
INTRODUCTION

ACTUELLEMENT, environ 30% de la population mondiale vit proche des côtes ([Small et al. 2003](#)). Ces zones constituent des écosystèmes complexes, d'une richesse environnementale inestimable. Au regard de la croissance démographique, des activités économiques grandissantes, des nouvelles infrastructures, du changement climatique; il n'a jamais été aussi important de comprendre et d'anticiper les phénomènes du littoral. Face à cet enjeu, la modélisation joue aujourd'hui un rôle majeur afin de préserver ces zones côtières. Conjointement, les mathématiques et la physique permettent la compréhension des mécanismes du littoral ainsi que l'anticipation de leur impact sur les côtes. Les mathématiques apportent des outils puissants permettant de résoudre numériquement les problèmes physiques, tandis que la physique et l'hydrodynamique régissent les lois et apportent une expertise pour évaluer la vulnérabilité des côtes aux inondations et à l'érosion.

Ainsi, le développement de modèles numériques est un domaine de recherche en perpétuelle évolution. Ces modèles, ayant souvent l'ambition de prévoir au mieux les répercussions côtières, fournissent des outils de prédiction et d'analyse, contribuant de manière significative à une gestion efficace des zones côtières. Ceux-ci permettent de prendre des décisions rationnelles afin d'atténuer les risques liés au changement climatique, de protéger les populations et écosystèmes ainsi que favoriser un développement durable des régions côtières.

1 Contexte de la Thèse

Cette thèse s'intègre à la suite de nombreux travaux issus du laboratoire de Geo-Sciences et l'institut Montpelliérain Alexander Grothendieck de Montpellier. FRÉDÉRIC BOUCHETTE, BIJAN MOHAMMADI et PASCAL AZERAD ont été à la tête de ces travaux. Ils ont commencé en 2004 en partenariat avec l'entreprise BRLi en travaillant sur la formulation d'une théorie de l'optimisation adaptée au domaine de l'hydromorphodynamisme littoral, des développements numériques basés sur cette théorie et conçus pour inven-

ter des systèmes optimaux de protection du littoral contre la submersion, l'érosion littorale, l'impact des vagues contre les ouvrages, etc. Ces travaux ont vécu à travers 4 thèses: DAMIEN ISÈBE, AFAF BOUHARGUANE, MEGAN COOK et RONAN DUPONT. Ils s'achèveront donc avec cette thèse. Initialement, les travaux se concentraient sur l'optimisation de structures de protections du littoral puis finalement le développement de méthodes de minimisations appliquées à la morphodynamique du littoral. L'historique de ces travaux a été retracé dans l'état de l'art 0. Cette thèse vient à la suite de celle de Cook (2021). Le financement de cette thèse provient du CNRS, dans le cadre des Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI - www.miti.cnrs.fr). Cette thèse n'a pas l'obligation de traiter des problèmes d'ingénierie, elle a la possibilité d'être un projet exploratoire purement académique. Initialement, les travaux ont été découpés en 3 axes comme explicités ci-dessous.

1.1 Axe 1: Développements Théoriques

Le premier axe consiste à reformuler les principes physiques de l'hydro-morphodynamisme du littoral sous la forme d'un problème optimal général. Cette nouvelle approche s'appuiera sur un nombre très réduit de paramètres, refondant complètement la manière de penser le transport sédimentaire. Les paramètres ne devront plus référer aux paramètres du transport sédimentaire classique comme le nombre de Shield (Nielsen 2002). Le modèle ne devra pas s'appuyer sur la paramétrisation des équations de transports issues des approches Bagnold (1966). L'ambition des développements mathématiques est d'étendre le formalisme afin qu'il soit générique: il devra être utilisé très facilement avec n'importe quel modèle hydrodynamique.

1.2 Axe 2: Développement de l'Outil de Calcul Numérique

Le second axe consiste à développer un outil de calcul numérique implémentant cette nouvelle approche théorique, dans un contexte bien circonscrit, limité, compatible avec la durée du projet et un travail de doctorat. Les développements théoriques de l'axe 1 devront être implémentés dans un code unique. Le modèle morphodynamique doit être capable de se coupler avec différents types de modèles hydrodynamiques.

1.3 Axe 3: Validations du Modèle

Le troisième axe consistera à valider les développements théoriques de cet outil de modélisation. L'outil sera confronté à la réalité de terrain, dans une démarche typiquement physique. Sur ce point, le projet bénéficie dès son démarrage de la base de données issue de nombreuses expérimentations en milieu contrôlé ou in situ déjà réalisées et validées par

le partenaire GLADYS (www.gladys-littoral.org). En effet, l'institut des plages GLADYS a la vocation régionale/nationale de capitaliser et partager des campagnes de mesure littorale à haute valeur académique (donnée très bien contrainte et validée).

2 Objectifs de la Thèse

Les travaux de [Cook \(2021\)](#) ont donné naissance à une première version du modèle OptiMorph utilisant le principe de minimisation appliqué à la modélisation morphodynamique du littoral. Il convient de poursuivre les développements afin d'étendre les validations numériques / expérimentales. Il est très important que les développements mathématiques et expérimentaux soient mis en avant à travers des publications scientifiques. En effet, cette nouvelle méthode de modélisation décrite comme "originale", soulève souvent quelques réticences dans la communauté du littoral. Il est donc très important d'apporter un maximum d'éléments justifiant nos hypothèses ainsi que la pertinence de notre modèle. Un grand travail de médiation est à prévoir à travers des communications, publications, enseignement, etc.

3 Modélisation du Littoral

3.1 Modélisation Morphodynamique des Plages

Durant cette thèse, nous nous sommes principalement concentrés sur la modélisation morphodynamique des plages. Elle caractérise l'évolution de la morphologie d'une plage, à savoir l'évolution de son fond marin. Il existe de nombreuses méthodes permettant de calculer la morphodynamique. Ces modèles englobent les modèles empiriques ainsi que les modèles basés sur le processus. Ces derniers peuvent être classés en plusieurs catégories, tel que i) les modèles d'évolution des profils ([Larson et al. 1989](#); [Larson et al. 1990](#); [Nairn et al. 1993](#)), qui utilisent uniquement le transport transversal, ii) les modèles basés sur des règles ([Storms et al. 2002](#); [McCarroll et al. 2021](#)), fondés sur un certain nombre de règles telles que la règle de [Bruun \(1954\)](#), iii) les modèles morphologiques 2D ([Fleming et al. 1977](#); [Latteux 1980](#); [Coeffe et al. 1982](#); [Yamaguchi et al. 1985](#); [Watanabe et al. 1986](#); [Maruyama et al. 1988](#); [Wang et al. 1993](#); [Johnson et al. 1995](#); [Nicholson et al. 1997](#); [D. J. Roelvink et al. 2009](#)), 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 iv) les modèles 3D et quasi-3D ([J. A. Roelvink et al. 1994](#); [Lesser et al. 2004](#); [D. J. Roelvink et al. 1995](#); [Briand et al. 1993](#); [Zyserman et al. 2002](#); [Ding et al. 2006](#); [Droenen et al. 2007](#)), qui

déterminent l'évolution des sédiments en utilisant les variations horizontales et verticales des paramètres dérivés des vagues.

Le modèle OptiMorph (Cook 2021; Ronan Dupont et al. 2022; Ronan Dupont et al. 2023; R. Dupont et al. 2024) est basé sur le contrôle optimal. Cette méthode d'optimisation appliquée au littoral est née après de nombreux travaux sur le littoral. Les premières idées de F. BOUCHETTE, B. MOHAMMMADI & AL étaient de travailler directement sur l'optimisation de structures de protection du littoral (Isèbe et al. 2008b). Ensuite, des travaux se sont concentrés sur la position optimale de structures de protection du littoral comme les Géotubes (Isèbe et al. 2008b; Cook et al. 2021b).

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 la suivante: *“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 appelait directement d'autres questions physiquement plus compliquées. 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. Des explications sur cette hypothèse sont apportées dans la section suivante 3.2. C'est sur cette citation que les développements de Cook (2021) ont été effectués pour donner naissance à Optimorph. Un code de calcul morphodynamique 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 2021). La suite de ces travaux de développement et validation sont présentés dans cette thèse.

3.2 Hypothèse: la Nature Cherche à Minimiser l'Énergie qu'elle Dépense

La vérification de l'hypothèse que la nature cherche à minimiser l'énergie qu'elle dépense peut se faire sur des cas très simples. Par exemple, il est possible d'observer l'évolution de l'énergie des vagues $\mathcal{E}_H = \frac{1}{16}\rho_w g \int_{\Omega} H^2 d\Omega$ sur différents types de fonds marins: des fonds expérimentaux, des fonds provenant de mesures en pleine mer, d'autres s'inspirant de profils de plages à l'équilibre (Bruun 1954), ... Le but de ces observations vise à montrer que l'énergie des vagues est de plus en plus faible au fil du temps.

Il est très difficile d'obtenir des mesures morphodynamiques et hydrodynamiques complètes. La plupart du temps, les jeux de données morphodynamiques sont complets, mais l'hydrodynamique ne contient que quelques points de mesure: c'est le cas de l'expérience

en canal LIP 1C (Roelvink et al. 1995). Pour ce cas-là, il convient donc de simuler la propagation de vagues avec des modèles comme XBeach (utilisé uniquement en modèle de vagues) (D. J. Roelvink et al. 2010; Daly 2009; Bugajny et al. 2013; Williams et al. 2015) afin de compléter artificiellement la donnée. Avec l'avancée des technologies, la technologie LIDAR permet d'obtenir des jeux de données complets: sur un tronçon entier. C'est le cas de l'expérience DynaRev (Blenkinsopp et al. 2021; Schimmels et al. 2020; Martins et al. 2020).

Nous commençons donc par utiliser les données expérimentales très reconnues LIP11D - 1C (Roelvink et al. 1995) où on observe une barre sédimentaire se déplacer au fil de l'expérience. Ces données ont été cruciales dans la validation du modèle hydro-morphodynamique XBeach. Les conditions de cette expérience sont les suivantes: une période de vague $T_0 = 5$ s, un forçage de vague de $H_s = 1.4$ m et une durée totale de $T_f = 13$ h. Deux simulations hydrodynamiques seront effectuées, une sur la bathymétrie initiale ψ_0 (correspondant à $t = 0$ h) et une sur la bathymétrie finale ψ_f (correspondant à $t = 12$ h). Les résultats de ces simulations ainsi que les calculs de \mathcal{E}_H sont présentés sur la figure I.1.1.

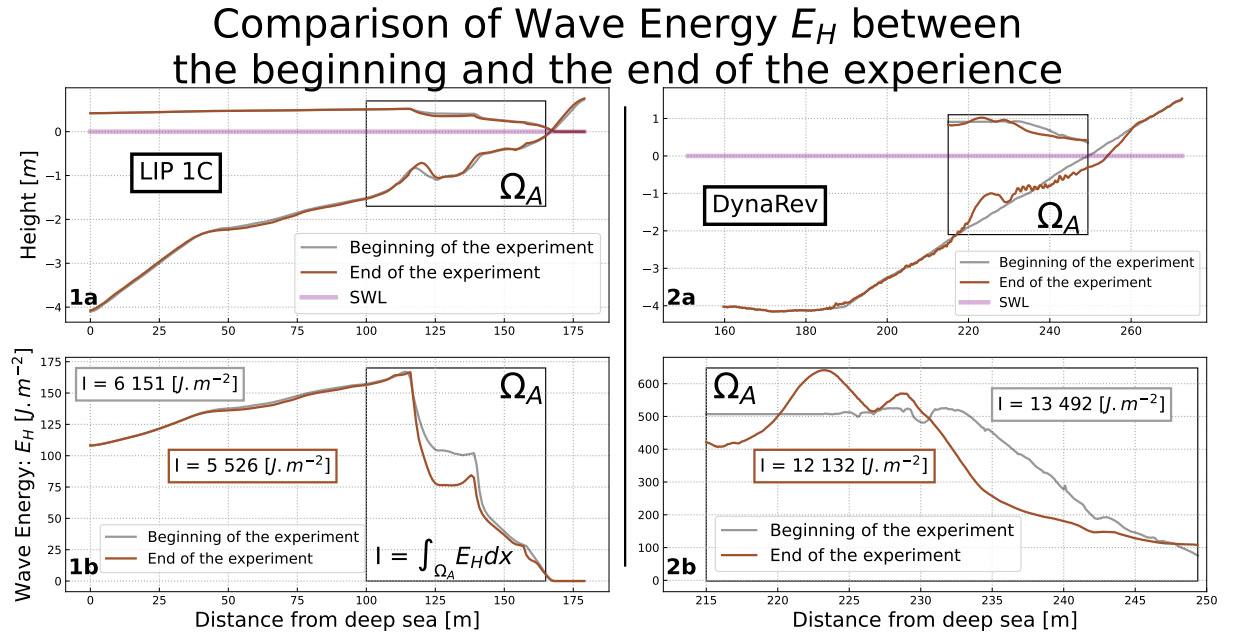


Figure I.1 – 1) Expérience LIP 1C avec H généré par XBeach. 2) Expérience DynaRev avec H mesuré par LIDAR. a) Fond marin et Hauteur d'eau moyennée au début de l'expérience (gris), Fond marin et Hauteur d'eau moyennée à la fin de l'expérience (marron). b) Énergies des vagues associées aux hauteurs d'eaux. L'énergie est calculée sur le rectangle gris.

Ici, d'après la figure I.1.1b, il est évident que l'énergie des vagues à la fin de la simulation $\mathcal{E}_H(t = 12\text{ h})$ est plus faible que l'énergie au début $\mathcal{E}_H(t = 0\text{ h})$. Sur le domaine sélectionné Ω_A (figure I.1.1), celle-ci est 10% plus faible que l'énergie initiale (ie, $\mathcal{E}_H(t = 12\text{ h}) = 0.90 \mathcal{E}_H(t = 0\text{ h})$). L'hypothèse semble valable pour cette expérimenta-

tion.

Une autre vérification possible est d'utiliser les données LIDAR DynaRev (Blenkinsopp et al. 2021; Schimmels et al. 2020; Martins et al. 2020). Dans cette expérience, le bathymétrie est initialement linéaire puis une barre se crée au fil du temps (en 20h d'expérimentation). Cette expérience est très réaliste, car les barres sédimentaires sont très souvent observées dans la nature (Wright et al. 1984). Nous prendrons donc la bathymétrie initiale de l'expérience ψ_0 ($t = 0$ h) et la bathymétrie finale ψ_f ($t = 20$ h) ainsi que les hydrodynamiques associées (Martins et al. 2020). Toutes les données sont expérimentales. Celles-ci sont présentées sur la figure I.1.2.

De même, d'après la figure I.1.2b, il est évident que l'énergie des vagues à la fin de l'expérience $\mathcal{E}_{\mathcal{H}}(t = 20 \text{ h})$ est plus faible que l'énergie au début $\mathcal{E}_{\mathcal{H}}(t = 0 \text{ h})$. Sur le domaine sélectionné Ω_A (figure I.1.1), celle-ci est 10% plus faible que l'énergie initiale (ie, $\mathcal{E}_{\mathcal{H}}(t = 12 \text{ h}) = 0.90 \mathcal{E}_{\mathcal{H}}(t = 0)$). L'hypothèse semble valable pour cette expérimentation également.

3.3 Comment Traiter le Problème de Minimisation ?

Une fois l'hypothèse de la nature qui semble minimiser l'énergie qu'elle dépense vérifiée, il convient de traduire cela par le problème d'optimisation suivant. Il faut chercher ψ , le fond marin de telle sorte que la fonctionnelle $\mathcal{J} = \mathcal{E}_{\mathcal{H}}$ soit la plus faible possible. Ceci ce traduit mathématiquement par l'équation (I.1) suivante.

$$\min_{\psi} \mathcal{J} \quad \text{avec} \quad \mathcal{J} = \frac{1}{16} \rho_w g \int_{\Omega} H^2 d\Omega. \quad (\text{I.1})$$

En l'état, une solution de (I.1) serait d'avoir un mur à l'entrée du domaine, qui empêcherait toute propagation de vague possible (sans eau, la fonction de coût \mathcal{J} est nulle). Certaines contraintes physiques doivent donc être ajoutées. Une pente maximale de notre plage afin de ne pas avoir de pentes aberrantes; une contrainte de conservation sableuse qui pourra être activé dans un domaine fermé ainsi qu'une contrainte d'excitation sableuse qui augmentera ou limitera la mobilité du sable en fonction de la profondeur de celui-ci ainsi que les conditions de houle (par exemple, il est impossible d'avoir un mouvement sédimentaire à 1000 m de profondeur dû aux vagues à la surface). Les définitions de ces contraintes physiques seront revues dans le chapitre 1.

Dans la littérature, il existe une multitude de méthodes d'optimisation (Mohammadi et al. 2009; D. J. Munk et al. 2015) pour traiter le problème de minimisation (I.1). Il existe deux grandes familles de méthodes: celles déterministes, basées sur le gradient (descente du gradient, newton, ...) et celles stochastiques (algorithmes évolutionnistes, ...).

Naïvement, un choix pourrait être de résoudre le problème (I.1) par une méthode

stochastique basée sur l'évolution des populations. Ici, la population $\psi_{i=0,\dots,N_{pop}}$ est une population de fonds marins satisfaisant les contraintes de pente et de conservation sableuse, afin d'obtenir le résultat le plus réaliste possible. La méthode choisie fait partie des plus renommées: l'utilisation d'un algorithme génétique basé sur des duels ([Biyanto et al. 2016](#)). À chaque génération, un duel a lieu entre deux individus de la population, le perdant, ayant la fonction de coût \mathcal{J} la plus forte, subira une mutation. Cette méthode d'optimisation est illustrée sur le workflow figure [I.2](#). Plus d'explications sur les étapes sont données dans l'annexe [A](#).

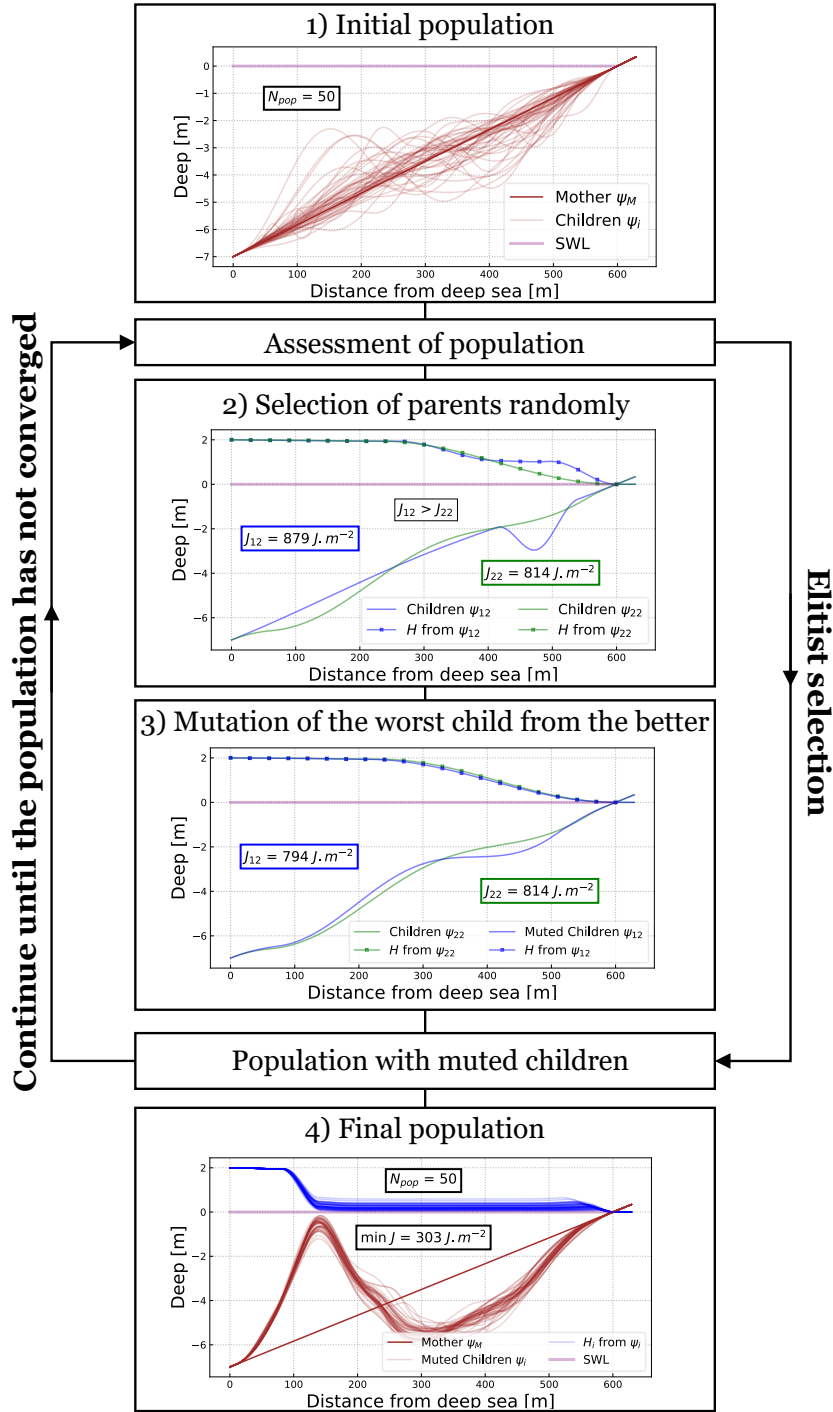


Figure I.2 – Workflow d'un algorithme génétique basé sur les duels pour résoudre le problème de minimisation (I.1). Plus d'explications dans l'annexe A.

Les résultats de l'optimisation figure I.2.4 montrent que le problème (I.1) a bien été résolu en satisfaisant les contraintes de pente et de conservation sableuse. En effet, le fond

marin va chercher à se rapprocher le plus vite possible de la surface tout en satisfaisant la contrainte de pente ainsi que le point fixe au bord du domaine ($x = 0$ m). On peut de plus observer dans l'annexe la figure A.2 montrant que la fonction de coût \mathcal{J} baisse de générations en générations. Cette résolution du problème de minimisation (I.1), bien qu'elle soit réussite, ne satisfait pas nos exigences de modélisation morphodynamique. En effet, le profil proposé I.2.4 n'est pas très réaliste bien qu'il puisse nous faire penser à un banc de sable. De plus, le problème (I.1) sans contrainte pourrait se résoudre en proposant la solution d'un fond marin supérieure au niveau de l'eau dès $x = 0$. Ceci empêcherait toute vague de se former et l'énergie des vagues serait donc nulle ($\mathcal{J} = 0$).

Il est donc nécessaire de préciser que nous ne cherchons pas la solution absolue du problème de minimisation (I.1). En effet, nous voulons un modèle morphodynamique qui puisse décrire l'évolution du fond marin en fonction du temps. Il convient donc de privilégier les méthodes d'optimisation basées sur le calcul du gradient (Mohammadi et al. 2009) qui vont nous permettre de successivement déterminer l'évolution du fond marin. Le problème d'optimisation (I.1) est donc à considérer au sens du transport optimal. À chaque itération, le fond marin se dirigera vers la solution optimale de ce problème. En faisant tendre le nombre d'itérations à l'infini, la solution trouvée serait celle proposée en figure I.2.4). L'avantage de méthode est qu'elle permet l'introduction du temps, et donc, la variation des forçages à chaque instant: ce qui nous rapproche d'un modèle réaliste.

4 Organisation de la Thèse

Le manuscrit commence par un état de l'art 0 qui retrace les travaux initiés en 2007 par F. BOUCHETTE et B. MOHAMMADI. La description des travaux commence par des problématiques d'optimisation de formes ou de position de structures de défense côtière. La finalité des travaux concerne la modélisation morphodynamique par optimisation. C'est sur la suite de ces travaux que la thèse commence.

Le chapitre 1 va se concentrer sur la nouvelle approche pour décrire la morphodynamique côtière, basée sur la théorie de l'optimisation, et plus spécifiquement sur l'hypothèse qu'un profil de plage sableuse évolue afin de minimiser une fonctionnelle liée aux vagues, dont le choix dépend de ce qui est considéré comme la force motrice derrière les processus morphodynamiques côtiers considérés. Une validation numérique et expérimentale sera présentée ainsi qu'une extension du modèle en dimension supérieure.

Le chapitre 2 commencera par les équations fondatrices des mouvements fluides pour découler à la théorie linéaire ainsi qu'aux deux grandes familles de modèles hydrodynamiques: les modèles à phase résolue et les modèles spectraux. Ceci permet d'introduire les modèles hydrodynamiques utilisés dans OptiMorph dans le chapitre 3. Certains sont à résolution spectrale comme XBeach ou SWAN, mais aussi à phase résolue comme le

modèle Shallow-Water ou REF/DIF. Nous présenterons également un modèle hydrodynamique à faible complexité. Ces modèles sont comparés sur le cas expérimental LIP 1C.

Dans le chapitre 3, nous présenterons la stratégie d'Hadamard pour rendre notre modèle générique. Grâce à ces avancées, le modèle morphodynamique pourra être couplé à n'importe quel modèle de vagues. Nous utiliserons les modèles de vagues de SWAN, XBeach et Shallow-Water dans notre modèle, et nous comparerons les résultats morphodynamiques aux benchmarks hydro-morphodynamique LIP 1C et SANDS ainsi qu'à des simulations en pleine mer.

Dans le chapitre 4, nous étendons l'approche du chapitre 3 à la dimension 2D. Nous effectuerons les développements mathématiques du formalisme en 2D et regarderons la validité de ce formalisme. Nous utiliserons notre modèle morphodynamique couplé avec les modèles REF/DIF et Shoaling en multi-1D. Nous effectuerons une validation morphodynamique sur l'expérience Copter en 2D.

Le chapitre 5 est un guide explicatif de la deuxième version du modèle numérique OptiMorph. La nouvelle version du modèle OptiMorph basé sur l'hydro-morphodynamique côtière par principe de minimisation sera présentée. Des exemples et explications seront apportés afin d'utiliser ce modèle et de le coupler avec n'importe quels modèles de vagues (on pourra facilement prendre XBeach et SWAN).