau ou de l'agitation. En particulier, sur le niveau, on a fait le choix de ne pas chercher à contrôler les contributions qui sont régionales mais bien de réduire la surcôte induite par les vagues. On n'a pas cherché à réduire la surcôte éventuellement contrôlée par les ondes infra-gravitaires ou toute autre contribution du même type. Le faire aurait signifié connaître exactement les fonctions de transfert des spectres de vagues au dessus des forêts A et D , ce qui est impossible avant de disposer des versions opérationnelles du prototype.

Le résultat donné au chapitre 5 est basé sur cette mise en oeuvre, avec la fonctionnelle totale \mathcal{J} donnée en équation 4.4. La figure 4.4 récapitule cette mise en oeuvre de manière graphique.

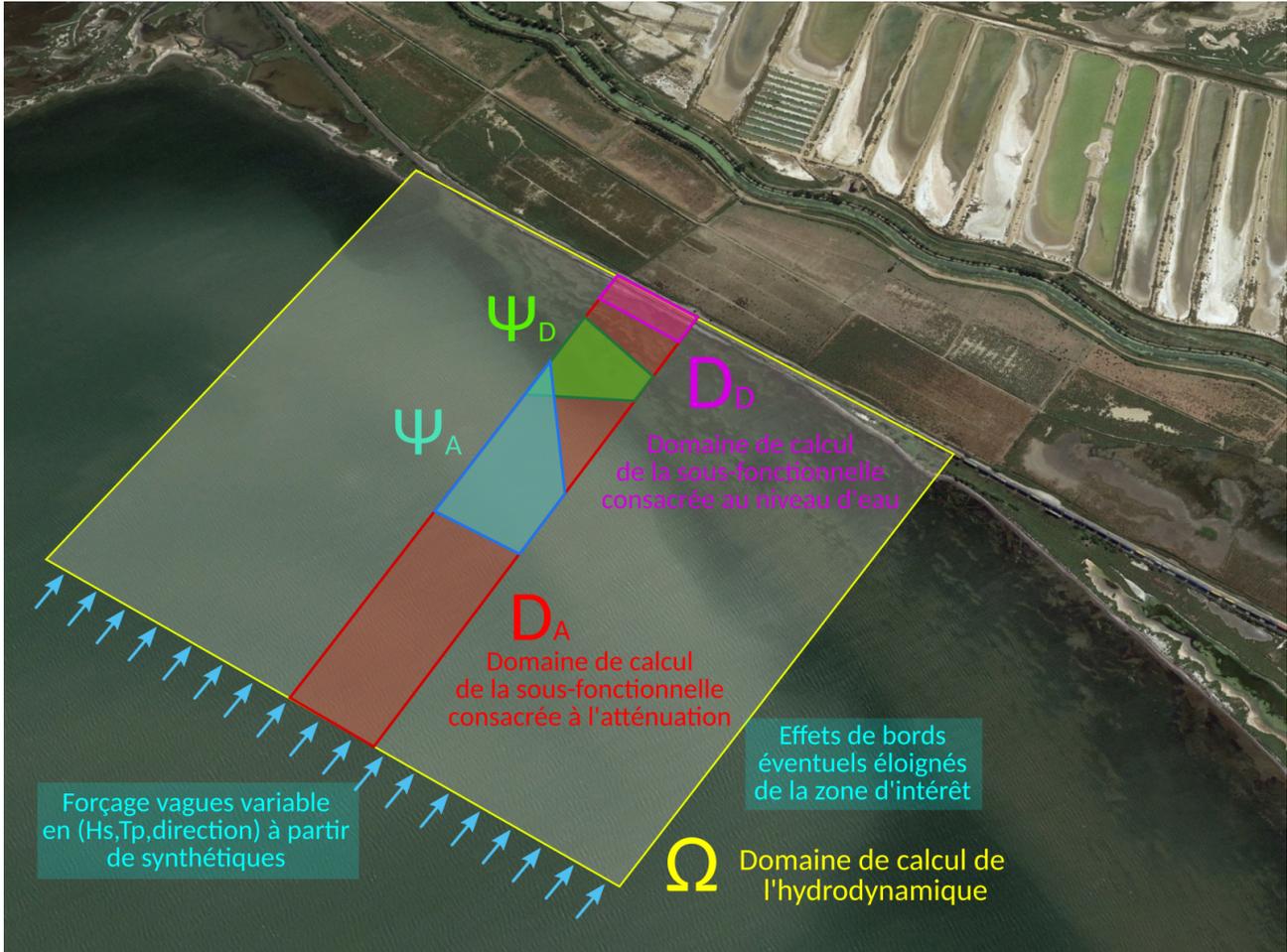


FIGURE 4.4 : Le domaine et les configurations considérées pour la mise en oeuvre de l'optimisation de forme dans le cadre du dimensionnement du pré-prototype. Le domaine Ω (jaune) est le domaine de calcul. Les domaines D_A (rouge) et D_D (mauve) sont les domaines de calcul des fonctionnelles pour les forêts A (dominante atténuateur) et D (dominante déviateur). Les configurations Ψ_A et Ψ_D peuvent s'exprimer dans le domaine D_A . Leur bordure latérale coïncide avec D_A . Leurs bords coté large et coté talus sont libres. Les deux configurations peuvent se superposer librement (comme sur l'exemple pris sur la figure).

Chapitre 5

La solution de protection de la voie ferrée contre la corrosion et les incidents

1 Résultats du dimensionnement

La figure 5.1 montre la solution optimale la plus efficace qui a pu être mise en évidence en multipliant les approches telles que décrites dans le chapitre 4. Cette figure est directement issue du travail d'optimisation numérique assistée. Elle correspond à une solution s'étendant sur environ 800 m au large du talus de la voie ferrée.

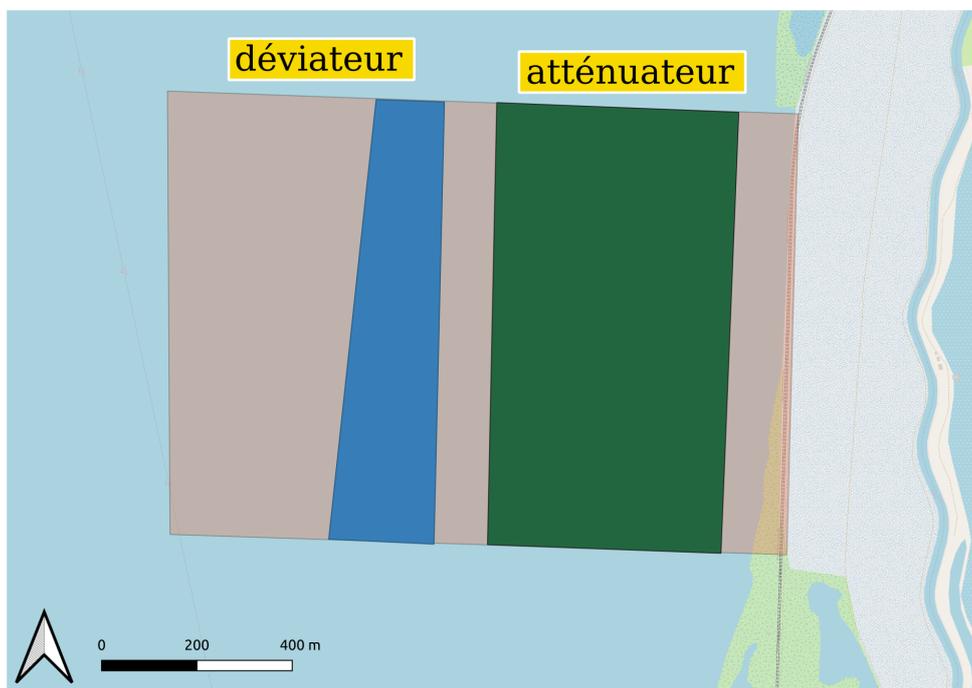


FIGURE 5.1 : Version finale du pre-prototype après dimensionnement avec les outils d'optimisation et analyse critique expert. La partie anti-franchissement ne fait pas l'objet d'une optimisation donc elle n'est pas représentée et est positionnée là où l'ingénierie l'autorise (en pieds de talus ou déployée contre les ouvrages existants). La partie atténuateur (forme optimale en vert) couvre l'essentiel de la zone concernée par la solution et est positionnée directement devant le talus après une zone non couverte réduite. La partie déviateur (en bleu) est la plus éloignée et montre une assymétrie évident permettant la déviation du courant évitant ainsi l'accumulation d'eau dans la partie Nord du système. La solution optimale la plus efficace révélée par l'étude s'étend jusqu'à près de 800 m dans la lagune. Des solutions beaucoup plus courtes restent intéressantes en terme de service hydraulique.



Pour une phase opérationnelle future, il faut retenir des résultats stricts d'optimisation les points suivants :

- la composition d'une solution en 3 termes (déviateur, atténuateur, protecteur anti-franchissement) est pertinente et doit être maintenue ;
- le déviateur doit être impérativement localisé au large de l'atténuateur ;
- la longueur totale du dispositif peut être largement réduite (ramenée de 800 m à 200 m par exemple), mais l'efficacité mesurable (taux de dissipation des vagues, taux de rotation du courant,...) sera évidemment réduite ;
- la solution totale est plus efficace si une zone tampon est laissée entre la voie et l'atténuateur, et si une autre est également laissée entre déviateur et atténuateur. La longueur de ces zones non protégées est de quelques dizaines de mètres maximum ;
- cette démarche d'optimisation doit être perçue comme un exercice de dimensionnement qualitatif à ce stade, puisque les propriétés des éléments opérationnels qui seront réellement déployés à l'eau ne sont pas connues à ce jour ;
- *corollaire* : la totalité de la démarche d'optimisation doit être refaite avec les deux forêts précisément imaginée pour le déploiement opérationnel.

2 Recommandations pour l'élaboration d'une phase opérationnelle

2.1 Sur la conception et la mise en oeuvre d'un prototype opérationnel

On fait un certain nombre de recommandations pour passer de la phase de pré-prototype qui marque la fin du projet Gladys à un prototype opérationnel pensé par des entreprises et mis en place à Bages-Sigean pour observation/test. Ces recommandations sont les suivantes :

- la figure 5.1 donne la forme optimale d'un prototype composé de 3 éléments de protection déployé sur quelque centaines de mètres le long de la voie. Le prototype opérationnel serait déployé sur une distance plus courte (pour des raisons évidentes de coût de la phase de test du prototype). La largeur minimale doit être de 25 m, 50 m étant meilleur pour garantir un suivi de qualité ;
- réaliser une expérimentation en canal taille 1 : 1 à l'échelle du module pour le déviateur et l'atténuateur afin de mesurer les propriétés dissipatives de ces structures et utiliser ces dernières dans une phase d'optimisation plus avancée ;
- refaire le travail d'optimisation avec les taux de dissipation réels, mais en considérant toujours une solution plus large que celle qui sera déployée (le but est d'obtenir une solution optimale à l'échelle du site, pas optimale du point de vue du prototype, les deux optimums pouvant être différents) ;
- le travail d'optimisation doit faire l'objet d'une vérification par des calculs d'ingénierie traditionnelle et être confronté à un raisonnement de génie côtier classique ;
- il ne sert strictement à rien de déployer un prototype opérationnel sur le site de Bages-Sigean si un tel effort n'est pas accompagné par un suivi robuste de l'hydraulique et des mécanismes de contrôle de la corrosion identifiés dans ce projet.

2.2 Mise en place d'un suivi sur le territoire d'expérimentation

Avant toute opération de grande ampleur, l'idée d'un territoire d'expérimentation s'impose. Sur un tel territoire, le prototype décliné dans sa version opérationnelle peut être pleinement testé. Tester

signifie ici deux choses : (i) vérifier sur le long terme la réduction locale éventuelle de la corrosion (plus difficilement les incidents de voie qui sont des phénomènes déportés par nature, donc incompatibles avec le déploiement limité spatialement de la solution) et (ii) vérifier le comportement hydraulique des dispositifs mis à l'eau et sur le talus de voie, afin de confirmer qu'ils rendent les services attendus, et donc que les chances de contrôle de la corrosion sont maximisées.



FIGURE 5.2 : Sur le territoire d'expérimentation, exemple de définition de deux zones placées globalement dans la même configuration (vis à vis du forçage météo-marin, vis à vis de la nature des fonds, vis à vis de la forme de l'ouvrage ferroviaire). Les deux zones ont une largeur de 50 m et s'étendent vers le large sur environ 200 m. Du fait de l'angle d'incidence des vagues plutôt perpendiculaire à la voie, une largeur de 50 m est suffisante pour apprécier les relations hydraulique/structures. La zone rouge correspond à celle sur laquelle le prototype est déployé. La zone verte est strictement identique et constitue un témoin sur lequel des opérations équivalentes à celles mises en oeuvre sur la zone rouge peuvent être engagées, ceci permettant une forme de mesure des effets de la solution déployée.

La figure 5.2 montre le principe d'un tel territoire d'expérimentation dans lequel une zone serait équipée de la solution, et une zone équivalente serait utilisée en témoin. L'étude comparative de l'évolution des deux systèmes est la seule option pour apprécier objectivement les effets réels du prototype.

2.3 Instrumentation du prototype potentiellement déployé

La figure 5.3 montre comment les différents éléments de la solution doivent être instrumentés. Le déviateur doit faire l'objet d'un suivi du champ de vagues (spectres pour calcul de la dissipation et calcul d'énergies) et de la courantologie (vitesses et orientation) sur et autour de la structure. L'atténuateur doit faire l'objet d'une mesure de pression en plusieurs points pour la reconstruction du champ de vagues et la caractérisation de la dissipation. L'instrumentation sur l'ouvrage anti-franchissement doit s'organiser autour de la mesure des contraintes exercées sur le talus, et la mesure du niveau d'eau. La difficulté est d'obtenir un nombre de stations de mesure suffisamment importante pour pouvoir caractériser le comportement de la lame d'eau contre l'ouvrage sous différentes conditions météo-marines. S'il était déployé, le filet à embruns devrait faire l'objet d'une mesure de vent et capteur humidité à haute précision devant et derrière le dispositif pour faire une vérification objective de sa capacité à récupérer les aérosols. Les effets de la barrière souterraine pourraient être étudiés à l'aide d'un puits foré instrumenté pour la mesure de piezométrie, température et conductivité (indiquant la saturation en composants salés).

Bien évidemment, la zone de référence serait instrumentée de la même manière que la zone équipée de la solution, les appareils de mesure étant localisés exactement aux mêmes emplacements dans un cas comme dans l'autre. Une telle stratégie permet de plus facilement différencier les évolutions de l'hydraulique liées au fonctionnement naturel du système de celles qui sont induites par la présence de la solution, sans faire d'hypothèse sur la variabilité spatiale de cette hydraulique.

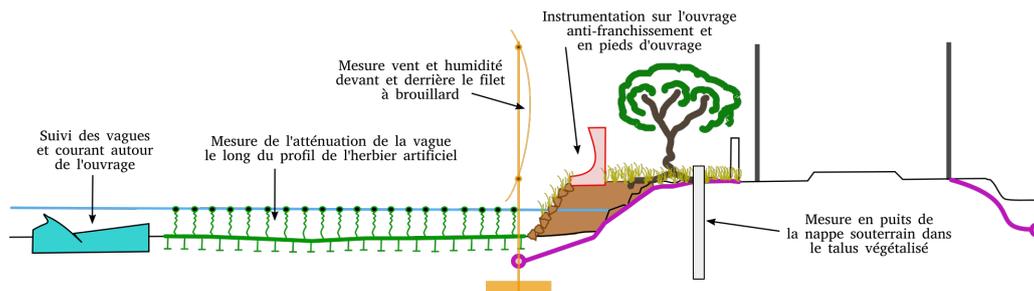


FIGURE 5.3 : Les recommandations faites pour l'instrumentation du prototype proposé au déploiement sur le site de Bages-Sigean. Chaque élément de la solution doit être instrumenté pour quantifier les services hydrauliques rendus et vérifier la conformité des observations avec les ambitions affichées. La figure comprend le filet à embruns et la barrière souterraine, qui ne sont pas retenus dans le pré-prototype officiel ; ils sont reportés au cas où des développements futurs pourraient utiliser de telles technologies à l'essai et donc devraient faire l'objet d'une étude expérimentale.

Une liste d'instruments à déployer globalement en profil perpendiculaire à la voie pourrait être :

- **pour le territoire d'expérimentation dans son ensemble** : baromètre (pression atmosphérique), station météorologique (mesure générale du vent, température, humidité générale, pluviométrie), un pressiomètre (pression, hauteur d'eau donc vagues) au large de l'ensemble du dispositif ;
- **pour la partie déviateur** : 1 profileur de courant (vitesses du courant sur la colonne d'eau) devant la solution et 2 derrière décalés latéralement, chacun associés à un pressiomètre, et 1 pressiomètre supplémentaire au sein de l'élément ;
- **pour la partie atténuateur** : un courantomètre ou profileur (le courantomètre offre une mesure ponctuelle) devant le dispositif et un autre derrière, et une série de 3 à 5 pressiomètres le long de la structure pour apprécier l'évolution de la dissipation (et être en mesure de préciser les taux de dissipation en fct de la distance couverte par la solution) ;
- **pour l'ouvrage anti-franchissement** : une chaîne de calcul de forces de la base du talus au sommet de l'ouvrage, 2 ou 3 points de calcul de pression pour mesurer les vagues par haut niveau, un capteur de conductivité en pieds de talus et un autre à l'arrière de l'élément déployé.

Même si cette opération est compliquée d'un point de vue réglementaire, un prototype n'a de sens que si des mesures précises de grandeurs physiques montrant la corrosion sont menées pendant la période de déploiement du prototype. Ceci passe par :

- des photos régulières de points clés sur la voie (visserie, rails) et sur les caténaires (base de poteau, comparaison poteau amont/aval vis à vis du vent dominant) ;
- mise en place de tests de corrosion et d'une surveillance active en plaçant des matériaux se corrodant facilement sur les caténaires, au sol, dans le sol et à proximité des rails et en réalisant le même suivi photo régulier que sur l'ouvrage lui-même ; bien évidemment, la zone test doit être équipée des mêmes témoins aux mêmes endroits, comme pour l'instrumentation ;
- mise en place de conductimètres (ou appareils équivalents étant capables de mesurer le taux de composants salés dans un milieu insaturé) à proximité de la voie et dans le talus de voie au plus près des rails.



Références

- BATTJES, J. A. et J.P.F.M. JANSSEN (1978). « Energy loss and set-up due to breaking of random waves ». In : *Coastal Engineering Proceedings* 1.16, p. 32. DOI : [10.9753/icce.v16.32](https://doi.org/10.9753/icce.v16.32).
- BERKHOFF, J (s. d.). « Computation of Combined Refraction Diffraction ». en. In : *COASTAL ENGINEERING* (), p. 20.
- CAVALERI, Luigi et Paola Malanotte RIZZOLI (1981). « Wind wave prediction in shallow water : Theory and applications ». In : *Journal of Geophysical Research : Oceans* 86 (C11), p. 10961-10973. DOI : [10.1029/JC086iC11p10961](https://doi.org/10.1029/JC086iC11p10961).
- COLLINS, J. Ian (1972). « Prediction of shallow-water spectra ». In : *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 77.15, p. 2693-2707. DOI : [10.1029/JC077i015p02693](https://doi.org/10.1029/JC077i015p02693).
- COOK, Megan, Frédéric BOUCHETTE, Ban MOHAMMADI et Nicolas FRAYSSE (2021a). « Opti-Morph User Guide ». en. In : p. 50.
- COOK, Megan, Frédéric BOUCHETTE, Bijan MOHAMMADI et Nicolas FRAYSSE (s. d.). « Application of Opti-Morph : Optimized beach protection by submerged geotextile tubes ». en. In : (), p. 26.
- COOK, Megan, Frédéric BOUCHETTE, Bijan MOHAMMADI, Samuel MEULÉ et Nicolas FRAYSSE (2021b). « Opti-Morph, a new platform for sandy beach dynamics by constrained wave energy minimization ». en. In : p. 18.
- COOK, Megan, Frédéric BOUCHETTE, Bijan MOHAMMADI, Léa SPRUNCK et Nicolas FRAYSSE (2021c). « Optimal Port Design Minimizing Standing Waves with A Posteriori Long Term Shoreline Sustainability Analysis ». en. In : *China Ocean Engineering* 35.6, p. 802-813. DOI : [10.1007/s13344-021-0071-7](https://doi.org/10.1007/s13344-021-0071-7).
- DINGEMANS, Maarten W (1997). *Water Wave Propagation Over Uneven Bottoms : (In 2 Parts)*. T. 13. Advanced Series on Ocean Engineering. World Scientific Publishing Company.
- DORRESTEIN, R. (1960). « Simplified method of determining refraction coefficients for sea waves ». In : *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 65.2, p. 637-642. DOI : [10.1029/JZ065i002p00637](https://doi.org/10.1029/JZ065i002p00637).
- ELDEBERKY, Yasser et J. A. BATTJES (1996). « Spectral modeling of wave breaking : Application to Boussinesq equations ». In : *Journal of Geophysical Research : Oceans* 101 (C1), p. 1253-1264. DOI : [10.1029/95JC03219](https://doi.org/10.1029/95JC03219).
- HASSELMANN, K., T. BARNETT, E. BOUWS, H. CARLSON, D. CARTWRIGHT, K ENKE, J EWING, H GIENAPP, D. HASSELMANN, P. KRUSEMAN, A MEERBURG, Peter MULLER, Dirk OLBERS, K RICHTER, W. SELL et H. WALDEN (1973). « Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) ». In : *Deut. Hydrogr. Z.* 8, p. 1-95.
- HASSELMANN, S., K. HASSELMANN, J. H. ALLENDER et T. P. BARNETT (1985). « Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part II : Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models ». In : *Journal of Physical Oceanography* 15.11, p. 1378-1391. DOI : [10.1175/1520-0485\(1985\)015<1378:CAPOTN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1378:CAPOTN>2.0.CO;2).



- ISEBE, D., P. AZERAD, B. MOHAMMADI et F. BOUCHETTE (2008). « Optimal shape design of defense structures for minimizing short wave impact ». en. In : *Coastal Engineering* 55.1, p. 35-46. DOI : [10.1016/j.coastaleng.2007.06.006](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.06.006).
- ISEBE, Damien, Pascal AZERAD, Frederic BOUCHETTE, Benjamin IVORRA et Bijan MOHAMMADI (2008). « Shape optimization of geotextile tubes for sandy beach protection ». en. In : *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 74.8, p. 1262-1277. DOI : [10.1002/nme.2209](https://doi.org/10.1002/nme.2209).
- ISÈBE, D., P. AZÉRAD, F. BOUCHETTE et B. MOHAMMADI (2014). « Design of Passive Defense Structures in Coastal Engineering ». en. In : *International Review of Civil Engineering (IRECE)* 5.2, p. 75. DOI : [10.15866/irece.v5i2.2029](https://doi.org/10.15866/irece.v5i2.2029).
- KOMEN, G. J., éd. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge ; New York, NY, USA : Cambridge University Press. 532 p.
- KOMEN, G. J., K. HASSELMANN et K. HASSELMANN (1984). « On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum ». In : *Journal of Physical Oceanography* 14.8, p. 1271-1285. DOI : [10.1175/1520-0485\(1984\)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<1271:OTEOAF>2.0.CO;2).
- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1957). « On the transformation of a continuous spectrum by refraction ». In : *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 53.1, p. 226-229. DOI : [10.1017/S0305004100032163](https://doi.org/10.1017/S0305004100032163).
- MADSEN, Ole Secher, Ying-Keung POON et Hans C. GRABER (1988). « SPECTRAL WAVE ATTENUATION BY BOTTOM FRICTION : THEORY ». In : *Coastal Engineering Proceedings* 21, p. 34-34. DOI : [10.9753/icce.v21.34](https://doi.org/10.9753/icce.v21.34).
- MASSEL, Stanisaw R (1996). *Ocean Surface Waves : Their Physics and Prediction*. T. 11. Advanced Series on Ocean Engineering. WORLD SCIENTIFIC. DOI : [10.1142/2285](https://doi.org/10.1142/2285).
- MILES, John W. (1957). « On the generation of surface waves by shear flows ». In : *Journal of Fluid Mechanics* 3.2, p. 185. DOI : [10.1017/S0022112057000567](https://doi.org/10.1017/S0022112057000567).
- MOHAMMADI, Bijan et Frederic BOUCHETTE (2014). « Extreme scenarios for the evolution of a soft bed interacting with a fluid using the Value at Risk of the bed characteristics ». en. In : *Computers & Fluids* 89, p. 78-87. DOI : [10.1016/j.compfluid.2013.10.021](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.10.021).
- MOHAMMADI, Bijan et Afaf BOUHARGUANE (2011). « Optimal dynamics of soft shapes in shallow waters ». en. In : *Computers & Fluids* 40.1, p. 291-298. DOI : [10.1016/j.compfluid.2010.09.031](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.09.031).
- MONTALVO, P., J. DORIGNAC, M. A. MANNA, C. KHARIF et H. BRANGER (2013). « Growth of surface wind-waves in water of finite depth. A theoretical approach ». In : *Coastal Engineering* 77, p. 49-56. DOI : [10.1016/j.coastaleng.2013.02.008](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.02.008).
- NUTZ, Alexis, Mathieu SCHUSTER, Jean-François GHIENNE, Claude ROQUIN et Frédéric BOUCHETTE (2018). « Wind-driven waterbodies : a new category of lake within an alternative sedimentologically-based lake classification ». In : *J Paleolimnology* 59, p. 189-199. DOI : [10.1007/s10933-016-9894-2](https://doi.org/10.1007/s10933-016-9894-2).
- PHILLIPS, O. M. (1957). « On the generation of waves by turbulent wind ». In : *Journal of Fluid Mechanics* 2.5, p. 417. DOI : [10.1017/S0022112057000233](https://doi.org/10.1017/S0022112057000233).
- WAMDI GROUP, the (1988). « The WAM ModelA Third Generation Ocean Wave Prediction Model ». In : *Journal of Physical Oceanography* 18.12, p. 1775-1810. DOI : [10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2).
- WHITHAM, G. B. (1964). « A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a Lagrangian ». In : *Journal of Fluid Mechanics*, p. 11.
- (1967). « Variational methods and applications to water waves ». In : *Royal Society*, p. 20. DOI : <https://doi.org/10.1098/rspa.1967.0119>.
- (1999). *Linear and Nonlinear Waves*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc. DOI : [10.1002/9781118032954](https://doi.org/10.1002/9781118032954).



- WU, Jin (1982). « Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane ». In : *Journal of Geophysical Research : Oceans* 87 (C12), p. 9704-9706. DOI : [10.1029/JC087iC12p09704](https://doi.org/10.1029/JC087iC12p09704).
- YOUNG, Ian R. (1989). « Wave transformation over coral reefs ». In : *Journal of Geophysical Research : Oceans* 94 (C7), p. 9779-9789. DOI : [10.1029/JC094iC07p09779](https://doi.org/10.1029/JC094iC07p09779).



Annexe A

Méthodologie pour la production de synthétiques

Dans cette annexe, on présente plus en détail la démarche mise en oeuvre dans le projet pour produire les forçages synthétiques utilisés comme données d'entrée dans les différents travaux de dimensionnement ou d'analyse des processus en jeu sur le site d'étude. Ces forçages synthétiques sont des quadruplets $[H_s, T_p, \theta_0, \bar{\eta}]$ décrivant l'état d'agitation à l'entrée du domaine étudié en terme de hauteur de vagues, période pic de vagues, direction moyenne des vagues et niveau d'eau moyen. Ces grandeurs sont calculées sur un pas de temps long τ et doivent varier en temps sur plusieurs dizaines d'années de telle sorte que les séries obtenues soient représentatives soit des conditions actuelles soit de scénarios prospectifs sous changement global. Dans un tel contexte, on doit :

- choisir des événements de référence prospectifs à introduire dans ces séries temporelles longues ;
- calculer une famille de conditions météo-marines constituant ces états de mer projet ainsi que les niveaux d'eau moyens associés à ces événements de référence ;
- construire des séries temporelles synthétiques long terme représentative d'une succession de périodes calmes et des états de mer prospectifs choisis, avec une fréquence d'occurrence de ces événements également représentative de l'actuel ou d'un scénario.

Les objectifs de simulation sont tels qu'il faut définir in fine des séries temporelles synthétiques des **vagues et du niveau d'eau** pour plusieurs périodes de retour (décennal, pluri-décennal) en intégrant le maximum de contributions significatives dans le calcul du niveau, et les évolutions des caractéristiques des tempêtes dans le calcul des vagues entrantes. Les événements paroxysmaux typiques durent quelques jours en général ; on s'intéresse donc à des séries temporelles d'environ 15 jours, avec une première phase sous condition météo-marine faible permettant le spin-up du modèle, une seconde phase correspondant à l'évènement choisi, et une troisième phase de relaxation de l'évènement. Les simulations concernent des calculs à la côte de morphodynamique du profil de plage ou du trait de côte ; donc les séries temporelles créées doivent être pensées pour une utilisation en terme de forçages de modèles strictement littoraux. Ces conditions peuvent être ensuite enchaînées en temps sur des périodes aussi longues que voulues. On ne tient pas compte de la variation des caractéristiques de ces événements représentatifs au cours des décennies à venir (choix convenu avec le partenaire).



1 Niveau d'eau à la côte

1.1 Définitions

On définit $\eta(t, x)$ comme étant l'élévation instantanée de la surface libre au temps t en x dans un référentiel cartographique quelconque. Le référentiel cartographique est nécessairement associé à un référentiel altimétrique permettant de définir

- une altitude, c'est à dire la distance le long du vecteur gravité par rapport à un niveau zéro de la mer arbitraire défini par une valeur du géoïde (typiquement le NGF) ou
- une hauteur ellipsoïdale, c'est à dire une distance par rapport à l'ellipsoïde utilisé pour définir le référentiel géodésique (RGF93), calculée le long de la normale à cet ellipsoïde.

Dans ces 2 référentiels, on peut calculer la position d'un niveau d'eau observé sur le très long terme (représentatif d'un niveau marin au repos) et ramener l'origine du référentiel en ce point ; on parle alors de côte marine. Dans tous les cas, on choisit le référentiel de telle sorte que η soit une grandeur positive vers le haut nulle au point de référence vertical choisi.

Ceci étant convenu, on définit la notion de niveau d'eau :

$$\bar{\eta}(t, x) = \frac{1}{\Delta T_c} \int_{t - \frac{\Delta T_c}{2}}^{t + \frac{\Delta T_c}{2}} \eta(\tau, x) . d\tau$$

où ΔT_c représente un temps caractéristique sur lequel la moyenne est réalisée. Selon la valeur choisie pour T_c , le niveau d'eau $\bar{\eta}(x, t)$ décrit l'effet de processus différents. En effet, toutes les oscillations du plan d'eau de période inférieure à $T_c/2$ (valeur critique de l'identification d'une sinusoïde selon la théorie de Shannon) sont lissées dans la moyenne. Dit autrement, le niveau $\bar{\eta}(x, t)$ décrit les variations au cours du temps au point x des processus physiques dont la période est supérieure à T_c . Par exemple, pour un T_c de l'ordre de 10-20 secondes, $\bar{\eta}(x, t)$ ne décrit pas l'évolution du niveau d'eau du au passage des vagues elles-mêmes, mais caractérise bien correctement toutes les évolution de niveau de plus longue période qui peuvent résulter de la présence des vagues. Par exemple, pour un T_c de l'ordre de quelques secondes, on ne décrit pas le niveau du directement aux vagues, mais bien celui de leurs effets comme la surcôte.

1.2 Forçage en niveau d'eau de la zone littorale

Dans la suite, il a été proposé qu'on considère la notion de niveau $\bar{\eta}(t, x)$ avec les caractéristiques suivantes :

- on cherche à produire des synthétiques qui vont servir de forçages pour le système littoral. On a donc proposé de calculer les niveaux à une profondeur d'eau au repos $h = 5 m$. Le choix repose sur le fait que dans une profondeur inférieure sur une plage sableuse dissipative typique, les processus dominants sont très haute fréquence (jet de rive, déplacement des barres sableuses, ...) et relèvent clairement plus de résultats de calcul que de forçages car ils sont indéterminables à partir de la donnée observationnelle ;
- le temps caractéristique T_c est positionné à 5 secondes de manière à ce que les vagues dans un contexte typiquement méditerranéen ne soient pas décrites, mais tous les processus d'oscillation de la surface de période supérieure le soient. La conséquence de cela est que le raisonnement qui suit repose sur la définition des caractéristiques des vagues de manière nécessairement statistique (H_s, T_p, \dots)

Avec un tel cadrage, les contributions au niveau d'eau $\bar{\eta}$ littoral susceptibles d'avoir une signature significative sont les suivantes :

- la tendance climatique ;
- la marée astronomique ;
- la surcôte due aux vagues (wave setup) ;
- la surcôte due aux vent (wind surge) ;
- la surcôte atmosphérique, due aux variations de pression atmosphérique ;
- l'amplitude des ondes d'infra-gravité, qui représentent l'ensemble des ondes basses fréquences (0.005 Hz \rightarrow 0.02 Hz) – portant les vagues proprement dites (notion d'enveloppe) ;
- les ondes de bords, dont on ne parlera pas dans la mesure où elles sont totalement contrôlées par des processus longitudinaux, impossibles à prendre en compte dans une démarche construite sur un profil terre-mer ;
- les seiches, dont on ne parlera pas non plus dans la mesure où elles sont totalement contrôlées par la géométrie du domaine littoral considéré (développement préférentiel dans les baies, estuaires, ports,...).

1.3 Formulation du forçage en niveau d'eau

Le niveau d'eau $\bar{\eta}(t, x)$ tel que défini va donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\bar{\eta}(t, x) = \eta_0 + \delta\eta_c(t) + \delta\eta_t(t, x) + \delta\eta_v(t, x) + \delta\eta_a(t, x) + \delta\eta_w(t, x) + \delta\eta_{IG}(t, x)$$

où η_0 est une valeur à fixer permettant de passer d'une représentation dans un référentiel NGF à côte marine par exemple. Elle est théoriquement fonction de x mais considérée constante sur un site d'étude donné. Les autres termes sont des contributions distinctes au niveau, chacune contrôlée par un mécanisme précis. Toutes les contributions sont supposées indépendantes, donc sommables. Chaque contribution peut être vue comme une perturbation du niveau (donc éventuellement signée, et variant autour de zéro la valeur où la contribution est nulle).

On associe chaque terme aux effets suivants :

- $\delta\eta_c(t)$: la contribution climatique, c'est à dire une augmentation (valeur positive) en tout point de l'élévation du niveau moyen à un certain horizon temporel ;
- $\delta\eta_t(t, x)$: la contribution de la marée, c'est à dire une superposition de sinusoides centrée sur zéro correspondant aux modes marégraphiques (M1, M2, etc) s'exprimant de manière significative en x ;
- $\delta\eta_v(t, x)$: la contribution du vent orienté vers la côte, poussant les masses d'eau et les accumulant, induisant in fine une surcôte. Ce terme doit être vu comme la valeur maximale possible de cette élévation à la côte pour des conditions de vent caractéristiques d'un lieu x donné ; on ne considère pas de scénarios de décôte (lorsque le vent souffle de la voie vers le centre de la lagune). On se place dans une approche de type "pire scénario" ;
- $\delta\eta_a(t, x)$: la contribution atmosphérique, correspondant à la modification de la position de la surface libre induite par le poids de l'air plus ou moins dense. Comme précédemment, ce terme doit être vu comme la valeur maximale possible de cette élévation pour des conditions météorologiques données. On se place là aussi dans une approche "pire scénario" ;
- $\delta\eta_w(t, x)$: la contribution des vagues sous la forme d'une surcôte. Les vagues ont une capacité de transport des masses d'eau qui contrôle une élévation du niveau d'eau au déferlement. La surcôte dépend des caractéristiques des vagues en hauteur et période ;



- $\delta\eta_{IG}(t, x)$: la contribution des ondes infra-gravitaires [IG]. Ces ondes IG à l'approche du rivage sont directement liées aux vagues. Loin du rivage, le caractère éventuellement dispersif des vagues (lorsque la profondeur est suffisante) fait qu'avec la distance, les vagues de même fréquence se regroupent. On observe un tri progressif du train d'ondes. Or, par ailleurs, deux vagues de fréquences très proches interagissent fortement et développent une sous-harmonique, c'est à dire une onde de bien plus basse fréquence porteuse. Donc à la côte, un train de houle arrive en général avec une signature spectrale propre à la houle elle-même, et par ailleurs une signature spectrale caractérisant le développement de cette enveloppe lors de sa propagation. On parle à ce stade d'onde IG liée à la houle. Au niveau du littoral, les interactions fortes avec le fond, en particulier au déferlement, libèrent ces ondes IG liées, qui deviennent des oscillations libres du plan d'eau, de période allant de 30 secondes à une paire de minutes max typiquement. Ces ondes contribuent à la dynamique du niveau d'eau dans la gamme de fréquence retenue dans ce travail.

2 Calcul des conditions météo-marines et des niveaux projet

2.1 Choix des scénarios prospectifs pour les états de mer projet

Le choix des scénarios prospectifs s'est fait en gardant en tête que le site d'étude considéré est un bassin de faible profondeur, et donc que les vagues arrivent rapidement à saturation dans leur croissance. Il ne sert donc à rien d'imaginer des forçages vagues énormes car ils ne peuvent pas exister. Avec les campagnes de mesure réalisées, on sait approximativement quelles sont les conditions de saturation sur ce site. Donc, en prenant une marge de sécurité, on a les scénarios les plus forts possibles. Pour les autres grandeurs (pression, vent), on s'appuie sur les valeurs maximales disponibles sur les synthèses Météo-France. Au terme de cette sélection, les scénarios retenus sont référencés par un code du type *Cxxx_Ryyyy* où *xxx* représente l'élévation du niveau d'eau en centimètres et *yyyy* représente la projection à *yyyy* ans que l'on considère pour l'intensité du forçage météo-marin. Derrière cette projection, il y a une modification des conditions météo-marines qui altère aussi le niveau d'eau pendant un évènement tempétueux. Le terme météo-marin fait donc ici référence aux effets combinés des vagues, du vent de la pression atmosphérique et de l'IG sur le niveau d'eau.

2.2 Calcul des $\delta\eta_i$

Dans cette section, on montre comment on calcule les différentes contributions en terme de niveau d'eau. Dans la suite, on pose ρ_a la masse volumique de l'air, ρ_w la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur.

Contribution climatique $\delta\eta_c$

Cette contribution est directement donnée par le scénario prospectif considéré (liste dans la section précédente).

Contribution de la marée $\delta\eta_t$

La marée est caractérisée par ses composantes diurnes et semi-diurnes, dont les coefficients sont établis au plus près de la zone d'étude. Dans le cas présent, le site d'étude a été associé au marégraphe de Marseille et l'analyse de la donnée à cet équipement permet de retenir les harmoniques suivantes : amplitude 0.055 m de période 25 h et harmonique 0.16 m de période 12.5 h , avec un offset vertical permanent de 0.123 . Ces données sont corroborées par les mesures directe de pression dans l'étange. On génère un signal de marée en sommant ces deux sinusoides et l'offset vertical permanent.

Contribution des vagues $\delta\eta_w$

Sur ce point, on n'a pas trop d'information donc on se place sur les valeurs de houle mesurées lors des campagnes qu'on considère fiable pour proposer une loi de Gumbel à queue lourde sur la distribution des hauteurs de vagues H_s et périodes T_p associées. On retient dans ce travail une telle loi pour la hauteur des vagues H_s , en considérant qu'elle reste vraie pour les périodes de retour jusqu'au décennal (au delà de la limite de fiabilité de cette probabilité vu la longueur de la série temporelle disponible, mais le principe est d'avoir un ordre de grandeur des phénomènes). Au delà, de toutes manières, la hauteur des vagues sature (milieu de faible profondeur) et les prévisions ne diffèrent pas de celles à 5 ou 10 ans. Le terme saturation désigne le fait que le rapport H_s/h (où h est la profondeur d'eau où on fait la mesure) ne peut dépasser un seuil en général fixé à 0.55 (voire beaucoup moins dans certains travaux) pour des vagues réelles.

Pour la période des vagues T_p , on n'envisage pas de les prescrire à l'aide d'une loi de Gumbel posée sur la donnée houlographique. On raisonne de la manière suivante : l'occurrence d'une houle avec une forte hauteur de vagues, décrite par la loi de Gumbel sur les H_s implique une période T_p paroxysmale quelle que soit la période de retour considérée dans le scénario. Pour cette raison, on fixe la période des vagues à une valeur correspondant à la moyenne des valeurs observées pendant le H_s considéré dans le scénario. Dans le cas contraire, on minimiserait d'une part fortement le flux d'énergie à la côte, et d'autre part, on créerait artificiellement des vagues très raides, des murs d'eau totalement irréalistes.

A partir de la loi de probabilité établie sur H_s , on peut extraire les H_s représentatifs des scénarios retenus pour l'étude, et on calcule les T_p associés directement à partir de la donnée de la base calculée. Pour quantifier le niveau d'eau, on utilise la balance des moments niveau/tension de radiation reformulée par Weber :

$$\frac{\partial\eta_1}{\partial x} = \frac{3h_0^{1/2}A_0^2}{8h^{5/2}} \left[\frac{dh}{dx} + \frac{2hr}{C} + \frac{2c_B h_0^{1/2} A_0^2}{3h^{5/2}} \right] \exp\left(-\frac{r}{C}x\right) \quad (\text{A.1})$$

$\eta_w(x, t)$:=	élévation par rapport au niveau de référence z_0
$h(x)$:=	profondeur d'eau le long du profil
C	:=	$C = (gh)^{1/2}$ vitesse de phase
$r(x)$:=	$r = K^2 \frac{g\alpha^2}{2h\sigma}$ friction (avec $K = 0.16$)
h_0	:=	profondeur d'eau au large de la zone de shoaling ($x = 0$)
A_0	:=	demi-hauteur des vagues à l'entrée de la zone de shoaling ($x = 0$)

On calcule les valeurs de niveau à $h = 5 m$ de profondeur.

On note aussi qu'on a retenu l'hypothèse de Bruun, selon laquelle le littoral réagit sur le long terme en restant identique à lui même lors de la montée lente du niveau marin. La profondeur de 5 m reste inchangée et les caractéristiques de la saturation du H_s restent les même à toute échelle de temps.

Contribution du vent $\delta\eta_v$

La contribution du vent au niveau est compliqué à gérer. En effet, la surcôte est très dépendante du fetch, donc de l'orientation du vent . En outre, il existe un fort lien entre l'orientation du vent et la présence de certains types de vagues (mer de vent) comme décrit dans le texte principal. On est dans un contexte de probabilités extrêmes jointes, un sujet délicat à traiter. En l'absence de contrôle suffisant sur ces contraintes, on a décidé de considérer que la surcôte due au vent ne peut agir que de manière positive (augmentation du niveau) et donc co-intervient nécessairement avec les vagues se propageant vers la côte. C'est une contrainte qui maximise le risque.

En outre, on a raisonné uniquement le long d'un profil théorique perpendiculaire à la côte, estimant que les vagues et le vent donnés par les scénarios climatiques se propagent en ligne droite directement





vers la plage. Il est impossible de faire autrement dans la mesure où il n'existe pas de prospective sur la variabilité long terme de la direction du vent. Là aussi, on maximise le risque.

On calcule le niveau d'eau $\delta\eta_v$ forcé par le vent dans le cas d'un vent se propageant vers la côte à partir de la formule classique (Dean & Dalrymple, 2005, chap 5, Eq. 5.96) :

$$\boxed{\frac{\partial\eta_2}{\partial x} = \frac{n\tau_{zx}(\eta_2)}{\rho g (h + \eta_2)}} \quad (\text{A.2})$$

$\eta_2(x, t)$:=	élévation par rapport au niveau de référence z_0
$h(x)$:=	profondeur d'eau le long du profil
τ_{zx}	:=	$\tau_{zx} = \rho k U_{10}^2$ avec $k \approx 1.2 \times 10^{-6}$
$U_{10}(x, z)$:=	vitesse du vent
ρ	:=	densité de l'eau
g	:=	accélération de la pesanteur
n	:=	paramétrisation du cisaillement de fond (constante)

La vitesse du vent U_{10} est pris au max des valeurs réalistes sur la zone (en testant la sensibilité des résultats à une certaine variabilité).

Contribution de la pression atmosphérique $\delta\eta_a$

Elle est directement calculée à partir des données issues des prospectives ICW. Et la contribution de niveau est estimée à partir d'une hypothèse hydrostatique :

$$\boxed{\delta\eta_a = \frac{1}{\rho g} \delta p_a} \quad (\text{A.3})$$

où δp_a est la variation de pression atmosphérique associée à un évènement de période de retour considérée dans le scénario.

Contribution de l'IG $\delta\eta_a$

L'IG est difficile à calculer sans information précise sur le profil de plage (dont on ne connaît que les caractéristiques actuelles et en aucun cas les évolutions sur le long terme), et la nature précise du spectre de vagues. Sa quantification est donc encore moins fiable de manière prospective. Après plusieurs essais, il est convenu que le calcul de l'IG se fait selon une approche minimisation du risque. On considère l'IG max qu'on peut observer sur un domaine littoral généré par la hauteur H_s des vagues supposées transmettre 100% de leur énergie aux ondes de basse fréquence. On obtient des battements du plan d'eau de l'ordre de 1 m d'amplitude. La prise en compte de l'IG n'a pas été intégrée dans toutes les représentations, mais traitée de manière systématiquement optionnelle (avec/sans).

3 Construction de séries temporelles synthétiques

3.1 Notion de synthétique

Considérons une série temporelle $[\phi(t)]_{t \in \Omega}$, c'est à dire une suite ordonnée de valeurs réelles représentant une quantité physique quelconque (hauteur de vague, niveau d'eau, vitesse de vent, ...) variant au cours du temps t dans un intervalle D borné tel quel $\forall t, \phi(t) \in D$. Cette suite temporelle est dite synthétique si ϕ vérifie les mêmes moments probabilistes qu'une autre population composée d'observations quantifiables ϕ_o de la grandeur physique considérée. En d'autres termes, une suite synthétique –

ou par abus de langage *un synthétique* – est une série temporelle reconstruite de toutes pièces à partir de caractéristiques probabilistes établies sur de la donnée tangible. Un corollaire immédiat est qu’il existe une infinité de synthétiques à une série temporelle observée.

On rappelle que le moment probabiliste d’ordre s (s étant un entier naturel s) d’une fonction $P : D \rightarrow \mathbb{R}$ où D est l’intervalle possible des valeurs d’une grandeur physique ϕ , est :

$$m_s(\phi) = \int_{x \in D} t^s \cdot \phi(t) \cdot dt$$

3.2 Construction d’évènement extrême / tempête

Un synthétique peut décrire l’évolution temporelle des grandeurs physiques U_{10} (vent à 10 m de hauteur), p_a (pression atmosphérique) et H_s (hauteur significative des vagues) et de leurs contributions en terme de niveau d’eau $\delta\eta_v$, $\delta\eta_a$ et $\delta\eta_w$. Mais toutes ces grandeurs sont des valeurs uniques pour un évènement donné, les valeurs maximales observées pendant cet évènement. Pour passer de ces valeurs à l’expression en temps d’un synthétique, il faut convenir d’une **forme de tempête**.

Dans un contexte typiquement méditerranéen, on peut considérer pour une tempête caractéristique une série temporelle de 13 jours, avec une première phase sous condition météo-marine faible permettant le spin-up du modèle utilisant ce forçage, une seconde phase correspondant à l’évènement au sens strict (l’apex de la tempête montrant des grandeurs égales à celles choisies dans le scénario), et une troisième phase de relaxation de l’évènement jusqu’à forçage nul. La tempête en elle-même a une certaine asymétrie avec une montée du forçage H_s vers l’apex plus raide que la descente.

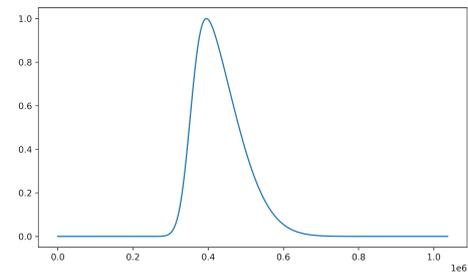


FIGURE A.1 : Exemple de forme de tempête

Il n’existe pas de prospective climatique sur le kurtosis et l’asymétrie d’une distribution de hauteur de vagues, et donc encore moins pour les autres paramètres. Donc il est impossible de définir si la forme de la tempête est susceptible de changer dans des évènements de période de retour différents.

On construit une forme de tempête $\mathcal{F}(t)$ de manière analytique avec une fonction Gaussienne décentrée, présentant une certaine asymétrie, et normalisée à 1 (figure A.1). On pondère les signaux H_s et les niveaux η_v , η_a et η_w par cette forme de tempête. On somme ces contributions et celles déjà calculées. On échantillonne le résultat avec une résolution de 5 secondes et on obtient les synthétiques qui vont servir de forçage aux simulations.

3.3 Résultats

On donne les représentations des 5 forçages synthétiques correspondant aux 5 scénarios prospectifs choisis (figures A.2, A.3, A.4, A.5 et A.6).



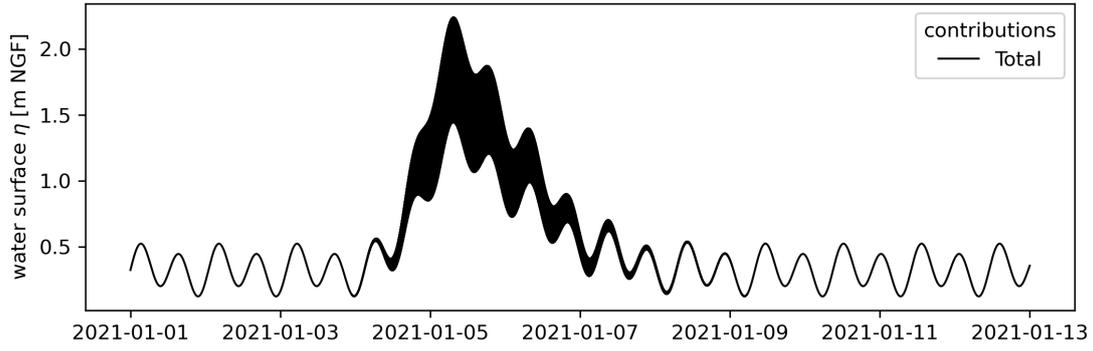


FIGURE A.2 : Représentation d'un synthétique calculé pour le scénario C020_R0010

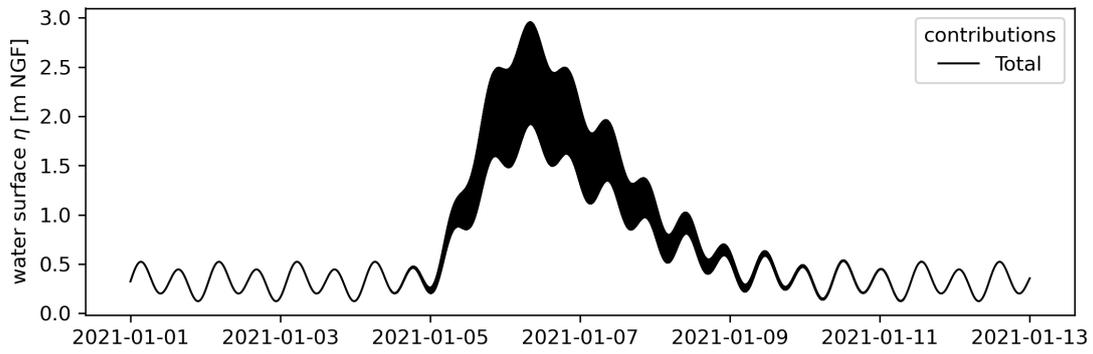


FIGURE A.3 : Représentation d'un synthétique calculé pour le scénario C020_R0100

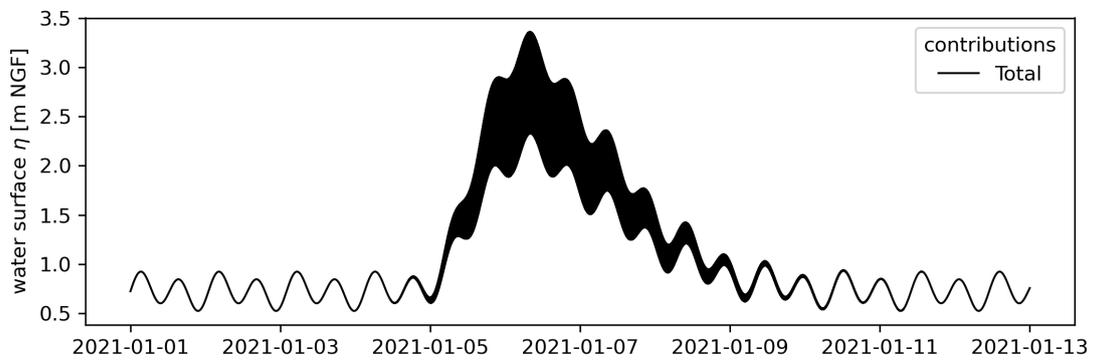


FIGURE A.4 : Représentation d'un synthétique calculé pour le scénario C060_R0100

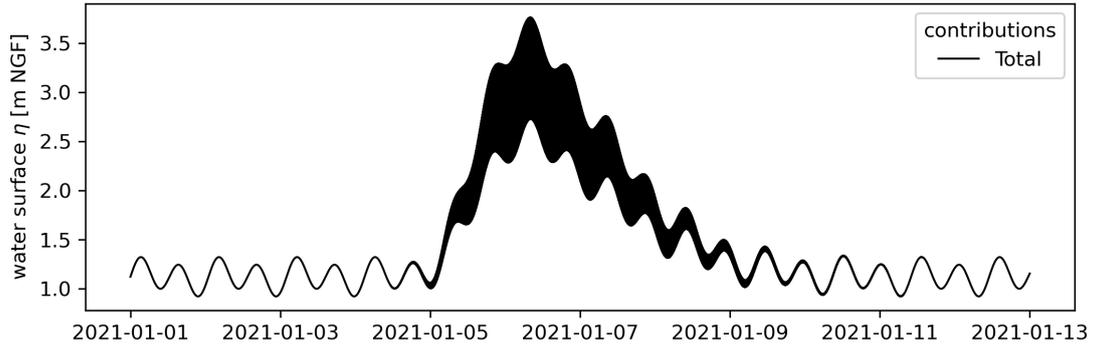


FIGURE A.5 : Représentation d'un synthétique calculé pour le scénario C100_R0100

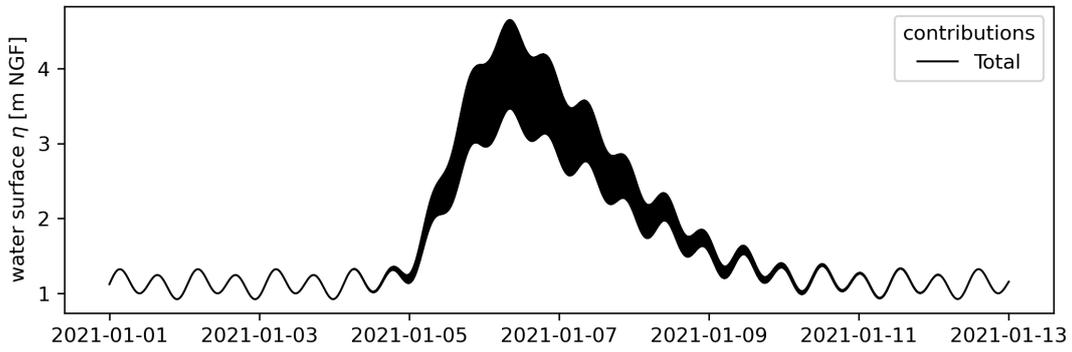


FIGURE A.6 : Représentation d'un synthétique calculé pour le scénario C100_R1000

On représente également les différentes contributions pour chacun de ces scénarios sur les figures [A.7](#), [A.8](#), [A.9](#), [A.10](#) et [A.11](#)

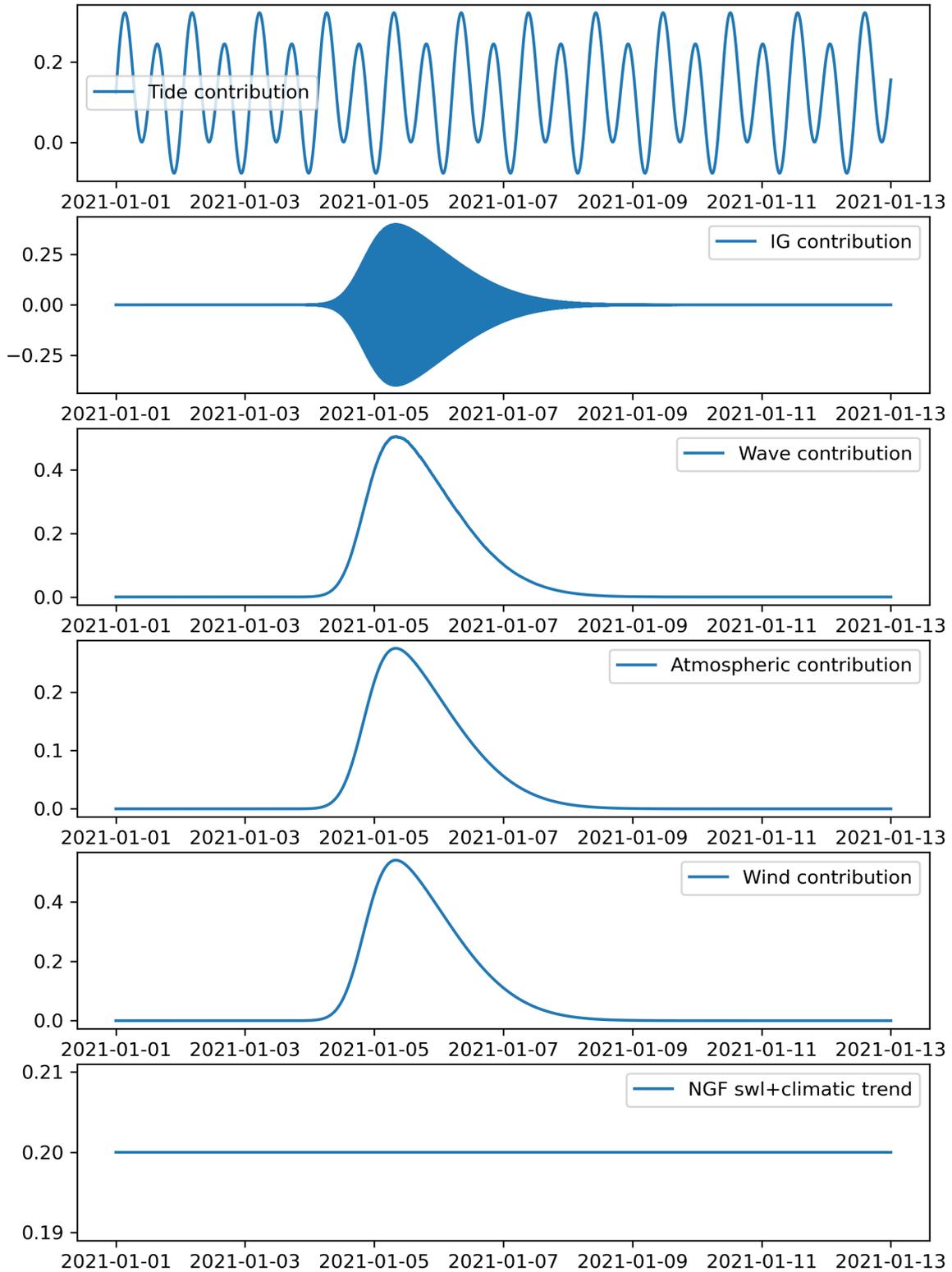


FIGURE A.7 : Représentation des contributions pour le scénario C020_R0010.

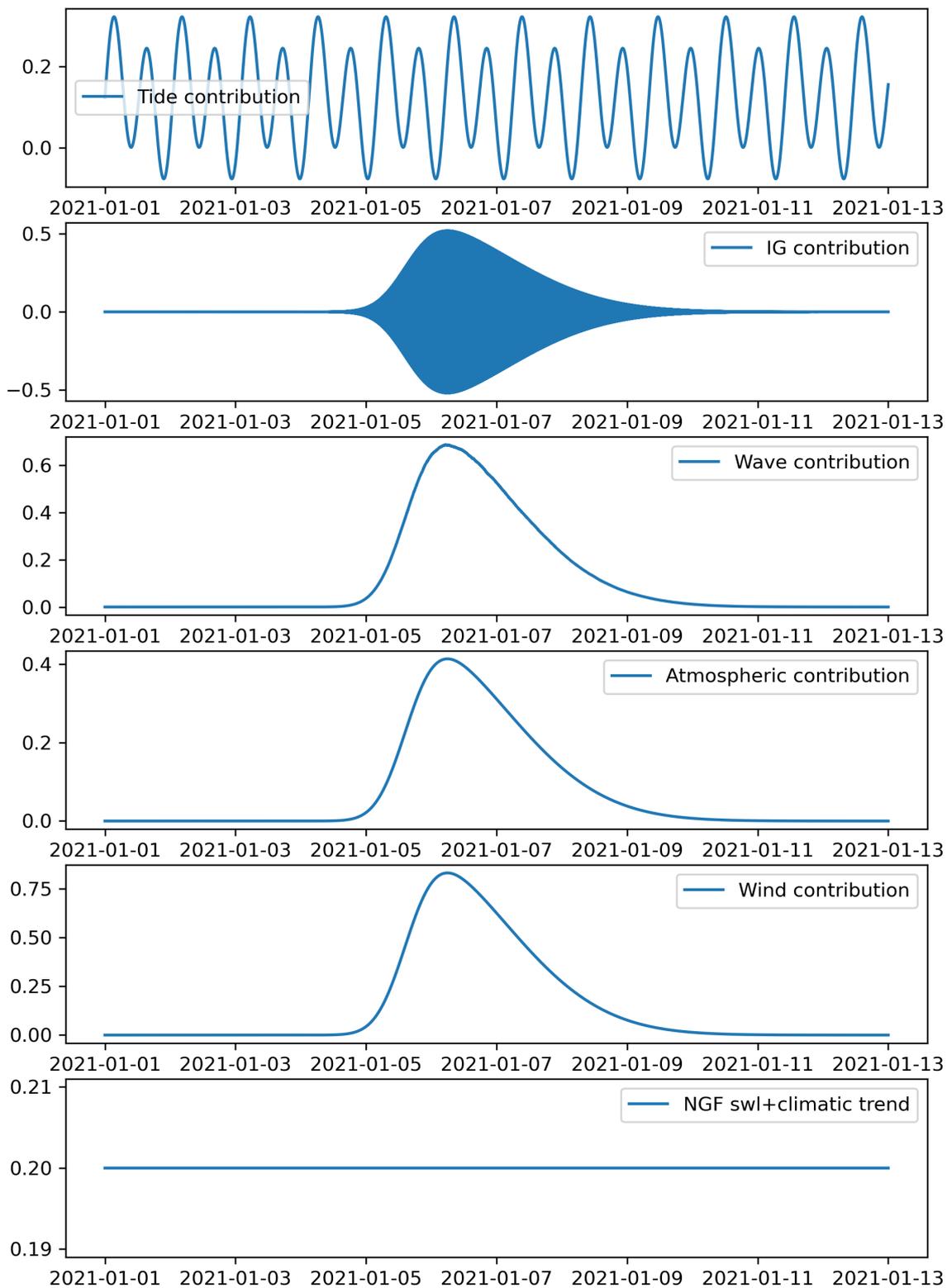


FIGURE A.8 : Représentation des contributions pour le scénario C020_R0100.

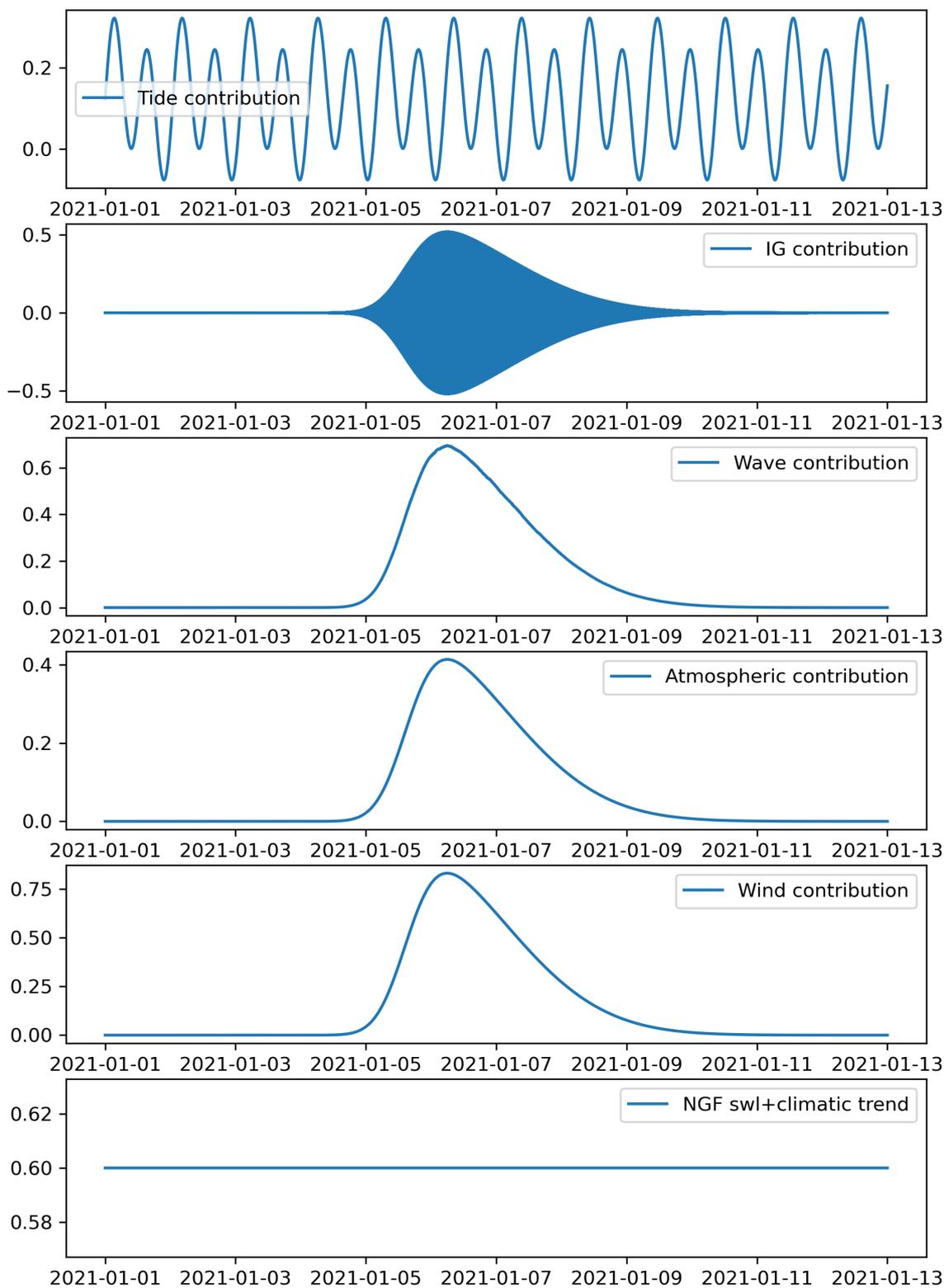


FIGURE A.9 : Représentation des contributions pour le scénario C060_R0100.



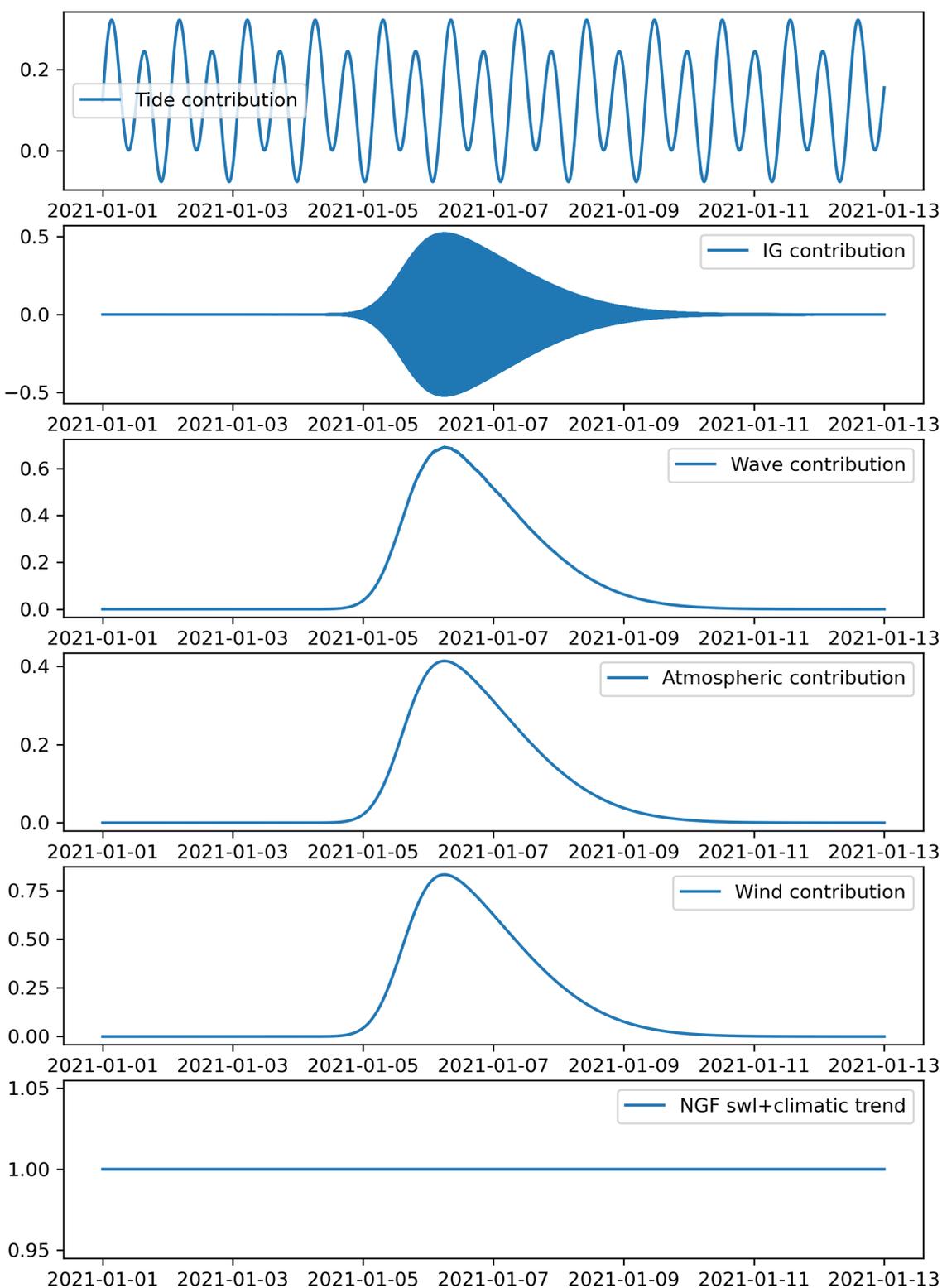


FIGURE A.10 : Représentation des contributions pour le scénario C100_R0100.

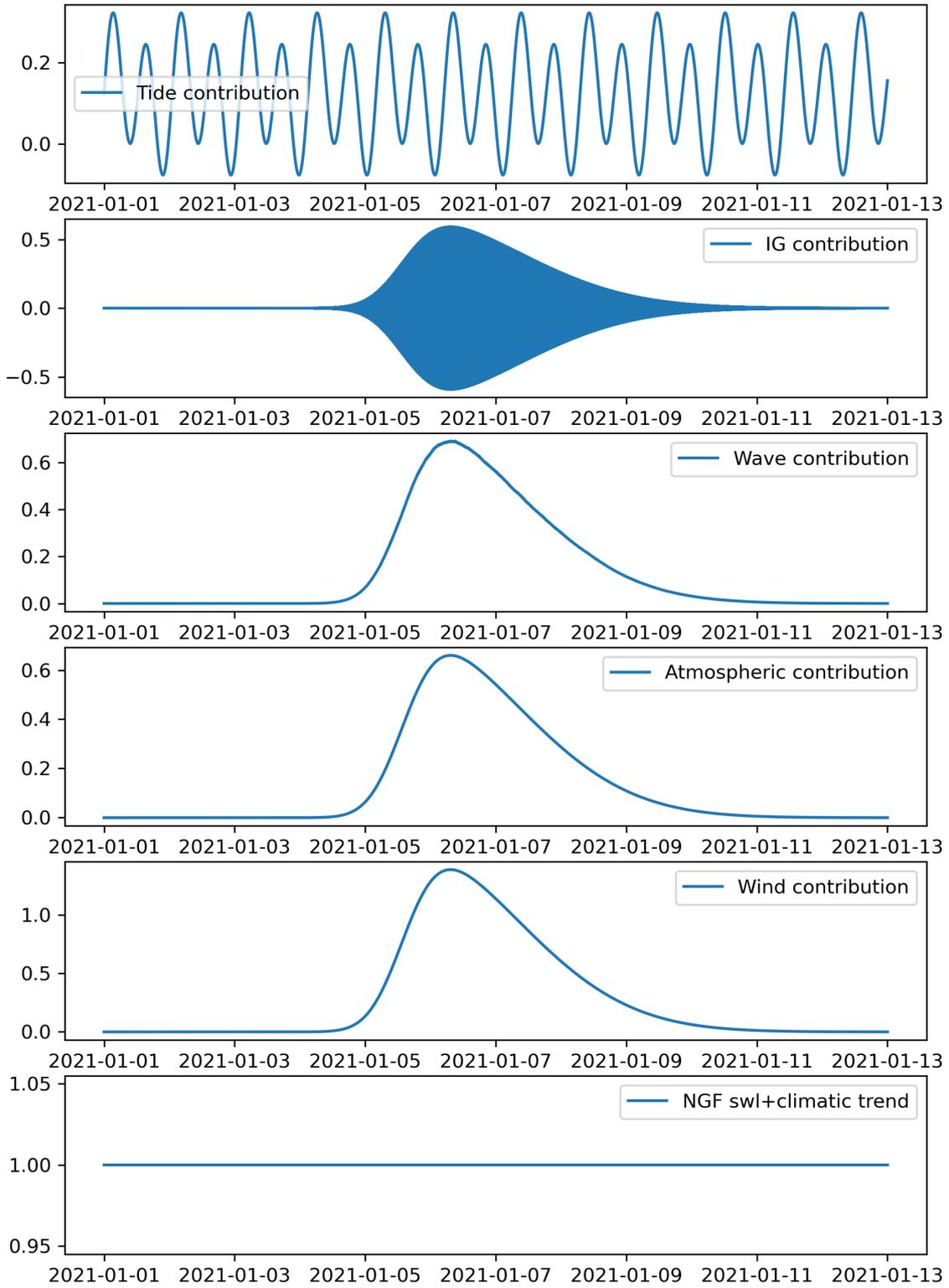


FIGURE A.11 : Représentation des contributions pour le scénario *C100_R1000*.



Annexe B

Présentation du modèle de propagation de l'action des vagues

Le terme D3DW désigne le couplage entre le module Flow de la suite logicielle Delft 3D et le module de vagues, une version intégrée à Delft 3D du modèle **Swan**. Dans cette étude, on utilise bien Delft 3D pour réaliser l'ensemble des calculs, mais on le force uniquement par les vagues (ce qui revient à utiliser Swan, c'est à dire un modèle spectral de propagation de l'action des vagues). Aussi, dans cette annexe, on se contente de présenter les caractéristiques du module vagues au sein de Delft 3D.

1 Lois fondamentales contrôlant le modèle

Le concept de répartition spectrale de l'énergie est particulièrement utile pour la représentation des états de mers ainsi que des transferts d'énergie entre les différentes composantes fréquentielles. Aux représentations spectrales de la surface libre s'ajoutent rapidement des lois de conservation énergétiques provenant de diverses considérations.

Grâce à des considérations géométriques, LONGUET-HIGGINS (1957) a montré que l'énergie d'un paquet d'onde se conserve suivant sa trajectoire. DORRESTEIN (1960) a fait la preuve que cette démonstration géométrique n'est en fait que le parallèle au théorème de Liouville en mécanique hamiltonienne. Malgré ce parallèle, il faudra attendre WHITHAM (1964) pour obtenir un premier lien précis entre l'approche spectrale et la mécanique hamiltonienne. Il ne présentera la première expression officielle de la loi de conservation de la densité spectrale d'énergie que trois ans plus tard [WHITHAM, 1967]. Je ne présenterai ici que l'idée derrière l'obtention de la loi de conservation de l'action ainsi que les conditions de sa validité. Pour une démonstration exhaustive se référer à MASSEL (1996).

Dans la suite, on définit :

- S_{tot} : Somme des termes sources et puits
- c_x : Vitesse de propagation dans l'espace géométrique (en $m.s^{-1}$)
- c_y : Vitesse de propagation dans l'espace géométrique (en $m.s^{-1}$)
- c_θ : Vitesse de propagation dans l'espace des directions (en s^{-1})
- c_σ : Vitesse de propagation dans l'espace des fréquences (en s^{-2})
- N : Densité de l'action de la houle (en $J.s$)

En se plaçant sous l'hypothèse que le nombre d'onde est une grandeur variant lentement avec la

profondeur et en montrant que la densité spectrale d'action est un invariant adiabatique dans l'espace (\vec{k}, \vec{x}) , on peut appliquer la loi de Liouville. Celle-ci stipule que la fonction de distribution (ici, $\Psi(\vec{k}, \vec{x}, t)$) est constante le long de n'importe quelle trajectoire de l'espace des phases. Concrètement, cette loi se formalise de la façon suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} N}_{(1)} + \underbrace{\nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{u}) N]}_{(2)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N}_{(3)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N}_{(4)} = \underbrace{S_{tot}(\sigma, \theta)}_{(5)} \quad (\text{B.1})$$

Dans cette équation, le terme (1) représente le taux local de changement de la densité d'action dans le temps. Le terme (2) représente la propagation de l'action dans l'espace géographique (avec la vitesse de propagation définie comme la vitesse de groupe ajoutée au courant local \vec{u} supposé uniforme verticalement). Le terme (3) représente le décalage de la fréquence relative dû d'une part aux variations des profondeurs (changement de l'indice de propagation du milieu) et d'autre part aux variations dans les courants (effet doppler). On attribue à ces effets la vitesse de propagation c_σ dans l'espace des fréquences. Et le terme (4) représente la réfraction induite par la profondeur et le courant (rotations induites par les variations de l'indice de propagation du milieu). Ces effets se propagent avec la vitesse de propagation c_θ dans l'espace des directions. Enfin, le terme (5) correspond à la somme des termes sources et puits S_{tot} .

Les expressions des vitesses de propagation sont tirées de la théorie linéaire [WHITHAM, 1999 ; DINGEMANS, 1997]. Elles sont définies ci dessous, avec s une coordonnée spatiale colinéaire à la direction de propagation, m une coordonnée spatiale orthogonale à s et $d = h + \bar{\eta}$ la profondeur d'eau.

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = (c_x, c_y) = \vec{c}_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2|\vec{k}|d}{\sinh 2|\vec{k}|d} \right] \frac{\omega \vec{k}}{|\vec{k}|^2} + \vec{u} \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right) - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial s} \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{|\vec{k}|} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right) \quad (\text{B.4})$$

L'enjeu de cette équation est pour le moment caché dans le terme S_{tot} . En effet, les vitesses liés aux transferts énergétiques sont définis à partir de la théorie linéaire. Pour obtenir une représentation fidèle de l'évolution des spectres, il faut donc rendre compte de toutes les dynamiques faisant apparaître ou disparaître de l'énergie du fait d'effets non pris en compte dans la théorie linéaire. Cette équation ne possède à l'heure actuelle pas de solution analytique exacte. Il faut nécessairement passer par un modèle numérique, ce qui multiplie grandement les approches liées à ces termes sources. Classiquement, le terme source comprend un terme traduisant un apport d'énergie par le vent, un terme traduisant une représentation des transferts non linéaires d'énergies entre les vagues et des termes de dissipation soit liés au déferlement par moutonnement, soit au déferlement géométrique soit par friction au fond. Les formulations pour chacune de ces parties sont définies de multiples manières.

Pour résoudre cette équation, D3DW utilise une méthode des différences finies, avec un schéma implicite à la fois pour l'espace géographique et fréquentiel plus l'ajout d'une approximation centrale dans l'espace fréquentiel. Le modèle est ainsi inconditionnellement stable.

Si l'on revient à l'équation de conservation de l'action B.1, le seul terme devant encore être explicité pour pouvoir décrire l'entièreté de la physique du modèle est le terme source S_{tot} . Pour cette étude, le seul terme source d'intérêt est la croissance liée au vent (S_{in}). Les termes puits sont pour leur part : le déferlement par moutonnement ($S_{ds,w}$), le déferlement géométrique ($S_{ds,f}$), la dissipation par friction de fond ($S_{ds,b}$) et deux types d'interactions vagues-vagues, les triplets notés $S_{nl,3}$ et les quadruplets



notés $S_{nl,4}$. Nous avons donc :

$$S_{tot} = S_{in} + S_{ds,w} + S_{ds,f} + S_{ds,b} + S_{nl,3} + S_{nl,4} \quad (\text{B.5})$$

- S_{in} : Terme source de croissance des vagues par l'action du vent
- $S_{ds,w}$: Terme puits de dissipation lié au déferlement par moutonnement
- $S_{ds,f}$: Terme puits de dissipation lié à la friction au fond
- $S_{ds,b}$: Terme puits de dissipation lié au déferlement géométrique
- $S_{nl,3}$: Terme puits d'interaction vague-vague par triplets
- $S_{nl,4}$: Terme puits d'interaction vague-vague par quadruplets

2 Croissance des vagues

La génération de vagues par le vent, bien que très visuelle, est restée pendant longtemps difficile à mesurer et reste à ce jour un phénomène particulièrement difficile à modéliser. Aujourd'hui, ce phénomène est décrit avec succès exclusivement en eau profonde par la somme d'un mécanisme de résonance [PHILLIPS, 1957] et d'un mécanisme de rétroaction [MILES, 1957]. En eau peu profonde, des extensions de la théorie de Miles ont été proposées [MONTALVO et al., 2013] mais n'ont pas encore été mises à disposition dans les modèles numériques. Les formulations historiques, bien que contestables en eau peu profonde, seront appliquées dans tout le domaine par manque d'une alternative exploitable à ce jour.

Dans SWAN, le terme source traduisant le mécanisme de transfert de l'énergie du vent aux vagues S_{in} suit les formulations de MILES (1957) et PHILLIPS (1957). Il est donc décrit comme la somme d'une croissance linéaire et exponentielle.

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (\text{B.6})$$

Le coefficient A provient de CAVALERI et RIZZOLI (1981) défini tel que :

$$A(k) \approx \frac{80\rho_a^2\omega}{\rho_w^2g^2k^2}U_*^4 \quad (\text{B.7})$$

avec les définitions suivantes :

- ρ_a : Densité de l'air (en $Kg.m^{-3}$)
- ρ_w : Densité de l'eau (en $Kg.m^{-3}$)
- ω : Pulsation (en s^{-1})
- g : Accélération de la gravité (en $m.s^{-2}$)
- k : Nombre d'onde (en m^{-1})
- U_* : Vitesse de friction du vent (en $m.s^{-1}$)
- U_{10} : Vitesse du vent à 10m (en $m.s^{-1}$)
- C_D : Coefficient de traînée (sans unité)
- h : Profondeur (en m)

où U_* la vitesse de friction qu'il est possible de définir via la vitesse du vent à 10 mètres U_{10} , ρ_a et ρ_w respectivement la densité de l'air et de l'eau, C_D un coefficient de traînée provenant de WU (1982) et où la pulsation $\omega = 2\pi f$ et le nombre d'onde $k = 2\pi/\lambda$ sont reliés par la relation de dispersion suivante.

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (\text{B.8})$$

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.065 \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B.9})$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (\text{B.10})$$

Le coefficient B provient pour sa part de KOMEN et al. (1984). Dans cette formulation, C est la vitesse de phase et θ_w correspond à la direction du vent.

$$B = \max \left(0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{U_*}{C} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right) \sigma \quad (\text{B.11})$$

Cette méthode descriptive de l'évolution des spectres de vagues a fait ses preuves en profondeur infinie, mais est de nos jours remise en question dans le contexte des vagues en faible profondeur.

3 Dissipation par moutonnement

Dans D3DW, le déferlement par moutonnement est pris en compte via plusieurs représentations. Nous utiliserons ici la représentation proposée par la formulation générale du WAMDI GROUP (1988) plus tard calibrée et simplifiée dans des conditions idéalisées par KOMEN (1994).

$$S_{ds,w} = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (\text{B.12})$$

Dans cette version de l'équation, le coefficient de pente Γ est portée par le ratio entre la valeur de la pente globale \tilde{s} et la valeur de la pente pour un spectre de Pierson-Moscowitz \tilde{s}_{PM} ainsi que par un coefficient obtenu par calibration sur la balance énergétique [KOMEN et al., 1984].

$$\Gamma = C_{ds} \left(\frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^4 \quad (\text{B.13})$$

$$C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5} \quad (\text{B.14})$$

Les valeurs moyennes présentes dans ces équations sont définies ci-dessous :

$$\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}} \quad (\text{B.15})$$

$$\tilde{s}_{PM} = \sqrt{3.02 \times 10^{-3}} \quad (\text{B.16})$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{B.17})$$

$$\tilde{\sigma} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (\text{B.18})$$

$$\tilde{k} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (\text{B.19})$$

avec

- C : Vitesse de phase (en $m.s^{-1}$)
- θ_w : Direction du vent (en degrés)





4 Dissipation par déferlement géométrique

Dans le modèle spectral D3DW, la dissipation par déferlement géométrique est exprimée selon un modèle de bore étendu à une série de vagues aléatoires. Cette formulation développée par BATTJES et JANSSEN (1978) est très classique dans les modèles spectraux. D'abord développé pour le calcul complet de la dissipation D_{tot} , ELDEBERKY et BATTJES (1996) étend le modèle pour le calcul du spectre complet moyennant la supposition que la forme du profil spectral ne sera que peu affectée lors du déferlement. Il obtient alors la formulation suivante :

$$S_{ds,b} = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (\text{B.20})$$

avec D_{tot} le taux de dissipation total dû au déferlement (sans unité).

Avec le taux de dissipation total dû au déferlement D_{tot} défini suivant le taux de déferlement Q_b et une hauteur maximale de houle H_m , on a :

$$D_{tot} = -\frac{\sigma Q_b}{8\pi} H_m^2 \quad (\text{B.21})$$

avec Q_b le taux de déferlement des vagues (en %) et H_m la hauteur maximale des vagues (en m).

Dans cette formulation, le taux de déferlement Q_b est exprimé de la manière suivante :

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (\text{B.22})$$

Ce modèle de dissipation, omniprésent dans les modèles spectraux existants est très fortement dépendant de la hauteur maximale de houle H_m . Celle-ci est pour sa part définie de manière empirique, à partir de la profondeur h et d'un paramètre de déferlement γ_{br} souvent adapté au système étudié. C'est l'un des paramètres de calibration fondamentaux dans les modèles spectraux.

$$H_m = h\gamma_{br} \quad (\text{B.23})$$

5 Dissipation par friction au fond

Dans les modèles spectraux, la friction au fond est souvent exprimée sous une même forme globale :

$$S(\sigma, \theta) = -C_{bot} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kh)} E(\sigma, \theta) \quad (\text{B.24})$$

où C_{bot} est le coefficient de friction de Hasselmann (en $m^2.s^{-3}$).

Dans cette équation, C_{bot} est un coefficient variable suivant la formulation de la friction utilisée [K. HASSELMANN et al., 1973 ; COLLINS, 1972 ; MADSEN et al., 1988]. La formulation de JONSWAP ou de Hasselmann revient à spécifier à la main une valeur fixe de C_{bot} (par défaut $0.038m^2s^{-3}$). Les deux autres méthodes passent par une définition de C_{bot} suivant vitesse orbitale au fond U_{rms} calculée suivant la théorie linéaire :

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kh)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{B.25})$$

avec U_{rms} la vitesse orbitale au fond (en $m.s^{-1}$).

Pour la méthode de COLLINS (1972), le coefficient C_{bot} sera calculé suivant une valeur du coefficient de friction adimensionnel C_f fixé selon type de fond dont il est question.

$$C_{bottom} = gC_f U_{rms} \quad (\text{B.26})$$



où C_f est le coefficient de friction de Collins (sans unité).

Pour la méthode de MADSEN et al. (1988), utilisée dans cette étude, le coefficient C_f est calculé suivant le rapport entre l'amplitude d'excursion des particules d'eau au fond a_b (définie selon la théorie linéaire) et une longueur de référence de la rugosité K_N . On a alors les relations suivantes :

$$C_f = \frac{f_w}{\sqrt{2}} \quad (\text{B.27})$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) = -0.08 + \log_{10} \left(\frac{a_b}{K_N} \right) \quad (\text{B.28})$$

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{B.29})$$

avec a_b l'amplitude d'excursion au fond (en m), et K_N le coefficient de friction de Madsen (en m).

Quelle que soit la complexité des formulations, toutes reposent sur la valeur d'un coefficient paramétrique (soit C_{bot} , soit C_f , soit K_N).

6 Prise en compte des effets non-linéaires

Comme leur nom ne l'indique pas, les effets non-linéaires correspondent aux transferts d'énergie s'effectuant au sein du spectre de vague du fait d'interactions entre différentes composantes spectrales. Traditionnellement, on sépare les phénomènes non linéaires d'interactions vague-vague en deux grandes catégories. La prise en compte de ces phénomènes au sein des modèles spectraux est à la source de la distinction entre modèles dits de première, deuxième ou troisième génération.

Le phénomène des **"quadruplets"** (porté par le terme $S_{nl,4}$), est prépondérant en eau profonde. Le calcul complet de l'interaction vague-vague par quadruplets étant trop lourd [YOUNG, 1989], il a été remplacé par la Discrete Interaction Approximation ou DIA [S. HASSELMANN et al., 1985]. Cette approche a été validée en eau profonde puis étendue aux eaux peu profondes par KOMEN (1994). C'est cette dernière formulation qui a été développée dans le modèle. Le principe de la DIA est de définir le terme source $S_{nl,4}$ suivant la variance entre seulement 3 composantes du spectres, liées par une relation simple à la fois en fréquence et en direction. Les transferts d'énergie entre ces trois composantes impliquées dans le phénomène de résonance sont calculés pour toutes les valeurs discrétisées du spectre.

Le phénomène des **"triplets"** (porté par $S_{nl,3}$), est fondamental lors du passage en eau très peu profonde. Cette interaction vague-vague induit une perte d'énergie à une fréquence fondamentale σ correspondant à un transfert d'énergie vers le premier harmonique 2σ proportionnel à l'écart énergétique observé entre $E(\sigma, \theta)$ et $E(\sigma/2, \theta)$. Dans D3DW, le calcul de cette interaction s'effectue via la Lumped Triad Approximation ou LTA définie par ELDEBERKY et BATTJES (1996) sans prendre en compte les transferts vers la bande énergétique infragravitaire (IG).

Les formulations exactes de ces phénomènes en eau peu profonde sont des thématiques de recherches encore actives à ce jour.

7 Conditions aux limites

Dans D3DW, les frontières sont toutes totalement absorbantes en énergies par défaut.

Les forçage d'entrée sont spécifiés sous la forme d'un spectre directionnel de répartition de l'énergie. Ces spectres sont définis sur des portions géographiques du domaine de calcul et présentent une résolution et une emprise tant directionnelle que fréquentielle. Les limites hautes et basses sont fixées par l'utilisateur. Les cases directionnelles demandées par l'utilisateur sont équi-réparties, mais la taille



des cases fréquences est définie logarithmiquement suivant le nombre N_f de cases fréquences requises par l'utilisateur.

$$\Delta f = \left(-1 + \left[\frac{[f_{\max}]}{[f_{\min}]} \right]^{1/[N_f]} \right) f \quad (\text{B.30})$$

Seules les cases fréquence direction définies par l'utilisateur sont résolues. Les parties des spectres définis aux frontières n'entrant pas dans le domaine de calcul ne sont pas prises en compte lors des calculs. Il est à noter que D3DW ajoute au spectre défini par l'utilisateur une répartition spectrale d'énergie analytique dans les hautes fréquences. Cette queue du spectre est définie suivant une loi en f^{-m} avec une valeur de m définie suivant la méthode descriptive du moutonnement utilisée (dans notre cas $m = 4$). Cet ajout est pris en compte pour la résolution des phénomènes non linéaires, du déferlement par moutonnement, ainsi que pour le calcul des grandeurs de sorties intégrées.

Les frontières où ne sont pas spécifiées des spectres de houles entrant dans le domaine de calcul supposent une entrée d'énergie nulle provoquant des "zones d'ombres" partant des coins limites non forcés en énergie. Ces zones d'ombre s'étendent traditionnellement sur un cône d'ouverture égale à la racine de l'ouverture du spectre (généralement de l'ordre de 30°). Ce problème est bien sûr inexistant si toutes les frontières sont forcées.

Annexe C

Rappel historique sur le dimensionnement optimal et ses développements vers la morphodynamique de plage

La morphodynamique des plages caractérise l'évolution de la morphologie d'une plage, à savoir l'évolution sa bathymétrie. Il existe de nombreuses méthodes pour calculer la morphodynamique allant des modèles empiriques aux modèles basés sur le processus. Ces derniers peuvent être classés en plusieurs catégories, telles que i) les modèles d'évolution du profil, qui utilisent uniquement le transport transversal, ii) les modèles morphologiques 2D, qui utilisent des équations de vagues et de courants moyennées en profondeur pour modéliser le transport des sédiments tout en négligeant les variations verticales des paramètres dérivés des vagues, ainsi que iii) les modèles 3D et quasi-3D, qui déterminent l'évolution des sédiments en utilisant les variations horizontales et verticales des paramètres dérivés des vagues. Le modèle Opti-Morph est basé sur le contrôle optimal. Cette méthode d'optimisation est née après de nombreux travaux sur le littoral. Les premières idées de F. BOUCHETTE, B. MOHAMMADI & AL étaient de travailler directement sur l'optimisation de structures de protection du littoral [D. ISEBE et al., 2008]. Ensuite, des travaux se sont concentrés sur la position optimale de structures de protection du littoral comme les Géotubes [Damien ISEBE et al., 2008 ; COOK et al., s. d.]. C'est enfin en 2011 que ces applications d'optimisation sur le littoral ont pris une dimension différente. La question qui s'est posée est : « *Et si on ne cherchait pas cette fois-ci la forme ou l'emplacement optimal d'une structure mais on cherchait la forme optimale de la plage* » et c'est à partir de là que le concept de morphodynamique des plages par calcul optimal est né. Cette question n'étant pas si simple appelait d'autres questions physiquement plus compliqués. En effet, il est intéressant d'optimiser la forme d'une plage mais ceci nécessite de l'optimiser selon un critère bien particulier que l'on appellera fonction de coût \mathcal{J} . Il a donc été important de déterminer des hypothèses afin de pouvoir optimiser celle-ci. La dernière hypothèse a été d'admettre que « *La nature cherche à minimiser l'énergie qu'elle dépense* » et donc cela reviendrait à dire que la plage cherche à évoluer de telle sorte que l'énergie des vagues soit la minimale. C'est sur ce principe que les développements de COOK. M & AL ont été effectués pour donner naissance à Optimorph [COOK et al., 2021a], un code de calcul morpho-dynamique 1D reposant sur la théorie du transport optimal et nécessitant un nombre très réduit de paramètres physiques. Des premiers travaux de validation ont été effectués notamment en confrontant ce modèle à d'autres modèles très classiques comme XBeach [COOK et al., 2021b]. La suite de ces travaux de développement et validation ont été laissés à DUPONT. R & AL.

1 Optimisation sur des structures de protection du littoral

La première partie de cet état de l'art va montrer les travaux qui ont précédé l'évolution de la morphodynamique des plages. Dans un premier temps, ces travaux concernaient principalement les structures de protection du littoral.

1.1 Forme optimale de structures

Les travaux d'optimisation de forme de structures de défense du littoral [D. ISEBE et al., 2008] se sont concentrés dans un premier temps sur des structures permettant de casser l'agitation des vagues sur un domaine particulier. L'hydrodynamique sur le domaine est modélisée par des équations d'ondes de Helmholtz qui est un modèle dérivé du modèle bien connu de Berkhoff BERKHOFF, s. d. Ce modèle est très adapté en eau profonde lorsqu'il y a une propagation de la houle à fond constant.

Ensuite, il était nécessaire d'évaluer la fonction de coût \mathcal{J} à minimiser afin d'obtenir la forme optimale. Dans ce cas, celle-ci sera calculée de telle sorte que la hauteur d'eau ξ soit la minimum sur l'ensemble du domaine.

Avec ce critère, la forme optimale obtenue ressemble à la figure C.1 suivante :



FIGURE C.1 : Forme optimale minimisant une fonction de coût \mathcal{J} pour un paramétrage donné

Afin d'être sûr de la viabilité de cette structure, il convient de représenter la hauteur d'eau ξ dans les 3 configurations de la figure C.2 suivante :

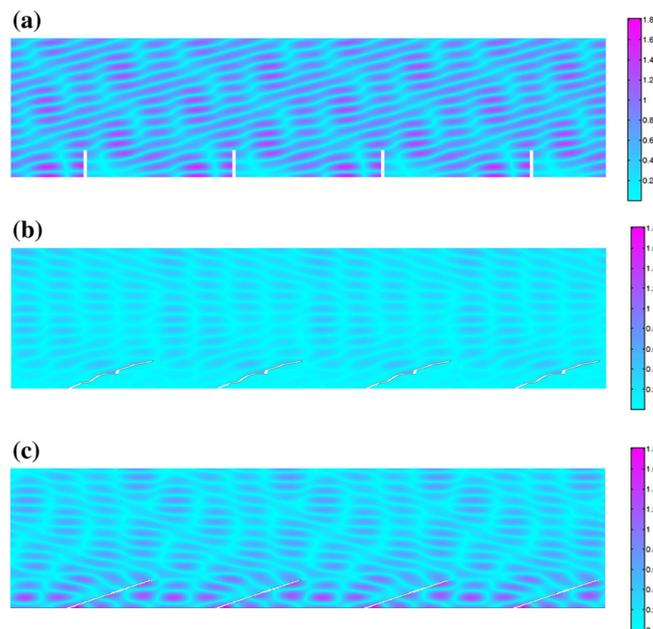


FIGURE C.2 : Valeur absolue de ξ résultant de la réflexion (a) sur des structures rectangulaires perpendiculaires à la paroi, (b) sur des structures optimisées sans contrainte de faisabilité, (c) sur des structures ayant le même angle que les structures optimisées mais droites (ondes entrantes NW avec $T=2$ s et $a=0.5$ m).

Dans la configuration de structure optimale (b), la hauteur d'eau ξ moyenne est nettement inférieure aux autres configurations. Il est de plus très surprenant de voir que dans un cas très similaire à la structure optimale (c), les résultats semblent très éloignés des résultats optimaux.



Avec les connaissances de la littérature actuelle, il convenait de rejeter la forme de la structure figure C.1. Les travaux d'optimisation de forme se sont ensuite dirigés vers les positions optimales de systèmes de protection du littoral.

1.2 Port de la Turballe

Un des grands projets d'aménagements portuaires de ces futures années est l'aménagement du port de la Turballe. Pour le dimensionnement de cet ouvrage, BRLi, bureau d'études spécialisé dans les domaines liés à l'eau, a fait appel à COOK et al., 2021c afin de confirmer leur idée sur la configuration optimale d'aménagement du port.

Afin d'accueillir plus de plaisanciers et réduire l'agitation à l'intérieur du port, il a été proposé les extensions du port présents sur la figure C.3 suivante :

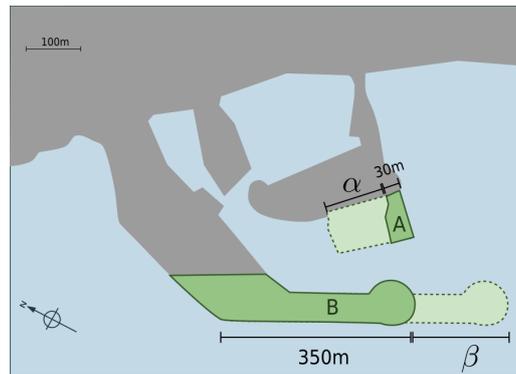


FIGURE C.3 : Configurations possibles pour le port de la Turballe.

Dans cette figure, il y a deux paramétrages à gérer, à savoir les longueurs des structures A et B . Pour gérer au mieux cette optimisation, il est nécessaire de modéliser dans l'hydrodynamique du port. Pour ce faire, il sera utilisé une nouvelle fois le modèle d'Helmholtz pour les mêmes raisons que l'utilisation dans la partie 1.1. Ensuite, il sera nécessaire de créer une fonction de coût minimisant l'agitation dans le port. Celle-ci sera élaborée de la manière suivante dans l'équation (C.1).

$$\mathcal{J}_n(\psi) = \frac{1}{K(\mathcal{P})} \frac{1}{|\Omega(\psi)|} \int_{\Omega(\psi)} \mathcal{E}_n(\psi, \mathbf{x}) \mathcal{P}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (\text{C.1})$$

La quantité $\mathcal{E}_n(\psi, \mathbf{x})$ est l'énergie de surface totale dénommée sur le domaine, associée au scénario de forçage n et à la configuration du port. La fonction $\mathcal{P}(\mathbf{x})$ est nommée fonction de poids spatial, nous permet de prioriser la minimisation de l'agitation sur certaines zones privilégiées du le port comme on peut voir sur la figure ci-dessous C.4 :

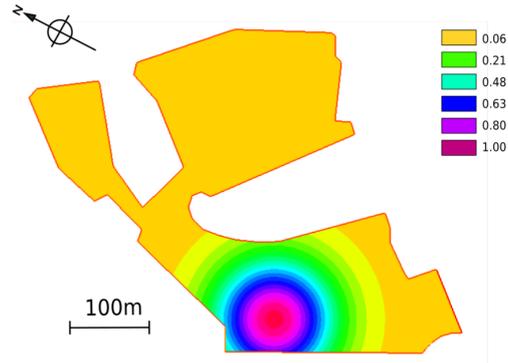


FIGURE C.4 : Fonction de poids \mathcal{P} sur Ω .

Les fonctions K et $|\Omega(\psi)|$ sont égales à $K(\mathcal{P}, \Omega(\psi)) = \int_{\Omega(\psi)} \mathcal{P}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$ et à la surface totale du domaine : ceci permet d'adimensionner la fonctionnelle.

La fonctionnelle cumulant les n scénarios est ensuite calculée dans l'équation (C.2) suivante :

$$\mathcal{J}(\psi) = \frac{\sum_{n=1}^N a_i(n) \mathcal{J}_n(\psi)}{\sum_{n=1}^N a_i(n)} \quad (\text{C.2})$$

avec les $a_i(n)$ correspondant aux poids du scénario n donné.

Une fois cette paramétrisation effectuée, une grille de $(\alpha, \beta) \in [0, 150] \times [0, 200]$ est créée afin de calculer toutes les valeurs de la fonctionnelle pour toutes ces configurations. De ce fait, la configuration optimale sera la configuration où le couple (α, β) donnera la fonctionnelle \mathcal{J} la plus faible. Cette solution présente sur la figure C.5

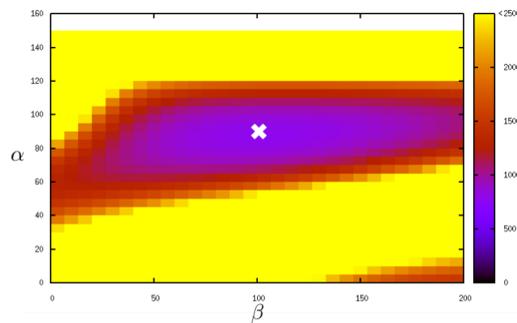


FIGURE C.5 : Couple optimal de (α, β) pour la configuration du port de la Turballe.

nous montre qu'il existe un unique couple solution au centre du domaine. Ces travaux ont pu confirmer l'avis que BRLi avait sur les choix stratégiques de dimensionnement du port. La solution a donc été choisie par le BRLi pour l'aboutissement de ce projet.

2 Optimisation d'emplacements de structures de protection littorale

Une nouvelle approche en termes d'optimisation de structures de protection du littoral est de chercher la position optimale d'un ouvrage de protection du littoral. Bien souvent, on cherche à limiter des facteurs comme l'agitation de la houle, l'érosion des plages etc.

2.1 Position de structure de protection optimale à la pointe de l'Espiguette

Les premiers travaux de ISÈBE & AL. [Damien ISEBE et al., 2008 ; ISÈBE et al., 2014] ont permis de trouver la position optimale d'une structure de défense du littoral permettant de limiter l'érosion de la plage de Le Grau du Roi-Le Boucanet.

En utilisant un modèle numérique analogue à celui de la partie 1.1, basé sur les la résolution des équations d’Helmholtz, la configuration optimale est recherchée de telle sorte que la fonction de coût \mathcal{J} limite l’érosion de la plage sur un domaine D .

Avant de définir la fonction de coût, il est nécessaire de rappeler que les observations de l’érosion par les océanographes montrent que vagues peuvent être grossièrement classées en deux catégories en fonction de leur hauteur H , inférieure ou supérieure à une valeur critique H_{lim} . En principe, celles qui sont supérieures à H_{lim} , principalement présentes lors des tempêtes, sont érosives. Elles génèrent une grande énergie mécanique. En revanche, lorsque $H < H_{lim}$, les vagues favorisent la reconstruction des plages érodées. La première classe de vagues ($H > H_{lim}$) sera appelée érosive et la deuxième classe constructive ($H < H_{lim}$).

La fonction de coût \mathcal{J}_θ est définie selon la direction de la vague θ en tenant considération de cette hauteur limite de la manière suivante :

$$\mathcal{J}_\theta = \frac{\int_D E_{H>H_{lim}} dS}{\int_D E_{H<H_{lim}} dS} + (\|U_{orb}\| - \|U_{orb}^{initial}\|)_+ + \left(\int_D E_{H<H_{lim}} dS - \int_D E_{H<H_{lim}^{initial}} dS \right)_+ \quad (C.3)$$

avec $(x)_+ = \max(x, 0)$, E l’énergie de la houle, H la hauteur d’eau, H_{lim} la hauteur d’eau limite, U_{orb} la vitesse orbitale. Cette fonctionnelle a donc été définie de telle sorte qu’elle donne une indication significative sur le niveau d’érosion de la plage.

Afin d’avoir une estimation réaliste, \mathcal{J} est calculé comme la somme des fonctions de coûts en tenant compte dans p_θ de la probabilité qu’une vague de direction θ arrive.

$$J = \sum p_\theta \mathcal{J}_\theta \quad (C.4)$$

Une fois cette fonction de coût évaluée, un grand nombre de simulations sont effectués sur les différentes positions possibles de la structure et afin d’obtenir la position correspondant au \mathcal{J} minimum. Les résultats de la configuration optimale sont représentés sur les Figures C.6 et C.7 suivante :

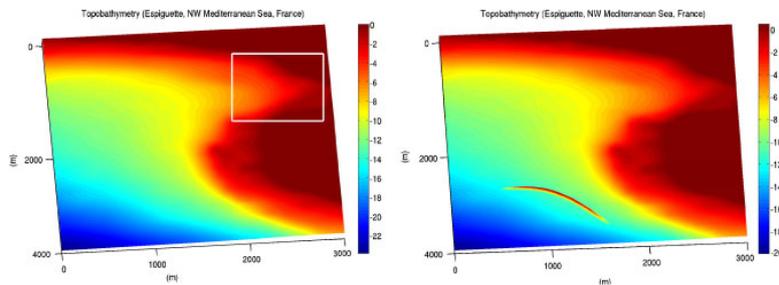


FIGURE C.6 : À gauche : la bathymétrie initiale de la région D pour le calcul de la fonction de coût ; à droite : la bathymétrie modifiée avec la structure de protection optimisée.

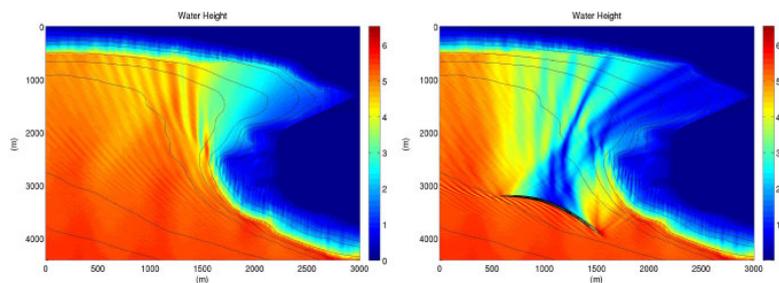


FIGURE C.7 : La hauteur d’eau H dans l’ensemble du domaine : (gauche) pour la configuration initiale, (droite) pour la configuration optimisée.

Les résultats ci-dessous montrent bien que le système de protection atténuer la houle le long de la côte. En effet, une grande zone derrière la structure se retrouve avec une hauteur d’eau H très faible.

2.2 Position optimale de géotube

Les travaux de Damien ISEBE et al., 2008 s'appliquaient à toutes sortes de structures de protection du littoral mais étaient principalement concentrés sur les géotubes. Ces travaux ont pu alimenter et inspirer ceux de COOK.M & AL dans ses cas-test d'optimisation COOK et al., s. d. avec la nouvelle approche de modélisation hydro-morphodynamique. Les détails de ces seront présentés plus précisément dans la partie 3.2.

3 Vers la modélisation de l'hydro-morphodynamisme par optimisation

Après avoir effectué de nombreux travaux dans l'optimisation de formes et d'emplacements de structures de protection du littoral, les travaux de BOUCHETTE. F ET MOHAMMADI. B ont pris une tout autre dimension. Ces nouveaux travaux se sont concentrés sur l'optimisation de la forme du fond-marin soit la bathymétrie. Le fond marin agit cette fois-ci comme une structure flexible et s'adapte à une certaine quantité hydrodynamique. C'est à partir de là que les modèles d'hydro-morphodynamiques du littoral par principe de minimisation sont nait.

3.1 Modèles hydro-morphodynamiques 2D basés sur les équations de Saint-Venant

Les tout premiers travaux sur cette nouvelle manière de modéliser la morphodynamique ont été effectués avec un modèle hydrodynamique très classique dans la modélisation hydrodynamique, à savoir le modèle Saint-Venant, ici en 2D [MOHAMMADI et BOUCHETTE, 2014; MOHAMMADI et BOUHARGUANE, 2011].

Ces deux publications se concentraient principalement sur les développements théoriques de la méthode de modélisation morphodynamique par transport optimal.

Ces travaux ont l'avantage de résoudre directement une hydro-morphodynamique en 2D. Cependant, il s'avère que les méthodes numériques utilisées pour ce modèle sont très lourdes. La méthode de résolution des équations de Saint-Venant est fait en volumes finis, la méthode level-set est utilisée pour situer la structure figure C.8. Pour différencier, une différenciation automatique est utilisée car ce modèle hydrodynamique est trop complexe pour être dérivé de manière analytique.

Une fois ces formalismes établis, des fonctionnelles ont été essayés pour rendre compte d'une physique réaliste. La fonctionnelle ci-dessous de l'équation (C.5) vise à minimiser l'agitation et les déplacements sableux.

$$J(\psi) = \int_{t-T}^t \int_{\Omega} (\|\nabla_{xy} u\| + \rho_s g (\psi(\tau) - \psi(t - T))^2) d\tau d\Omega \quad (C.5)$$

avec u la vitesse, ψ la bathymétrie. Les résultats morphodynamiques obtenus avec cette fonctionnelle sont présentés sur la figure C.8. Ils représentent l'évolution morphodynamique en prenant une bathymétrie initiale linéaire et un cylindre rigide.

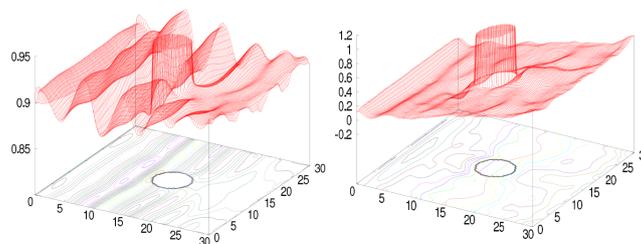


FIGURE C.8 : Agitation à gauche et bathymétrie finale à droite (bathymétrie initiale : linéaire)

La morphodynamique semble être réagit de manière très réaliste compte tenu de la simulation.

Ces articles concluent qu'utiliser cette méthodes pour des problèmes morphodynamiques pourrait

revenir à effectuer une démarche locale analogue aux autres modèles classiques de type Exner. Il a donc été nécessaire d'aller vers un modèle plus simple avec des critères physiques plus robustes. Il convient donc de partir sur un modèle 1D à savoir Opti-morph.

3.2 Modèles hydro-morphodynamique 1D basés sur la minimisation d'énergie

Le nouveau modèle élaboré par COOK. M & AL [COOK et al., 2021a] est basé sur le principe que la nature cherche à minimiser l'énergie qu'elle dépense. Cette fois-ci, la fonction de coût \mathcal{J} qui régit l'évolution du fond marin a été élaborée selon l'énergie \mathcal{E}_H des vagues.

Modèle hydrodynamique

L'évolution en temps du profil bathymétrique est basée sur l'hypothèse que le fond évolue afin de minimiser une certaine quantité hydrodynamique. Ainsi, un modèle hydrodynamique fournissant une description de l'état des vagues de surface est indispensable. Le modèle présenté ci-dessous détermine la hauteur significative des vagues, noté H le long du profil cross-shore. Soit $\Omega = [0, x_{\max}]$ le domaine du profil cross-shore, où $x = 0$ est un point arbitraire en eaux profondes, et x_{\max} est un point arbitraire au-delà du trait de côte. Le domaine Ω est divisé en deux sous-ensembles disjoints : la zone de shoaling Ω_S et la zone de déferlement Ω_B . La hauteur des vagues H sur Ω_S est basée sur l'équation de shoaling (C.6), où H_0 est la hauteur des vagues en eau profonde et K_S est un coefficient de shoaling.

$$H(x, t) = H_0(t)K_S(x, t) \quad (\text{C.6})$$

Pour le déferlement dans la zone de Ω_B , le modèle se base essentiellement sur le critère de Munk (C.7).

$$H(x, t) = \gamma h(x, t) \quad (\text{C.7})$$

Ce modèle est très simple et sa justification réside dans la facilité à différencier analytiquement les termes nécessaires pour la fonctionnelle. Il a tout de même été amélioré par COOK. M & AL COOK et al., 2021a en introduisant du multi-déferlement, de la mémoire de vagues, etc ...

Modèle basé sur l'optimisation de l'énergie des vagues

Pour le modèle morphodynamique, il est supposé que le fond varie au cours du temps afin de minimiser une fonction de coût \mathcal{J} . Cette fonction de coût est définie comme l'énergie potentielle des vagues en zone de shoaling, définie pour tout $t \in [0, T]$ par l'équation (C.8) suivante :

$$J(\psi, t) = \frac{1}{16} \int_{\Omega_S} \rho_w g H^2(\psi, x, t) dx \quad [J.m^{-1}] \quad (\text{C.8})$$

où H désigne la hauteur des vagues calculée par le modèle hydrodynamique susmentionné, ρ_w est la densité de l'eau ($kg.m^{-3}$), et g désigne l'accélération gravitationnelle ($m.s^{-2}$). Dans le but de décrire l'évolution du profil bathymétrique ψ , dont l'état initial est donné par ψ_0 , la dynamique de ψ minimisant \mathcal{J} est régit par le système de descente de gradient suivant :

$$\begin{cases} \psi(t=0) = \psi_0 \\ \psi_t = -\Upsilon \Lambda d \end{cases} \quad (\text{C.9})$$

où ψ_t est l'évolution en temps du fond sableux ($m \cdot s^{-1}$), Υ est la mobilité sédimentaire ($m.s.kg^{-1}$), Λ est l'excitation du fond

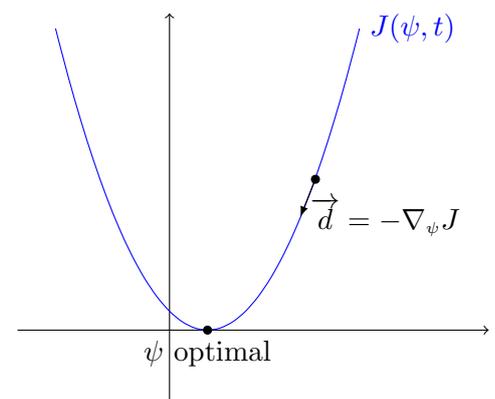


FIGURE C.9 : Descente du gradient

sableux par les vagues, et d est la direction de descente indiquant la manière dont le fond sableux varie. Dans des configurations sans contrainte, il y aurait $d = -\nabla_{\psi} \mathcal{J}$, qui par sa définition, indique la direction d'un minimum local de \mathcal{J} par rapport à ψ comme illustré ci-contre figure C.9.

Néanmoins, des contraintes sont ajoutées au modèle pour incorporer plus de physique et fournir des résultats plus réalistes. Les forces motrices de l'évolution morphologique du profil bathymétrique sont décrites par la minimisation de la fonction de coût \mathcal{J} alors que les processus secondaires sont exprimés par des contraintes. Deux contraintes physiques ont été adoptées par la suite : (i) une contrainte de pente sableuse, qui empêche le sable de présenter des pentes irréalistes et (ii) la contrainte de stock sableux, obligeant la quantité de sable dans un bassin expérimental à rester constante au cours du temps. Cette dernière est nécessaire pour vérifier et valider le modèle numérique dans des simulations de canal à houle.

La première contrainte se traduit par :

$$\left| \frac{\partial \psi}{\partial x} \right| \leq M_{\text{slope}} \quad (\text{C.10})$$

où le paramètre M_{slope} représente l'angle de talus critique du sable, tandis que la deuxième s'écrit :

$$\int_{\Omega} \psi(t, x) dx = \int_{\Omega} \psi_0(x) dx \quad (\text{C.11})$$

pour garantir que le stock sableux reste constant au cours du temps.

Applications avec Optimorph

Actuellement, deux principales applications ont été publiées sur ce code 1D Optimorph. La première est un cas-test en bassin à houle qui compare les résultats avec les résultats de codes de calculs comme XBeach. La seconde effectue des simulations afin de trouver la position optimale d'un géotube.

Cas-test en canal à houle : Copter Ce premier cas-test COOK et al., 2021b compare deux simulations en canal de XBeach et Optimorph avec des données expérimentales de la configuration suivante figure C.10.

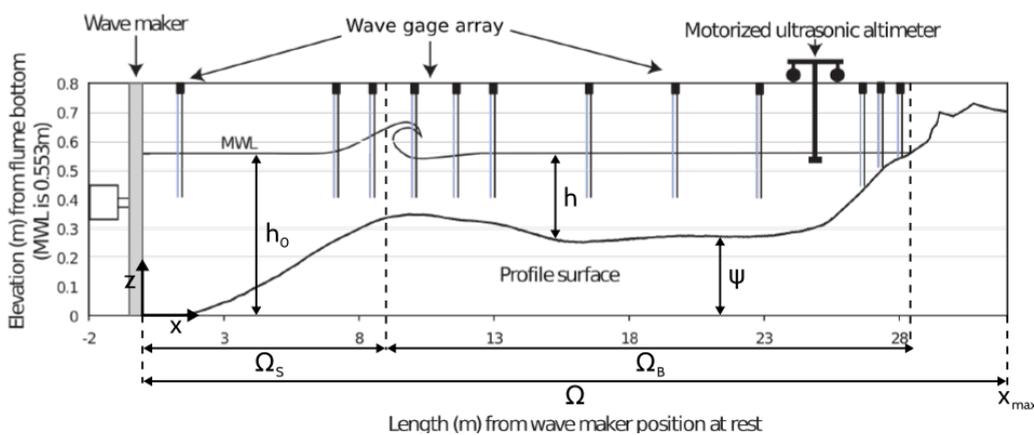


FIGURE C.10 : Diagramme d'un profil cross-shore dans le cas d'un canal expérimental.

C'est une configuration très classique avec un batteur à houle qui reproduit une tempête de paramètres, la période de houle $T = 2.5 \text{ s}$ et la hauteur de vague significative $H = 135 \text{ mm}$ sur un temps total de 30 minutes. L'échelle de temps et de longueur de cette simulation est respectivement de 1/3 et 1/10. Les résultats comparant les simulations et les données expérimentales sont exposés ci-dessous figure C.11.

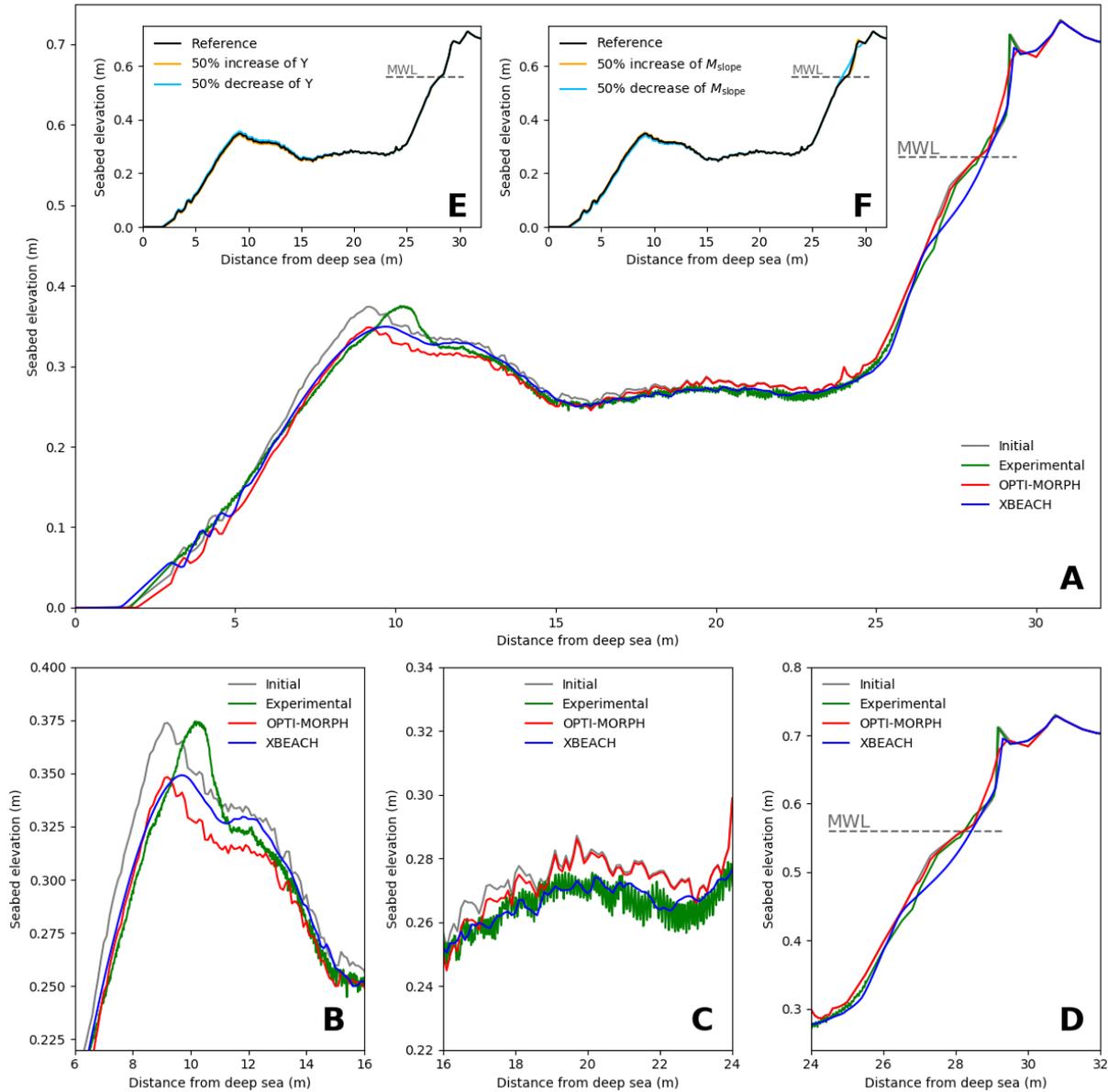


FIGURE C.11 : **A.** Résultats de la simulation numérique calculée sur le fond marin initial (gris) en utilisant le module morphodynamique XBeach (bleu) et le modèle Opti-Morph (rouge). Ils sont comparés aux données expérimentales acquises lors du projet COPTER (vert). Le niveau moyen de l'eau est noté MWL et est fixé à 0.56m. **B.** Vue zoomée du banc de sable, situé à l'intérieur de la plage. En vue du banc de sable, situé entre 6m et 16m. **C.** Vue zoomée du plateau, situé entre 16m et 24m. **D.** Vue zoomée sur le littoral, situé entre 24m et 32m. **E.** Analyse de robustesse du paramètre de mobilité. Le profil de référence de référence est représenté en noir. Le profil orange (resp. bleu clair) est le résultat d'une augmentation (resp. diminution) de 50% du paramètre de mobilité, tous les autres paramètres restant inchangés. **F.** Analyse de robustesse du paramètre de pente maximale du sable M_{slope} . Le profil de référence est représenté en noir. Le profil orange (resp. bleu clair) est le résultat d'une augmentation (resp. diminution) de 50% de M_{slope} . (resp. diminution) de M_{slope} , avec tous les autres paramètres restant les mêmes.

Les résultats de ces simulations ce sont révélés très bons comparé aux autres modèles numériques. Le principal défaut était en amont de la simulation : une des amélioration pourrait être d'ajouter un courant. Un second défaut était proche à la côte le montre la figure **D**.

Bien que cette simulation ne soit pas parfaitement corrélée avec les données expérimentales, le modèle s'est avéré très robuste et beaucoup plus rapide que les modèles classiques.

Des simulations longs-termes ont été effectués sur des durées de 2 à 6 jours et les résultats ont montrés que pour une journée de forçage, il était nécessaire d'effectuer 90 minutes de simulation sur un ordinateur classique. C'est 2 à 3 fois moins que les modèles à résolution classique de type XBeach.

Position optimale de géotube La seconde application [COOK et al., s. d.] compare plusieurs configurations de géotubes sur une plage linéaire afin de trouver la configuration idéale qui limitera les déplacements sableux. La simulation vise à recréer les conditions réelles d'une tempête de 20 jours avec une hauteur de vague significative $H = 2 \text{ m}$ et de période courte $T_0 = 2 \text{ s}$. La configuration de la simulation est la suivante figure C.12 :

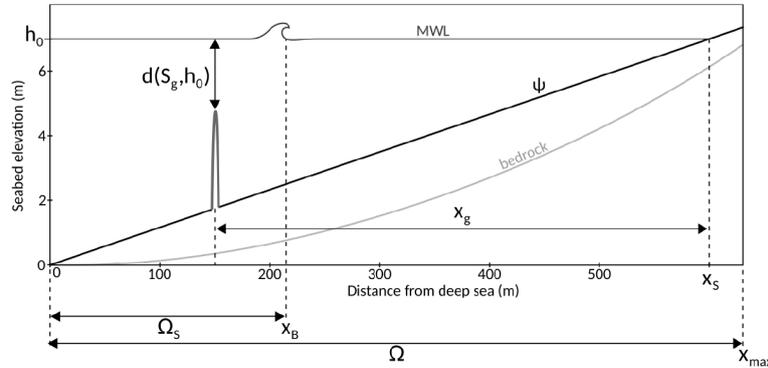


FIGURE C.12 : Configuration de la simulation des géotubes.

Plusieurs types de fonctions coût \mathcal{J} ont ensuite été évaluées pour limiter au mieux certains paramètres comme l'érosion de la plage. Par exemple, les résultats présents figure C.13 ci-dessous :

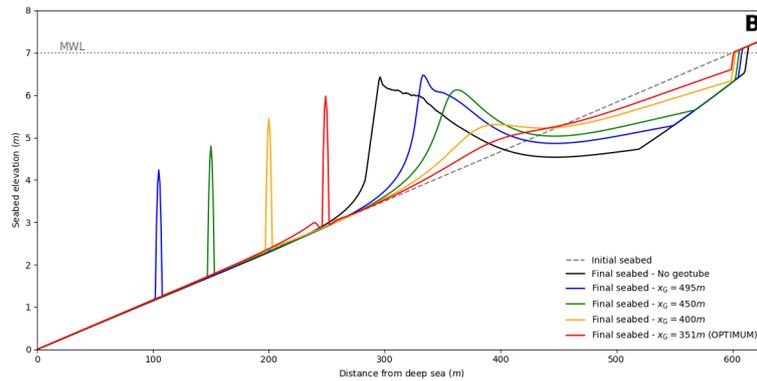


FIGURE C.13 : Profils finaux du fond marin produits par le modèle morphodynamique Opti-Morph avec des positions variables de géotubes sur le profil cross-shore.

nous montrent que la position optimale d'un géotube est à 351 m de la côte pour limiter l'érosion de la plage. D'autres choix stratégiques de fonctions coût \mathcal{J} ont été faits dans l'article COOK et al., s. d. L'avantage de ce code est qu'il laisse la liberté à l'utilisateur de paramétrer ses propres fonctions de coût \mathcal{J} , ce qui lui permet d'obtenir des configurations optimales selon ses critères précis d'ordre pratique ou même économique.