



Modélisation et optimisation de structures flottantes pour l'aide à la décision d'aménagement portuaire

Hassan Diab

► To cite this version:

Hassan Diab. Modélisation et optimisation de structures flottantes pour l'aide à la décision d'aménagement portuaire. Construction hydraulique. Université de Technologie de Troyes; Université Libanaise, 2016. Français. NNT: 2016TROY0022 . tel-03361919

HAL Id: tel-03361919

<https://theses.hal.science/tel-03361919>

Submitted on 1 Oct 2021

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

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

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Hassan DIAB

Modélisation et optimisation de structures flottantes pour l'aide à la décision d'aménagement portuaire

Spécialité :

Matériaux, Mécanique, Optique et Nanotechnologie

2016TROY0022

Année 2016

Thèse en cotutelle avec l'Université Libanaise – Beyrouth - Liban



THESE

pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR de l'UNIVERSITE
DE TECHNOLOGIE DE TROYES
Spécialité : MATERIAUX, MECANIQUE, OPTIQUE
ET NANOTECHNOLOGIE**

présentée et soutenue par

Hassan DIAB

le 12 juillet 2016

**Modélisation et optimisation de structures flottantes
pour l'aide à la décision d'aménagement portuaire**

JURY

M. A. OUAHSINE	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. F. GEARA	PROFESSEUR	Rapporteur
M. F. HAJ CHEHADE	PROFESSEUR	Examineur
M. P. LAFON	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Directeur de thèse
M. P. SERGENT	DIRECTEUR SCIENTIFIQUE CEREMA - HDR	Rapporteur
M. R. YOUNES	PROFESSEUR	Directeur de thèse

Personnalité invitée

M. G. EL CHAHAL	DOCTEUR
-----------------	---------

Remerciements

On ne peut jamais remercier suffisamment les dons que l'on reçoit continuellement dès que nous avons entendu les premiers battements de nos cœurs. Par contre, cette reconnaissance vers leur source unique ne m'empêche pas d'essayer au moins de remercier les personnes et les organisations que leur présence dans ma vie fait ou faisait partie de ces dons dans la période de la préparation de ma thèse.

J'aimerais commencer par adresser de grand remerciements à mes directeurs de thèse Pr. Rafic YOUNES et Pr. Pascal LAFON pour leur soutien scientifique, administratif et personnel durant ces années. Ils m'ont donné plein d'informations, de méthodologies de travail et de façon de penser. Ils m'ont encouragé toujours pour mieux donner. Ils ont été à mes côtés dans toutes les situations, dans les moments durs comme dans les bons moments. Leur comportement professionnel et humain a transformé cette thèse en une jolie aventure.

Je remercie également l'université libanaise au Liban et la région Champagne-Ardenne en France pour avoir financé le travail de cette thèse. Je remercie, aussi, toutes les personnes libanaises et françaises à l'université libanaise et à l'université de technologie de Troyes qui ont participé à la mise en place de cette cotutelle qui m'a donné la chance avec nombreux collègues doctorants de poursuivre des études de 3^{ème} cycle.

J'aimerais également remercier, Dr. Ghassan Elchahal pour l'accompagnement scientifique qui m'a donné le long du chemin. Merci encore à Mr. Laurant DANIEL, ingénieur de recherche à l'université de technologie de Troyes pour le soutien technique dans utilisation des serveurs de calculs. Une autre personne que je ne peux pas oublier est Mme Pascale DENIS, je sais très bien que j'étais peut être un des cas les plus complexes à gérer administrativement parmi les doctorants de l'UTT jusqu'à maintenant.

De gigantesque remerciement je l'adresse à mon amie Houda, elle sait très bien que sans sa présence à côté de moi et de ma famille, physiquement et moralement, je ne terminerais jamais ce manuscrit à temps. Il me suffit pendant ces trois années d'avoir rattrapé la chance de connaître ta belle vérité.

Il m'est impossible de remercier suffisamment une personne exceptionnelle qui m'a aidé à comprendre la plus grande leçon de ma vie. Nancy, je voulais honnêtement t'avoir comme ma sixième sœur et tu la resteras toujours dans mon cœur. Merci "Dear sister and best friend".

Je remercie spécialement tous mes amis, ma grande famille et surtout les libano-troyennes et les libano-troyens qui ont été à coté de nous.

Je remercie infiniment ma petite (relativement !) famille, mes cinq sœurs et mon frère. Leur croyance en mes capacités, et la joie dans leurs yeux chaque fois qu'ils m'ont parlé de leur "Dr" Frère m'ont encouragé à réussir.

Un merci spécial à mes enfants incroyables. Ils ne peuvent pas le comprendre maintenant, mais un jour ils sauront que si j'ai décidé de réussir, et j'ai fait de mon

mieux pour cela, c'est parce que c'était le chemin obligatoire pour leur assurer un meilleur avenir.

Ma chère épouse, je suis si sûr qu'il n'y a pas encore dans toutes les langues du monde les mots nécessaires pour te dire merci. Tu étais la source d'espoir continue pendant ces onze ans d'amour. Si tu te souviens du silence amusant sur le siège du lycée, tu sais que mon silence est maintenant plein de sentiments d'amour et de reconnaissance. Je t'aime, je te respire.

Mes chères parents, ma mère et mon père, je ne sais pas comment je vous remercie de tout ce que vous avez fait pour moi depuis le début de ma vie. Vos rêves, vos sentiments, votre croyance en moi, les souris sur vos visages, les larmes dans vos yeux et les gouttes de sueur sur vos fronts m'ont accompagné pas à pas tout le long du chemin.

Pour vous, ma mère Zahra, mon père Jihad, mon amour Sania, mes enfants Jihad et Joude, mes sœurs Fayza, Fatima, Batoul, Narjesse et Nour Al-Houda, mon frère Ali, mes amis Sajed, Nancy, Abbass et Houda, pour tous ceux que j'aime et/ou qui m'aiment je dédie ce travail.

Hassan DIAB

À Beyrouth, le 12/12/2016

Résumé

L'objectif de cette thèse était de proposer une contribution dans le domaine de la modélisation du comportement de digues flottantes permettant d'optimiser le positionnement et le dimensionnement de ces structures. La finalité étant de participer à la définition d'outils d'aide à la décision pour l'aménagement portuaire destiné à la protection des installations. Nous avons proposé un nouveau modèle de comportement de digues flottantes. Ce modèle de comportement simple et efficace combine deux modèles. Le premier est un modèle de Berkhoff étendu et amélioré qui prend en compte les effets de frottement au fond, de bathymétrie fortement variable et de déferlement. Il permet d'évaluer dans le plan horizontal du port la propagation de la houle. Le second est un modèle décrivant le comportement hydrodynamique d'une digue flottante dans le plan vertical de sa section transversale. Une étude paramétrique a permis de valider globalement ce nouveau modèle. Nous avons proposé ensuite une démarche d'optimisation spécifique basée sur une formulation multicritère du problème d'optimisation et utilisant des techniques de méta modélisation et un algorithme stochastique pour accélérer les calculs. Le front de Pareto obtenu permet pour un port donné, de déterminer la capacité maximale d'absorption de la houle et les dimensions de la plus petite digue.

Mots-clés : Hydrodynamique, Simulation par ordinateur, Ports – Conception et construction, Algorithmes génétiques et Prise de décision.

The objective of this thesis is to add a contribution in the field of modeling of the behavior of floating breakwaters, in order to optimize the positioning and sizing of these structures. It is aimed to participate in the definition of the decision making techniques in harbor development intended to the protection of installations. A new model for the behavior of floating breakwaters is proposed. This simple and efficient behavior model combines two models : The first is an extended and improved Berkhoff model that takes into account the effects of bed friction, highly variable bathymetry and wave breaking so that the propagation of waves in the horizontal plane of harbor is evaluated. The second model describes the hydrodynamic behavior of a floating breakwater in the vertical plane of its cross section. A parametric study is used to globally validate the new model, after which a specific optimization approach based on a multi criteria formulation of the optimization problem is proposed. Meta-modeling techniques and stochastic algorithm are together employed to speed up the calculations. The obtained Pareto front allows, for a given harbor, to determine the maximum absorption capacity of waves and the dimensions of the smallest breakwater.

Key-words :Hydrodynamics, Computer simulation, Harbors – Design and construction, Genetic algorithms and Decision making.

Table des matières

Liste des tableaux	7
Table des figures	9
Liste des symboles	11
1 Introduction	15
1.1 Structures flottantes	15
1.2 Les brise-lames flottants	21
1.3 Optimisation des ports	24
1.4 Résumé du chapitre	27
2 Aménagement portuaire : besoins et contraintes	29
2.1 Introduction	29
2.2 Contraintes liées à l'environnement	31
2.2.1 La qualité d'eau	32
2.2.2 Le niveau d'eau	32
2.2.3 La vie écologique	32
2.3 Contraintes liées à la mécanique des fluides	33
2.3.1 Vagues	33
2.3.2 L'érosion et l'inondation	36
2.3.3 La Bathymétrie	37
2.3.4 Le tirant de l'eau	37
2.3.5 Le courant	37
2.4 Contraintes liées aux structures	38
2.4.1 Les contraintes économiques	38
2.4.2 Les contraintes mécaniques	39
2.5 Besoins de manœuvrabilité	41
2.5.1 Contraintes d'architecture	41
2.5.2 Contraintes liées aux navires	43
2.6 Conclusion	44
2.7 Résumé du chapitre	44
3 Modélisation hydrodynamique	47
3.1 Introduction	47
3.2 La théorie du potentiel linéaire	49
3.3 Modèle de Berkhoff	50
3.3.1 Prise en compte des vagues aléatoires	52
3.3.2 Introduction des phénomènes de dissipation de l'énergie	53
3.4 Modèle des brise-lames flottants	55

3.5	Modèle 2.5D des brise-lames flottants	62
3.6	Simulation numérique	66
3.6.1	Éléments finis	67
3.6.2	Maillage	67
3.6.3	Conditions Limites	68
3.7	Validation de simulation numérique	71
3.7.1	Modèle de Berkhoff amélioré	72
3.7.2	Modèle dynamique des brise-lames flottants	78
3.8	Étude paramétrique du modèle 2.5D des brise-lames flottants	82
3.9	Résumé du chapitre	86
4	Outils d'aide à la décision	89
4.1	Méthodes d'optimisation : synthèse de l'état de l'art	90
4.1.1	Introduction	90
4.1.2	Formulation du problème d'optimisation et modèle physique	90
4.1.3	Principes fondamentaux des algorithmes d'optimisation	91
4.1.4	Algorithmes déterministes	93
4.1.5	Algorithmes stochastiques	93
4.1.6	Particularités des problèmes multi-objectifs	95
4.1.7	Méta-modèles, plans d'expériences	97
4.1.8	Couplage de méta-modèles et d'algorithmes d'optimisation	99
4.2	L'influence du modèle hydrodynamique sur les résultats de l'optimi- sation	100
4.2.1	Cas du port profond	102
4.2.2	Cas du port peu profond	102
4.2.3	Cas du port en pleine mer	104
4.2.4	Conclusion	105
4.3	L'optimisation des brise-lames flottants	107
4.3.1	Définition du problème d'optimisation	107
4.3.2	Démarche de l'optimisation	112
4.3.3	Optimisation pour le brise-lames fixe dans le plan horizontal	113
4.3.4	Optimisation sur le brise-lames flottant dans le plan vertical	116
4.3.5	Optimisation sur le brise-lames flottant dans le 2.5D	118
4.3.6	Justification de la démarche	120
4.4	Application : Port de Hanstholm au Danemark	121
4.5	Résumé du chapitre	125
5	Conclusions et perspectives	127
5.1	Conclusion	127
5.2	Perspectives	129
	Bibliographie	131

Liste des tableaux

2.1	Les Modèles de propagation des vagues	35
3.1	Les caractéristiques de 5 vagues représentant une houle multifréquences avec $H_s = 1$ m et $T_p = 10$ s	52
3.2	Liste de phénomènes pris en compte dans le modèle 2.5D des brise-lames flottants.	66
3.3	Les coefficients des équations elliptiques	67
3.4	Les paramètres des maillages	68
3.5	Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de diffraction dans Berkhoff	72
3.6	Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de réflexion dans Berkhoff	73
3.7	Les paramètres des maillages pour la validation d'extension de type de bathymétrie dans Berkhoff.	75
3.8	Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de frottement au fond dans Berkhoff.	76
3.9	Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de déferlement dans Berkhoff.	77
3.10	Les paramètres des maillages pour la validation d'incidence aléatoire dans Berkhoff.	78
3.11	Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de diffraction dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.	80
3.12	Les paramètres des maillages pour la validation des phénomènes de radiations dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.	82
3.13	Les paramètres des maillages durant une solution par le modèle 2.5D des brise-lames flottants.	84
4.1	Liste des essais pour tester l'influence du modèle hydrodynamique sur l'optimisation.	101
4.2	Les résultats du cas de port profond.	103
4.3	Les résultats du cas de port peu profond.	104
4.4	Les résultats du cas du port en pleine mer.	105

Table des figures

1.1	Une carte des terres récupérées à Hong Kong à 1998	16
1.2	Images satellite montre la Chine a élargi son remplissage de terre de Subi Reef de 74 % en moins de deux mois.	16
1.3	Applications diverses des structures flottantes.	17
1.4	Les structures flottantes les plus remarquables dans le monde.	18
1.5	Les brise-lames rapides à installer (RIB).	19
1.6	Les digues flottantes	20
1.7	Brise-lames flottants Pontons.	21
1.8	Autres type des brise-lames flottants.	22
1.9	Le coût total en fonction de la hauteur de la vague de conception.	25
1.10	Optimisation de positionnement de brise-lames fixe.	26
1.11	Optimisation de la section transversal du brise-lames flottant	26
2.1	Configuration du port Aberdeen au Royaume-Uni	30
2.2	Caractéristiques des vagues	34
2.3	Les contraintes de conception portuaire	45
3.1	Décomposition d'une houle multifréquences avec $H_s = 1$ m et $T_p = 10$ s	52
3.2	Le taux de déferlement	55
3.3	Bilan des forces agissant sur le brise-lames flottant	58
3.4	Représentation du brise-lames flottant	63
3.5	Les étapes du modèle 2.5D des brise-lames flottants	64
3.6	Les représentations des étape du modèle 2.5D des brise-lames flottants.	65
3.7	Les maillages du domaine	68
3.8	Les différents maillages et leurs résultats	69
3.9	L'influence du type de surface du brise-lames	70
3.10	Les conditions limites pour le modèle de Berkhoff	71
3.11	Validation de phénomène de diffraction dans Berkhoff.	73
3.12	Validation de phénomène de réflexion dans Berkhoff.	74
3.13	Validation d'extension de type de bathymétrie dans Berkhoff.	75
3.14	Validation de phénomène de frottement au fond dans Berkhoff.	76
3.15	Validation de phénomène de déferlement dans Berkhoff.	77
3.16	Validation d'incidence aléatoire dans Berkhoff.	79
3.17	Validation de phénomène de diffraction dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.	81
3.18	Validation des phénomènes de radiations dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.	83
3.19	Les domaines d'étude d'un brise-lames flottant	84
3.20	Les résultats de la simulation par 2.5D	85
3.21	C_t derrière le brise-lames pour $x = 500$ m	86

3.22 Étude paramétrique de la performance d'un brise-lames flottant . . .	86
3.23 L'influence de k_r et L selon la zone à protéger	87
4.1 Front de Pareto : exemple dans le cas de deux fonctions objectifs . .	96
4.2 Front de Pareto : exemple dans le cas de deux fonctions objectifs . .	98
4.3 Le domaine du port profond	102
4.4 Les résultats du cas de port profond.	103
4.5 Le domaine de port peu profond.	104
4.6 Les résultats du cas du port peu profond.	104
4.7 Le terminal en pleine mer - Dier Amar / Liban	105
4.8 Le domaine du port en pleine mer	106
4.9 Les résultats du cas du port en pleine mer.	107
4.10 Le coût des brise-lames proposée par rapport au temps du calcul consommé.	108
4.11 L'algorithme génétique	109
4.12 Définitions du brise-lames flottant.	109
4.13 Encienne définition du brise-lames flottant	110
4.14 Démarche d'optimisations.	113
4.15 Domaine de l'optimisation.	114
4.16 La discrétisation du méta-modèle	115
4.17 Le front de Pareto obtenu de l'optimisation par du méta-modèle . .	115
4.18 Les résultats de l'optimisation des brise-lames fixes dans le plan ho- rizontal.	116
4.19 Les variations des variables par rapport aux points de la solution optimale dans le plan horizontal.	117
4.20 Les résultats de l'optimisation de brise-lames flottant dans le plan vertical.	118
4.21 Les variations des variables par rapport aux points de la solution optimale dans le plan vertical.	119
4.22 Les résultats de l'optimisation de brise-lames flottant par le modèle 2.5D.	120
4.23 La comparaison de la démarche réduite avec la démarche complète de l'optimisation	121
4.24 Le domaine de définition du port de Hanstholm.	122
4.25 Les variations des variables par rapport aux points de la solution optimale le port semi-fermé.	123
4.26 L'influence de l'angle de brise-lames dans le port semi-fermé.	124
4.27 L'évolution de front de Pareto par rapport aux générations.	125
4.28 Les résultats de l'optimisation de brise-lames flottant dans le port semi-fermé.	125

Liste des symboles

BLF	Brise-Lames Flottant	[—]
D.S	Domaine géométrique des solutions	[—]
Z.P	Zone à Protéger	[—]
a_e, c_e, f_e	Paramètres de l'équation elliptique	[—]
g_e, q_e	Paramètres de condition limite Dirichlet de l'équation elliptique	[—]
h_e, r_e	Paramètres de condition limite Neumann de l'équation elliptique	[—]
K_e, F_e	Paramètres de système linéarisé de l'équation elliptique	[—]
u_e	Solution inconnue de l'équation elliptique	[—]
Λ	Matrice des coefficients d'amortissement spécifique	[kg s ⁻¹]
Ψ	Matrice des coefficients de masses additionnelles	[kg]
Θ	Matrice des forces de stabilité dans l'eau	[N m ⁻¹]
K	Matrice de raideur	[N m ⁻¹]
M	Matrice de masse	[kg]
δ	Vecteur des amplitudes complexes du mouvement	[m]
f^e	Vecteur des forces d'excitation	[N]
f^s	Vecteur des amplitudes des forces d'excitation	[N]
n	Vecteur unitaire normal sortant de la frontière	[—]
q	Vecteur de position du corps	[m]
q_{eq}	Vecteur de position du corps à l'équilibre	[m]
q_v	Vecteur de variation de position	[m]
u	Champ de vitesse des vagues	[m s ⁻¹]
$\dot{q}$	Vecteur vitesse du corps	[m s ⁻¹]
α	Délai de la réflexion des parois solides	[°]
β	Angle d'ancrage de brise-lames flottant	[°]
η	Élévation de surface	[m]
Γ	Frontières du domaine	[—]
γ	Potentiel imposé à l'incidence	[m ² s ⁻¹]
$\mathcal{L}$	Lagrangien	[—]

$\mathcal{T}$	Énergie cinétique du système	$[\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}]$
$\mathcal{V}$	Énergie potentiel du système	$[\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}]$
μ	Coefficient de dissipation dans l'équation de Berkhoff	$[\text{m}^{-1}]$
ν	Terme de changement rapide de bathymétrie dans l'équation de Berkhoff	$[-]$
ω	Pulsation des vagues	$[\text{rad s}^{-1}]$
Φ	Potentiel de vitesse	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ϕ	Potentiel de vitesse réduit	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ϕ_D	Potentiel de diffraction	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ϕ_d	Potentiel dispersé	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ϕ_I	Potentiel incident	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ϕ_j	Potentiel de radiation par unité de vitesse	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ϕ_R	Potentiel de radiation	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
ρ_e	Masse volumique de l'eau de mer	$[\text{kg m}^{-3}]$
ρ_m	Masse volumique du matériau du brise-lames	$[\text{kg m}^{-3}]$
θ	Angle de rotation du brise-lames autour du G dans le vertical	$[\circ]$
θ_I	Angle incidente des vagues par rapport à l'axe des x	$[\circ]$
θ_p	Angle entre les frontières et les vagues	$[\circ]$
ξ	Angle entre les vagues et le brise-lames	$[\circ]$
Amp	Coefficient d'amplification des vagues	$[\%]$
C	Célérité de phase	$[\text{m s}^{-1}]$
C_d	Coefficient de dissipation des vagues	$[-]$
C_g	Célérité de groupe	$[\text{m s}^{-1}]$
C_r	Coefficient de réflexion des vagues	$[-]$
C_t	Coefficient de transmission des vagues	$[-]$
e_1	Épaisseur supérieur du brise-lames	$[\text{m}]$
e_2	Épaisseur inférieur du brise-lames	$[\text{m}]$
e_c	Épaisseur critique des parois de brise-lames	$[\text{m}]$
F_B	Force de flottabilité nette	$[\text{N}]$
f_w	Facteur de frottement au fond de la mer	$[-]$
g	Accélération gravitationnelle	$[\text{m s}^{-2}]$

GM	Hauteur métacentrique transversale	[m]
H	Hauteur des vagues	[m]
h	Hauteur totale de brise-lames	[m]
H_I	Hauteur des vagues incidentes	[m]
H_i	Hauteur des vagues induites par le mouvement de brise-lames	[m]
H_m	Hauteur de houle critique au point de déferlement	[m]
h_r	Hauteur submergée du brise-lames	[m]
H_s	Hauteur significative des vagues aléatoires	[m]
H_{rms}	Hauteur de houle quadratique moyenne	[m]
I	Inertie massique du brise-lames	[kg m ²]
j	Mode d'oscillation : 1)Balancement, 2)Pilonnement et 3)Roulis	[—]
k	Nombre d'onde	[m ⁻¹]
k_0	Nombre d'onde en profondeur infinie	[m ⁻¹]
k_r	Raideur des câbles	[N m ⁻¹]
L	Longueur du brise-lames	[m]
l	Largeur du brise-lames	[m]
m	Masse du brise-lames	[kg]
N	Nombre des vagues monochromatiques représentatives	[—]
p	Profondeur de l'eau	[m]
Q_b	Taux de déferlement	[—]
R	Coefficient de réflexion des parois solides	[—]
r	Longueur des câbles	[m]
RAO	Opérateurs d'amplitude de réponse	[—]
T	Période des vagues	[s]
t	Temps	[s]
T_p	Période de pic des vagues aléatoires	[s]
v_h	Portion de vide par rapport à la hauteur de brise-lames	[—]
V_l	Largeur de vide dans un brise-lames	[m]
v_l	Portion de vide par rapport à la largeur de brise-lames	[—]
x, y, z	Coordonnées de l'espace	[m]
x_G, y_G, z_G	Coordonnées du centre de gravité	[m]

λ	Longueur des vagues	[m]
F_1	Fonction de changement rapide de pente	[—]
F_2	Fonction de changement rapide de courbure	[—]
Υ	Matrice des vecteurs fonctions objectifs pour l'algorithme NBI	[—]
ψ	Vecteur des coefficients d'agrégation	[—]
τ	Normale à l'hyper-plan passant par les points d'ancrages du front Pareto pour l'algorithme NBI	[—]
φ	Vecteur des paramètres de contraintes sur les fonctions objectifs	[—]
ϑ	Vecteur de multiplicateurs de Kuhn et Tucker	[—]
f	Vecteur des fonctions objectifs	[—]
w	Vecteur de coefficients de la fonction d'agrégation	[—]
x	Vecteur des variables d'optimisation	[—]
ι	Distance à maximiser dans la direction normale de l'algorithme NBI	[—]
$\mathcal{D}$	Domaine des solutions	[—]
$\mathcal{P}$	Problème d'optimisation	[—]
ε	Fonction de pénalité	[—]
ϱ	Coefficient de pénalité	[—]
ς	Fonction pénalisée	[—]
c_j	Équation de contrainte	[—]
f_j	Fonction objectif	[—]
f_{Agreg}	Fonction objectif à minimiser obtenue par agrégation des p fonctions objectifs	[—]
f_{NBI}	Fonction objectif à maximiser dans l'algorithme NBI	[—]
H_{op}	Hauteur opérationnelle des vagues à l'intérieur de Z.P	[m]

Introduction

Sommaire

1.1 Structures flottantes	15
1.2 Les brise-lames flottants	21
1.3 Optimisation des ports	24
1.4 Résumé du chapitre	27

Cette thèse considère la modélisation et l'optimisation des brise-lames flottants, l'un des nombreux types de structures flottantes. Cela implique un problème d'interaction fluide-structure, et étude approfondie du comportement dynamique et mécanique des brise-lames flottants. Il demande encore des expertises dans l'optimisation et ses outils pour l'appliquer dans le domaine portuaire. Dans ce chapitre, l'introduction générale, étude de la littérature sur la modélisation des brise-lames flottants et l'optimisation dans le domaine portuaire ou côtier sont présentés.

1.1 Structures flottantes

Parmi tous les problèmes, le XXe siècle a introduit de nouveaux problèmes pour l'humanité : le manque de terres convenables à l'habitat et aux activités agricoles, industrielles et commerciales. La part de la population vivant à proximité des côtes croît rapidement. Ce problème devient sérieux avec l'expansion des demandes et des besoins agricoles et industriels correspondant à cette population. Des pays comme le Japon, la Chine, la Corée, les Pays-Bas, et la Belgique ont une densité de population très élevée. De nombreux autres pays en Europe et en Asie atteignent ce même niveau de densité.

De nombreux pays développés qui possèdent des longues côtes ont reconquis avec succès du terrain en bordure des côtes pour créer de nouveaux espaces et, en conséquence, pour soulager la pression sur leur espace de terres fortement utilisé. Les Pays-Bas, le Japon, Singapour, Hong Kong (Figure 1.1) et d'autres pays ont élargi leurs zones de manière significative à travers des travaux de remblaiement dans la mer. Cependant, l'impact environnemental négatif sur les côtes du pays ou des pays voisins et sur le système écologique marin a attiré l'attention. Ainsi que les coûts économiques dans la récupération des terres-pleines dans les eaux côtières profondes est énormes. En particulier lorsque le sable utilisé pour la remise en état doit être acheté d'autres pays [149].



FIGURE 1.1 – Une carte des terres récupérées (en gris) à Hong Kong à 1998.¹

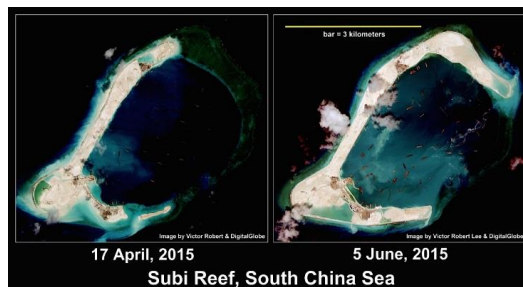


FIGURE 1.2 – Images satellite montre la Chine a élargi son remplissage de terre de Subi Reef de 74 % en moins de deux mois.²

Un autre problème des terres récupérées concerne un aspect politique, surtout dans le cas de réclamations du terrain dans la pleine mer au voisinage des frontières maritimes d'autres pays ou près des eaux internationales. Les conflits de souveraineté de la Chine sur des îles artificielles dans la mer de Chine méridionale (Figure 1.2) est un exemple récent de ce type de conflit. En réponse aux problèmes mentionnés ci-dessus, les chercheurs et les ingénieurs ont proposé de nouvelles solutions comme la construction de structures flottantes. Ces structures offshore peuvent être situées soit près de la côte, ou assez loin en pleine mer. Elles ont les avantages suivants sur les terre-pleins traditionnels :

- Elles sont faciles et rapides à construire.
- Elles peuvent facilement être déplacés, transportés, enlevés, ou agrandis.
- Elles sont rentables lorsque la profondeur de l'eau est grande.
- Leur construction n'est pas fortement affectée par la profondeur de l'eau, le profil du lit de la mer ...etc.
- Leur position par rapport à la surface de l'eau est constante ; par conséquent, elles peuvent être utilisées pour les aéroports, les quais ...etc.
- Elles sont plus respectueuses de l'environnement car elles nuisent moins au

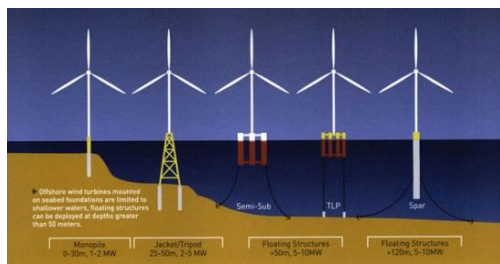
1. Crédit d'image : New School Atlas for Hong Kong (1998 Edition) - Ling Kee

2. Crédit d'image : Victor Robert Lee and Digital Globe

système écologique, ou à l'envasement des ports profonds.

- Les structures et les personnes se trouvant sur ces constructions sont protégées contre les chocs sismiques puisque l'énergie de ces chocs est dissipée par la mer.
- La durée de vie des structures flottantes et des concepts proposés est environ 100 ans de sorte que la structure peut être utilisée pendant une très longue période.

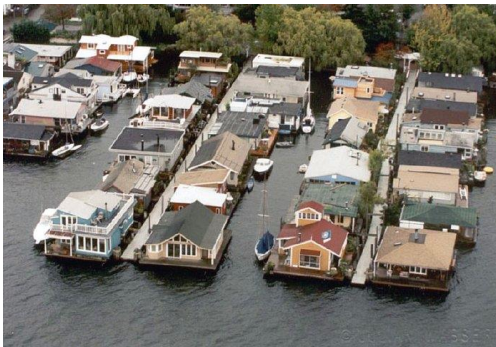
Par conséquent, le développement de structures flottantes est devenu plus en plus utilisés dans les dernières années pour des applications diverses (Figure 1.3). La demande de telles structures a augmenté significativement. Elles peuvent être construites pour créer des aéroports flottants, des ponts, des quais et des installations de stockage pétrolières. Pour la production d'énergie, les structures flottantes ont été utilisées pour mettre des éoliennes et des centrales solaires photovoltaïques en pleine-mer. Elles sont également utilisées à des fins militaires, ou pour créer un espace industriel, ou des bases d'urgence, mais également des installations de divertissement, des parcs de loisirs, et des structures mobiles offshore et même pour la construction d'habitation.



(a) Éoliennes flottantes [125].



(b) Panneaux photovoltaïques flottants. ³



(c) Maisons flottantes dans le lac Union, Seatle, États-Unis. ⁴



(d) Quais flottants au port de plaisance de Gibraltar. ⁵

FIGURE 1.3 – Applications diverses des structures flottantes.

3. Crédit d'image : Power Clouds Pte Ltd, singapour

4. Crédit d'image : <http://tenaschuck.org>

5. Crédit d'image : SunBorn

Parmi les structures flottantes les plus intéressantes aujourd'hui, Berkut, la plus grande plate-forme pétrolière dans le monde nous attire (Figure 1.4a). Elle est la plus large structure offshore construite à ce jour. Elle a été placée en 2014 sur son lieu de forage au large de la côte russe du Pacifique, près de l'île de Sakhaline, au nord du Japon. La masse de cette structure flottante géante atteint 200 000 t.



(a) Plate-forme pétrolière de Berkut. ⁶



(b) Le Mega-Float en Japon. ⁷



(c) La plateforme d'atterrissage de Space-X. ⁸



(d) Le pont flottant de Yumemai, Japon. ⁹

FIGURE 1.4 – Les structures flottantes les plus remarquables dans le monde.

La plus large île flottante, montrée dans la figure 1.4b, est le Mega-Float. Une piste flottante qui a été construite dans la baie de Tokyo à la fin de l'année 1999. Elle a comme caractéristiques : longueur 1000 m, largeur entre 60 m et 121 m, profondeur de 3 m, surface de pont 84 000 m², la masse des matériaux en acier utilisé est de 40 000 t.

En Janvier 2015, Space Exploration Technologies (SpaceX) a déployée une plate-forme d'atterrissage flottante pour de lanceurs orbitaux réutilisables (Figure 1.4c). Les dimensions de la piste d'atterrissage sont d'environ 90 m × 50 m. Elle est capable de se positionner avec grande précision à l'aide de propulseurs diesel et des informations de position GPS de sorte que la plate-forme peut maintenir sa position pour l'atterrissage du véhicule de lancement précisément.

Une autre structure flottante intéressante est le pont flottant de Yumemai, Osaka, au Japon, représenté sur la figure 1.4d. Ce pont flottant mobile en forme

6. Crédit d'image : RT.com

7. Crédit d'image : Mega Float Research Association

8. Crédit d'image : SpaceX Photos - CRS-8

9. Crédit d'image : KDC, Kansai Design Company, Japan

FIGURE 1.5 – Les brise-lames rapides à installer (RIB).¹⁰

d'arc debout sur deux pontons flottants, peut pivoter à l'aide de remorqueurs. Il a une longueur totale de 940 m avec une longueur flottante de 410 m et une largeur de 38.8 m pour six voies de circulation.

Un autre domaine d'application pour les structures flottantes est le domaine militaire. Les brise-lames rapides à installer (RIB : rapidly installed breakwaters) sont un bon exemple de ces structures (figure 1.5). Ils sont spécifiquement conçus par les forces armées américaines pour résoudre les problèmes liés aux déchargements des navires en pleine mer lors des opérations de logistique. Le système de RIB se compose d'une structure en forme de V en vue de dessus, avec des rideaux verticaux rigides s'étendant à partir de la surface de l'eau vers le bas sur une distance suffisante pour limiter la pénétration d'une trop grande quantité d'énergie des vagues sous la structure. Une fois déployée, la pointe du V est orientée vers les vagues incidentes, et fonctionne en étalant et en réfléchissant les vagues entrantes.

En plus de des applications citées précédemment, une utilisation importante et durable de ces structures est celle des brise-lames flottants installés dans les ports pour protéger la zone portuaire des vagues de la mer. Dans le cas des ports en eau profonde, les structures flottantes sont une bonne alternative aux installations portuaires traditionnelles.

Les quais flottants ont été construits à Hiroshima, au Japon, et à Vancouver, Canada. Dans Valdez, en Alaska. Une jetée flottante a été conçue pour l'accostage d'un navire porte-conteneurs de 50 000 t. Le principal avantage d'un quai flottant est sa position constante par rapport à la ligne de flottaison. Ainsi, les quais flottants permettent un chargement et déchargement plus efficace des cargaisons. Des quais flottants ont aussi été construits aux États-Unis et dans d'autres pays.

Les recherches sur les installations flottantes portuaires, leur conception et leur analyse, attirent l'attention de nombreux pays [149]. Elles sont des structures intéressantes dans ce domaine d'un point de vue pratique et économique :

- A cause de la taille importante des navires porte-conteneurs modernes, il est

10. Crédit d'image : chl.wes.army.mil

nécessaire de créer des ports profonds et assez large capable d'accueillir ces types de navires.

- Lorsque les terminaux de conteneurs sont placés à des endroits stratégiques, l'utilisation de ces ports augmente [48].

D'après des études antérieures, il est apparu que l'efficacité des ports flottants est touchée par l'attaque des vagues. Un brise-lames flottant est nécessaire pour augmenter le taux d'efficacité du port. Il sert, de plus, à créer un refuge pour les navires lorsque les conditions météorologiques deviennent mauvaises [129].

Parmi les différentes applications de structures flottantes, on trouve que le brise-lames flottant est une structure essentielle. Il est utilisé principalement pour protéger les ports qui sont augmenté leur nombre ainsi que leurs zones en raison du développement de commerce entre les pays. En outre, elles sont utilisées comme des structures secondaires dans les projets d'aéroports flottants, maisons flottantes, hôtels flottantes, réservoirs de stockage de pétrole, logistique militaire, ...etc.

Le type particulier de structures flottantes, le brise-lames flottant, constitue le sujet de cette thèse.



(a) Atténuation des vagues par brise-lames flottant. ¹¹



(b) Projet MOSE des brise-lames flottants pour protéger Venise. ¹²



(c) Brise-lames flottant au port de plaisance Allatoona, Géorgie. ¹³

FIGURE 1.6 – Les digues flottantes

11. Crédit d'image : Inland and Coastal Marina Systems Ltd

12. Crédit d'image : VINCENZO PINTO/AFP

13. Crédit d'image : John Chulick/ flickr

1.2 Les brise-lames flottants

Les brise-lames flottants ont été largement utilisés comme une solution alternative pour protéger les sites côtiers en particulier les petits ports et dans certaines zones qui ne conviennent pas pour les brise-lames fixes (Figure 1.6). Les caractéristiques et les configurations des brise-lames flottants lèvent certaines limitations qui liées à la construction des brise-lames fixes. La faiblesse de la capacité des fonds marins à supporter des fondations, le coût de construction élevé en eaux profondes, et la stricte exigence de circulation de l'eau dans certaines zones sont des exemples de ces limitations. Les brise-lames flottants sont également préférables aux brise-lames fixes pour l'atténuation de l'énergie de la vague lorsqu'ils concernent des vagues à périodes courtes. Les utilisations de brise-lames flottants sont considérés comme économiques pour des périodes des vagues d'environ 3 s-5 s au moins [115].

Il y a plusieurs types de brise-lames flottants. Les types principaux sont :

- Brise-lames flottant "pontons" :

Le brise-lames ponton (Figure 1.7) est le type le plus efficace, puisque la largeur totale peut être de l'ordre de la moitié de la longueur des vagues, qui, selon Oliver et al. [112], signifie qu'ils atténueront suffisamment les vagues. Ils offrent les meilleures perspectives pour une utilisation multiple (utilisation en tant que passerelle, stockage, etc.).

Plusieurs sous-types de ce brise-lames ont été développés :

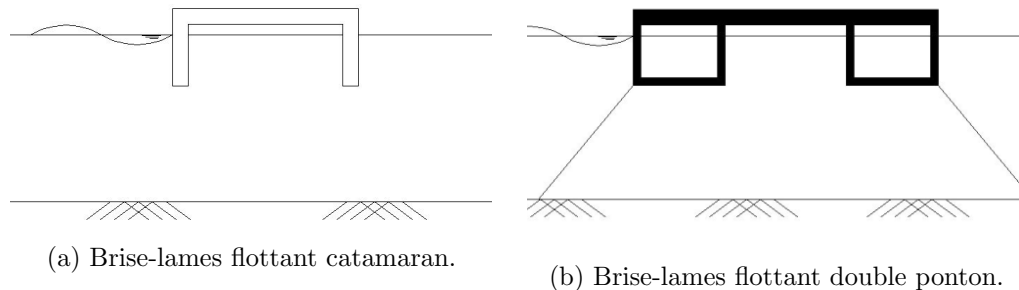


FIGURE 1.7 – Brise-lames flottants Pontons [103].

- Les pontons jumeaux ou les pontons en forme de catamaran, comme le montre la figure 1.7a, distribuent la masse pour obtenir une période de roulis plus longue. Cela donne une structure plus stable que celle qui serait obtenue avec la même masse dans un ponton de forme simple. Les coins fournissent une perte d'énergie supplémentaire par la dissipation, et la masse d'eau entre les coques ajoute des zones d'amortissement, en particulier pour le mouvement de balancement.
- Une seconde alternative est appelé le type à double ponton. Elle est représentée sur la figure 1.7b, où deux pontons sont reliés sur le côté par un pont rigide. La recherche sur ce type de brise-lames flottant a été réalisée par Williams and Abul-Azm [151]. Un brise-lames flottant

double ponton atténue les vagues d'une manière semblable au type un seul ponton mais peut aussi détruire de l'énergie par les mouvements d'eau turbulent entre les deux corps flottants.

— Brise-lames flottants tapis :

Les brise-lames de type tapis peuvent, par exemple, être construits sur de vieux pneus. De toute évidence, ils sont une solution à faible coût et facile à construire. Ils sont beaucoup moins efficace pour une utilisation pour des longueurs des vagues importantes que les brise-lames flottants de type ponton. Ils ont une durée de vie plus petite [56]. Une représentation simple d'un brise-lames flottant tapis est présenté sur la figure 1.8a.

— Brise-lames flottante cadre-A :

Un brise-lames flottant cadre-A est une combinaison de parois verticales qui reflètent l'énergie des vagues et des "outriggers" pour la stabilité qui permettra également de développer une grande période de roulis. Cette configuration est représentée sur la figure 1.8b.

— Brise-lames flottant attaché :

Le brise-lames flottant attaché atténue les vagues par la traînée produite pendant les oscillations d'un champ de sphères attachées pour rester au-dessous du niveau de la mer [112]. Ce concept est représenté sur la figure 1.8c.

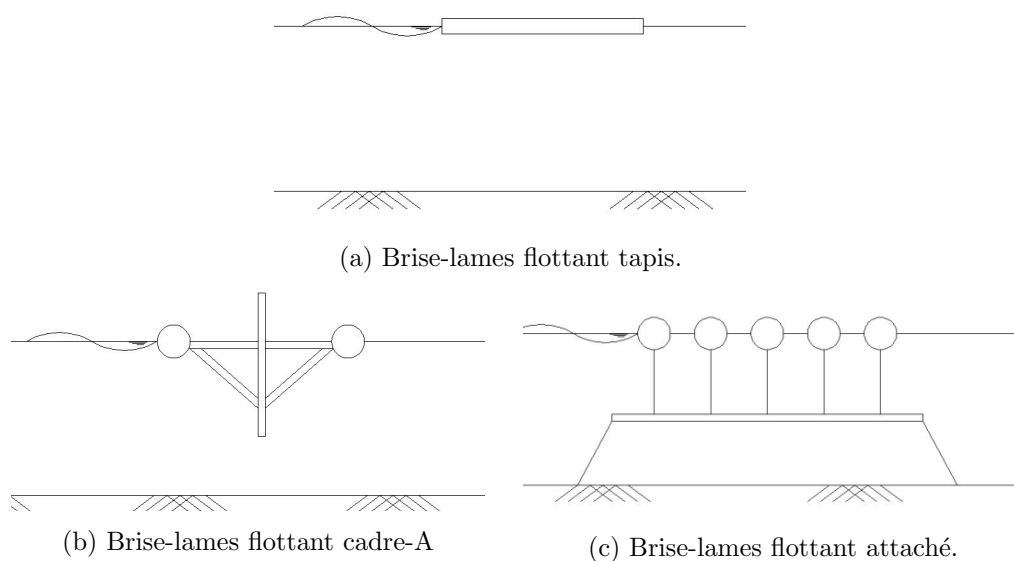


FIGURE 1.8 – Autres type des brise-lames flottants [103].

Les brise-lames flottants ne peuvent pas arrêter complètement l'action de la vague incidente [91]. Il atténue l'action des vagues en transmettant partiellement, réfléchissant partiellement et en dissipant partiellement la vague incidente. La dissipation d'énergie est due à l'amortissement, la friction et la génération de tourbillons. Le mouvement de la structure génère également des vagues induites qui se propagent

dans la direction offshore et vers la côte. Cela rend le problème hydrodynamique extrêmement complexe pour le brise-lames flottant.

Les efficacités des différents profils et configurations des brise-lames flottants peuvent être quantifiées par le coefficient de transmission. Le coefficient de transmission est défini comme le rapport entre la hauteur significative des vagues sur le côté de brise-lames flottant et la hauteur significative des vagues sur la face avant.

De nombreuses expériences et modèles ont été réalisées pour étudier l'efficacité des brise-lames flottants. L'un d'eux est une expérience dans une installation à grande échelle qui a été réalisée par Koutandos et al. [91] pour étudier l'hydrodynamique de l'interaction des vagues régulières et irrégulières avec les brise-lames flottants en eau peu profonde et de profondeur intermédiaire.

Plusieurs cas de tests avec des configurations différentes de brise-lames flottants et de paramètres de vague ont été examinés. Les résultats ont montré la dépendance de l'efficacité sur le rapport entre la largeur du brise-lame flottant et la longueur des vagues et aussi sur le rapport entre la hauteur submergée du brise-lames flottant et la profondeur de l'eau. Koutandos et al. [91] ont proposé une configuration du brise-lames flottant le plus efficace sans tenir compte du rapport coût-efficacité.

Une autre expérience sur l'efficacité des brise-lames flottants a été menée par Stansberg et al. [138]. Une structure flottante avec une configuration spécifique a été testée dans le bassin de l'océan à Marintek. Les résultats de cette expérience ont montré que le brise-lames flottant doit être relativement plus large par rapport à la longueur des vagues afin d'obtenir l'atténuation adéquate. Ces auteurs montrent qu'ils seront rentables pour des vagues incidentes avec de grandes périodes (environ 10 s-15 s). Les expériences sur l'efficacité des brise-lames flottants ont également été effectuées par Zidan et al. [158], en examinant l'interaction hydrodynamique des vagues régulières avec des brise-lames flottants dans les eaux intermédiaires et profondes. La conclusion générale de cette expérience a été de montrer l'influence de la hauteur submergée et de la largeur des brise-lames flottants sur leur efficacité.

Elchahal et al. [50] ont modélisé l'interaction hydrodynamique des vagues régulières avec les brise-lames flottants dans sa section transversale verticale de la structure. Ils ont proposé un modèle de comportement dynamique des brise-lames flottants maintenus par des câbles ancrés au fond de la mer. Ils ont calculé la performance du brise-lames. Ils ont étudié, en plus, l'interaction fluide-structure pour déterminer les sollicitations mécaniques appliquées sur les parois du brise-lames à cause de l'énergie des vagues.

Dans cette thèse nous intéressons à définir un modèle hydrodynamique de performance de brise-lames flottant qui prend en compte l'effet dynamique observé dans le plan vertical tout en prenant en compte l'interaction de ce brise-lames avec le milieu du port qui l'entoure.

1.3 Optimisation des ports

Le processus de conception d'un port maritime est complexe. Un ensemble de considérations doit être pris en compte non seulement au moment de la conception, mais pour l'ensemble du cycle de vie du projet. Comme tous projets, les aspects techniques devraient être intégrés ainsi que des facteurs sociaux, environnementaux, économiques et autres [35].

Toutefois, certaines recommandations devront être gardées à l'esprit pour définir un brise-lames. Sa longueur doit toujours être minimisée afin de réduire les coûts. La configuration de l'entrée devrait limiter la pénétration des vagues. Les brise-lames doivent réserver un espace suffisant immédiatement derrière eux pour éviter que les structures dures approchent des parois de canal. D'autre part les navires ont besoin d'un espace latéral suffisant pour passer de condition de courants-croisées vers l'eau calme. Cette espace permet également de réduire la pénétration des vagues en raison de l'amélioration des effets de diffraction [97].

Une conception de haute qualité d'un port peut tenir compte macroscopiquement des aspects sociaux, environnementaux et économiques. Les discussions sur le niveau macro est hors de la portée de cette étude. Ceux-ci et d'autres décisions stratégiques sont considérées comme déjà prises. L'accent est mis sur le brise-lames et sur les éléments de sa section qui sont soumis à une optimisation économique. L'optimisation d'un brise-lames est une tâche très difficile car l'optimum est subjectif et peut être différent selon le point de vue.

Un brise-lames peut être optimisé par rapport à, entre autres, les coûts de construction, le temps de construction, les impacts environnementaux et le coût total.

La définition de la conception optimale donnée par Van de Kreeke and Paape [146] est qu'une conception du brise-lames est optimale quand il aboutit à une structure qui répond aux exigences de coût total minimum. Ce coût total est défini comme le coût de la construction, plus les dégâts prévus et des pertes économiques en raison de l'échec de la structure. Afin d'évaluer le coût, les dimensions du brise-lames doivent être déterminées. Le type de la structure et les dimensions de la section transversale doivent être sélectionnés.

Piccoli [119] a proposé une méthode d'optimisation économique des brise-lames pour concevoir sa section transversale en minimisant son coût total. Le coût total est défini comme susmentionné. Lors de la conception d'une structure, la période de retour a été établie et les caractéristiques de la vague utilisée pour la conception ont été déterminées. Étant donné que les caractéristiques ont un aspect stochastique, il y a toujours une probabilité que ces valeurs soient dépassées. Une augmentation des caractéristiques conduit à une augmentation des coûts de construction. Néanmoins, en sélectionnant une vague de conception plus élevée, la probabilité de dépassement de cette nouvelle valeur est réduite par conséquent les dommages prévus capitalisés et les pertes économiques deviennent plus petites. La somme de ces valeurs (coût de la construction, dommages anticipés capitalisés et les pertes économiques) est calculée afin d'identifier la vague de conception optimale pour laquelle les coûts totaux sont réduits au minimum (Figure 1.9).

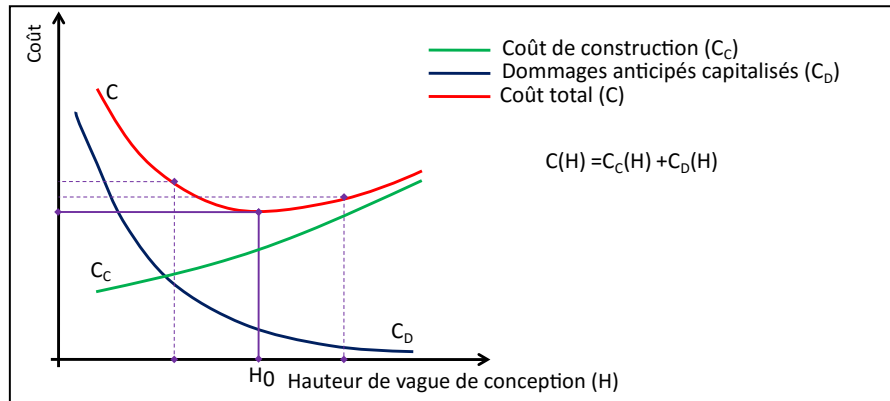


FIGURE 1.9 – Le coût total en fonction de la hauteur de la vague de conception [119]. (Traduit)

En plus, Piccoli [119] a utilisé deux démarches différentes : la démarche déterministe et la démarche probabiliste. La conception de la section transversale pour chaque hauteur de vague de conception est obtenue par un calcul déterministe lorsque le seul mode de défaillance considéré est l'instabilité de la couche de blindage. Dans l'optimisation économique probabiliste complet, d'autres variables de conception telles que la hauteur de la crête, la profondeur de l'eau au pied et des autres peuvent également être optimisées. Chaque combinaison de ces variables de conception (généralement des propriétés géométriques) donne un coût total différent de la construction et de la probabilité d'échec total, qui est déterminée par une analyse de fiabilité. L'analyse combine les modes de défaillance individuels tels que la submersion excessive, l'instabilité de pied, la transmission de vague excessive et d'autres. La conception optimale est obtenue par la minimisation des coûts totaux en fonction des variables de conception qui sont en cours d'optimisation. Les coûts totaux de cette approche sont aussi les coûts de construction ainsi que les coûts attendus de l'échec.

Elchahal et al. [54] ont optimisé le positionnement et le dimensionnement d'un brise-lames fixe dans un domaine portuaire (Figure 1.10). Ils ont minimisé le coût du brise-lames à construire représenté par son volume et soumis à la contrainte d'une vague de hauteur maximale acceptable à l'intérieur du port. Cette vague est prédéfinie par rapport aux conditions opérationnelles dans le port. Des autres contraintes liées à la sécurité de la navigation sont prises en compte explicitement en définissant le domaine de solution (Figure 1.10a). Le volume du brise-lames est calculé en fonction de sa position et la profondeur de l'eau à cette position.

Elchahal et al. [50] ont travaillé pour optimiser la section transversale verticale d'un brise-lames flottant lié au fond de la mer par des câbles (Figure 1.11a). L'objectif était de minimiser la hauteur des vagues après le brise-lames afin de trouver le brise-lames optimal qui amène l'atténuation maximale des vagues à l'intérieur du port. La solution optimale a été capable de soumettre plusieurs contraintes. La contrainte de stabilité a le but de vérifier la capacité de la structure à retourner à sa

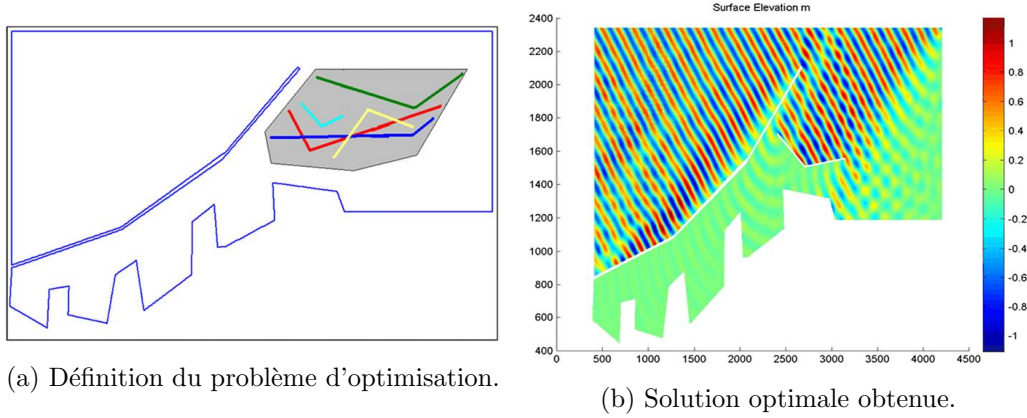


FIGURE 1.10 – Optimisation de positionnement de brise-lames fixe [54].

position initiale après toute perturbation. La contrainte de flottabilité, en se basant sur le principe d'Archimède, garantit que la structure ne coule pas dans l'eau. En fin, la contrainte structurale met des limites inférieures sur les épaisseurs des parois selon les forces de pression appliquées (Figure 1.11b).

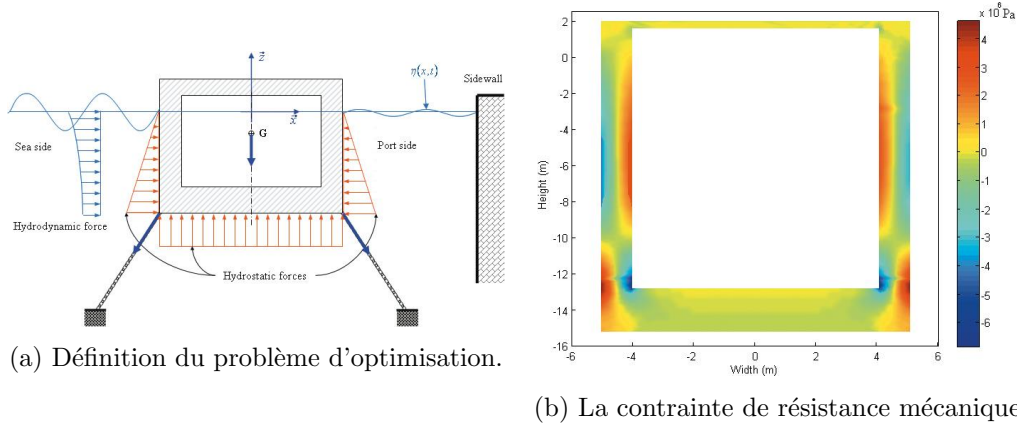


FIGURE 1.11 – Optimisation de la section transversal du brise-lames flottant [50].

Dans cette thèse on va définir une méthode d'optimisation stochastique en formulant un problème multi-objectif pour minimiser en même temps le coût de la structure flottante représenté par son volume et le coefficient de transmission des vagues à l'intérieur du port. Ce coefficient n'est que la hauteur des vagues maximale à l'intérieur du port divisée par la hauteur des vagues incidentes.

Tout d'abord les différentes contraintes dans le domaine d'aménagement portuaire seront résumées dans une étude bibliographique dans le chapitre 2. En suite un modèle hydrodynamique 2.5D des brise-lames flottants sera établie dans le chapitre 3. Ce modèle nous permettra d'étudier la performance du brise-lames dans son milieu pour calculer le degré d'atténuation des vagues. Le problème d'optimisation est alors défini dans le chapitre 4 tout en proposant une démarche d'optimisa-

tion spécifique adaptée au problème. A la fin de ce chapitre une application sera présentée en suivant notre proposition de démarche d'optimisation et en utilisant le modèle hydrodynamique établi. Finalement, nous conclurons ce travail et dresseront quelques perspectives dans le chapitre 5.

1.4 Résumé du chapitre

Ce chapitre a été une introduction au sujet des brise-lames flottants :

- Rôles et besoins.
- Études de performance et modélisations hydrodynamique.
- Optimisation de conception portuaire.

Aménagement portuaire : besoins et contraintes

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	Contraintes liées à l'environnement	31
2.2.1	La qualité d'eau	32
2.2.2	Le niveau d'eau	32
2.2.3	La vie écologique	32
2.3	Contraintes liées à la mécanique des fluides	33
2.3.1	Vagues	33
2.3.2	L'érosion et l'inondation	36
2.3.3	La Bathymétrie	37
2.3.4	Le tirant de l'eau	37
2.3.5	Le courant	37
2.4	Contraintes liées aux structures	38
2.4.1	Les contraintes économiques	38
2.4.2	Les contraintes mécaniques	39
2.5	Besoins de manœuvrabilité	41
2.5.1	Contraintes d'architecture	41
2.5.2	Contraintes liées aux navires	43
2.6	Conclusion	44
2.7	Résumé du chapitre	44

L'objectif principal de ce chapitre est de préciser les besoins et les contraintes fonctionnelles qui constituent le cahier des charges d'un problème d'aménagement portuaire.

2.1 Introduction

Les zones côtières ont joué un grand rôle dans les progrès de l'humanité. Bien que les risques provenant des océans soient parfois énormes, nous constatons que 70 % des populations de la planète vivent dans la grande zone côtière à moins de 60 km du rivage [152]. Depuis longtemps l'homme a cherché à tirer bénéfice des côtes. Il y a cinq mille ans (en 3^{ème} millénaire avant J.C.) les Phéniciens ont construit leurs

ports de Tyr et de Sidon sur la côte de la mer Méditerranée afin d'élargir et de développer leurs activités commerciales [15].

Un port est défini comme un endroit où les navires chargent et déchargent des marchandises et où ils peuvent s'abriter contre les tempêtes [72]. Aujourd'hui, il existe quatre types de ports définis en fonction de leur usage principal. On distinguera : les ports de pêche, les ports militaires, les ports de plaisance et les ports commerciaux.

Chaque type de ports impose ses propres considérations dans la conception et la gestion. Nous limiterons notre étude aux ports commerciaux qui sont impliqués dans la majorité du transport de marchandises dans le monde.

La conception et l'exploitation de ces ports ont pour objectif d'augmenter la capacité et le temps d'exploitation de ces derniers. Il s'agira dans un premier lieu de concevoir ces ports d'une manière optimale et d'optimiser ensuite leur exploitation. En outre, la protection des structures du port et la sauvegarde du littoral sont deux objectifs importants. Considérant les structures de protection des installations portuaires, les brise-lames jouent un rôle particulier dans la réalisation de ces deux objectifs [143].

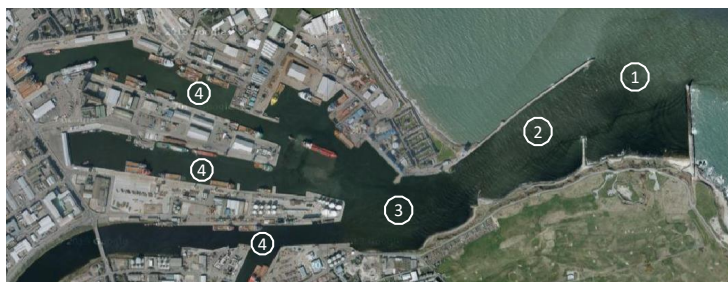


FIGURE 2.1 – Configuration du port Aberdeen au Royaume-Uni ¹⁴ : (1) Entrée, (2) Canal de navigation, (3) Région de manœuvre et (4) Quais de chargement / déchargement

La Figure 2.1 montre un cas typique d'un port commercial où les différents éléments du port peuvent être distingués. Il s'agit du port d'Aberdeen au Royaume-Uni. Le port se compose de quatre éléments principaux :

1. L'entrée du port.
2. Le canal de navigation.
3. La région de manœuvre pour tourner et orienter les navires vers les quais.
4. Les quais de chargement et déchargements.

On notera le rôle des structures de protection comme les brise-lames pour définir l'entrée et le canal de navigation.

14. Crédit d'image : Google Maps

Afin d'aider les chercheurs ou les ingénieurs en charge de l'aménagement côtier dans la conception de ces aménagements, beaucoup de chercheurs ont travaillé sur la compréhension des contraintes qui menacent le littoral, les ports et les structures d'aménagement et de protection.

Nous allons, tout d'abord, résumer les travaux effectués dans ce domaine, avant de formuler le problème de la conception d'un brise-lames qui prend en considération le plus grand nombre de contraintes fonctionnelles. Nous allons décomposer ces contraintes en quatre catégories : contraintes liées à l'environnement, contraintes liées à la mécanique des fluides, contraintes liées aux structures et contraintes liées aux besoins de manœuvrabilité.

Les contraintes environnementales couvrent la qualité de l'eau, le niveau de l'eau, le bruit, la glace et la vie écologique.

Dans les contraintes liées à la mécanique des fluides, nous allons d'abord observer les effets des vagues qui sont considérés comme les contraintes les plus importantes. Ensuite, nous irons plus loin dans le monde de la modélisation des vagues pour préciser les principes et les hypothèses utilisés. Nous allons aussi parler de l'érosion et des phénomènes d'inondation, de l'influence de la profondeur de l'eau et des courants océaniques.

A propos des contraintes structurelles, nous aborderons les problèmes économiques liés aux coûts, les matériaux et processus de construction (emplacement et dimensions) et les contraintes mécaniques. Nous évoquerons également les contraintes structurelles liées aux effets des réponses sismiques de ces structures. Le problème de la flottabilité et de la stabilité des brise-lames flottants sera aussi considéré.

Finalement nous présenterons les contraintes liées aux mouvements des navires avec l'influence de l'architecture du port sur la manœuvrabilité. L'entrée et l'aire de manœuvre seront examinées pour trouver les différents facteurs qui influent sur leurs conceptions.

2.2 Contraintes liées à l'environnement

De nombreux problèmes pourraient être étudiés dans l'environnement de l'océan comme par exemple l'élévation du niveau de l'eau en raison du réchauffement climatique, la pollution de l'eau ou de ce qu'on appelle la qualité de l'eau et la vie écologique. Ces trois questions seront détaillées dans cette section.

En outre, de nombreux autres problèmes environnementaux peuvent apparaître dans certains cas particuliers tels que le bruit et le problème de la glace.

Le bruit dans le port a été étudié et considérée comme un type de pollution dans la zone portuaire [83].

La croissance accélérée des glaces est un problème auquel l'exploitant du port doit faire face dans les bassins portuaires des régions froides [144].

2.2.1 La qualité d'eau

La qualité de l'eau dans le bassin est un aspect important qui doit être pris en compte dans la conception du port. Les flux d'entrée et sortie de l'eau produisent une action de rinçage [108]. Un faible taux d'échange de l'eau de mer entre l'intérieur et l'extérieur du port provoque des problèmes environnementaux tels que des mauvaises odeurs et des troubles écologiques [148].

La qualité de l'eau dans un port est affectée par l'existence de structures à cause de leur influence sur le mouvement des courants et des marées. La prédiction de cette influence, avant de construire les structures, par des modèles mathématiques est l'une des solutions utilisées pour minimiser les conséquences de ces problèmes [84]. En utilisant ces modèles mathématiques de prédictions, les mauvaises conceptions peuvent être évitées.

La disposition des ports est une géométrie complexe qui limite la renouvellement de l'eau de la mer ouverte dans les zones portuaires-clos [83]. Les ports du monde, qui ont une seule connexion à l'océan adjacent, subissent des impacts environnementaux graves dus à des rejets systématiques et accidentelles des eaux polluées. C'est pour cela des ports multi-connexion ont été recommandés [148]. Des brise-lames qui permettent d'échanger de l'eau de mer sont proposés pour faire face à la question de la qualité de l'eau dans les ports [148]. Par exemple il est possible de concevoir des structures côtières spécifiques comme les CDWs (Current Deflecting Walls) pour réduire l'envasement du port [18].

2.2.2 Le niveau d'eau

Aujourd'hui, l'élévation du niveau moyen des océans soulève de nombreuses questions et posera à terme des problèmes cruciaux pour une part importante de la population. Les changements climatiques accélèrent cette hausse du niveau des mers [9, 144], ils devraient être pris en considération lors de la conception d'un brise-lames qui a une longue durée de vie. Par exemple, Suh et al. [141] propose d'introduire un facteur de sécurité en tenant compte de l'élévation du niveau de la mer. D'autre part, Chini et al. [32] souligne que l'élévation du niveau de l'eau augmente la hauteur des vagues côtière dans les eaux peu profondes et Chini et al. [32] met en évidence que la hauteur significative des vagues, qui se produit habituellement une fois tous les 100 ans, devient plus fréquente avec des conséquences évidentes sur les activités et les aménagements de protection côtière.

2.2.3 La vie écologique

L'existence de structures côtières comme les brise-lames accroît la complexité de l'habitat, en favorisant son hétérogénéité et sa disponibilité pour l'écosystème marin. Par exemple, l'étude de Burt et al. [23] rapporte que ces brise-lames améliorent le repeuplement et augmentent la biomasse des espèces en agissant comme un récif artificiel sur lequel les communautés de poissons de récif abondantes et diversifiées peuvent se développer. Les matériaux utilisés dans la construction de ces structures

ont également une grande influence sur le rôle d'habitat récifal des brises lames[22]. La forme des brise-lames submergés joue également un rôle dans leur transformation en habitats pour favoriser la vie marine [83].

Ces influences sont quantifiées par un indicateur : le potentiel écologique des masses d'eau fortement modifiées (HMWBs : heavily modified water bodies). Celui-ci a été défini pour étudier l'influence de la présence de ports sur l'état écologique afin de mesurer les altérations physiques causées par l'activité humaine [113].

2.3 Contraintes liées à la mécanique des fluides

Dans l'océan, la force de l'eau statique ou en mouvement est la source naturel de limitations et défis importants dans les projets de développement. Les vagues, les courants, les érosions, etc... font tous partie de considérations mécaniques de ces projets.

2.3.1 Vagues

Les phénomènes liés aux vagues sont d'une importance primordiale dans l'ingénierie côtière [59]. Dans la littérature on trouve un grand nombre d'articles concernant la modélisation des différents types de vagues et de leurs effets.

Aussi la plupart des structures de défense sont conçues pour assurer une protection contre l'énergie des vagues [57, 77, 83, 143, 144, 148] ou pour maintenir la fonctionnalité des ports en assurant la stabilité du navires accostant au cours et les activités de chargement / déchargement [83]. Le mouvement des navires induit par les vagues peut participer à l'apparition de sérieux dommages par exemple sur les conteneurs ou les dispositifs de manutention, entraînant une augmentation des temps de manutention [71]. L'efficacité des brise-lames diminue lorsque la hauteur des vagues transmise à la zone portuaire augmente [50, 77].

Physiquement une vague de la mer est une perturbation de surface de l'eau qui transmet l'énergie d'un point à un autre en déplaçant les particules d'eau suivant des orbites circulaires. Il existe trois types des vagues. La première est la vague éolienne produite par le vent soufflant sur la surface libre des océans. La seconde est la vague de marée qui est produite à partir d'interférence entre les forces gravitationnelles de la lune et du soleil et les forces centrifuges provoquées par la rotation de la terre. Le dernier type est le Tsunami, appelé encore onde solitaire, ayant pour origine des mouvements des plaques océaniques dus aux forces tectoniques [70].

Une vague de la mer est présentée par la déformation de la surface libre autour du niveau de l'eau calme. Cette déformation consiste d'une crête qui est la tête d'une passage croissante et une creux qui est le bout d'une passage décroissante. Elle peut être caractérisée comme toutes les ondes par trois paramètres principaux qui sont : la longueur et la hauteur des vagues mesurées habituellement en mètres et la période des vagues mesurées habituellement en seconde. A partir de ces paramètres, nous pouvons calculer les autres caractéristiques importantes tels que la vitesse des

vagues en mètre par seconde, qui est la longueur des vagues sur la période, et la fréquence en hertz.

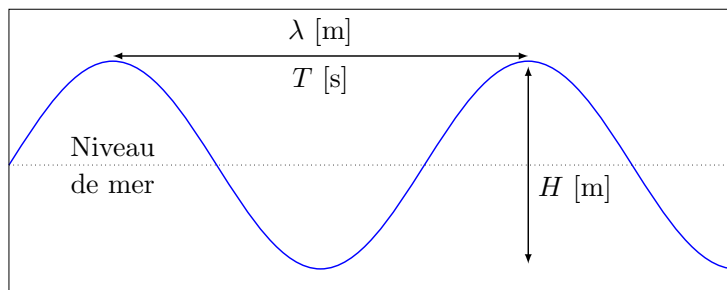


FIGURE 2.2 – Caractéristiques des vagues

Nous concentrerons notre étude sur les vagues éoliennes car les données empiriques montrent que ce type de vagues représente plus que la moitié de l'énergie transportée par les vagues sur la surface de l'océan [6]. Mais avant de parler de l'effet de ces vagues, nous détaillerons les différents moyens utilisés pour les représenter.

Une vague éolienne dans l'océan n'est pas une onde monochromatique. Elle est la superposition de plusieurs ondes monochromatiques de différentes périodes et phases. L'état de la mer est alors caractérisé par une hauteur significative (la moyenne des hauteurs du tiers de l'ensemble des plus hautes vagues) et une période de pic (période de la forte densité spectrale).

Il existe deux méthodes pour déterminer ces paramètres : l'approche statistique et l'approche spectrale. Les statistiques des vagues nécessitent de gros efforts dans la collecte de données, de filtrage et d'analyse pour être utiles dans le processus de conception et de gestion d'un aménagement portuaire. Ces données sont collectées à partir d'une station fixe près de la ligne de rivage ou par les observations des navires dans le monde entier. Les principaux inconvénients de la méthode statistique sont la vulnérabilité des appareils de mesure, le caractère aléatoire des observations et le risque de ne pas mesurer des conditions extrêmes par les navires [42]. Une fois la loi de probabilité représentant la distribution de vagues est définie, elle peut être utilisée pour déterminer les paramètres des vagues monochromatiques qui composent la vague aléatoire.

Quant à l'approche spectrale, le spectre d'énergie de la houle qui est lié au surface libre à partir de la transformation de fourrier est calculé à partir du spectre de variance après des observations longues du statut des vagues dans une zone maritime comme le cas du spectre de JONSWAP [68]. Le spectre d'énergie sera, en fin, présenté par des relations empiriques. Une fois le spectre est choisi, une relation entre les caractéristiques de la vague aléatoire et les vagues monochromatiques qui la composent peut être établie.

Quand les caractéristiques des vagues monochromatiques sont connues, on peut appliquer une des théories de propagation de vague. Ces théories sont toutes basées sur l'équation de Navier-Stokes [12].

Par ailleurs, nous devrions savoir que la principale difficulté dans le processus de

modélisation est l'effort de calcul excessif nécessaire pour résoudre le modèle [11]. En particulier un modèle 3D qui, lorsqu'il est possible à résoudre, nécessite un effort de calcul très important [124]. Par conséquent, de nombreuses approximations ont été faites dans un premier lieu pour établir les modèles hydrodynamiques. Ensuite, vue l'évolution du matériel et des logiciels de calcul, de nombreuses modifications sont faites sur les modèles initiaux pour les améliorer.

Initialement, la théorie linéaire et la propagation des vagues non linéaires monochromes a été proposée par [3, 140]. Ensuite les effets non linéaires en eau peu profonde sont pris en compte dans le modèle de Boussinesq [17]. Ce modèle est encore très utilisé dans les logiciels d'ingénierie côtière qui simulent des vagues dans les ports [83]. L'irrégularité des vagues en mer a été prise en compte [120] en considérant une approche spectrale pour les vagues. L'interaction avec les formes géométriques est étudiée. Ces formes peuvent être des brise-lames ou des topographies naturelles. Les effets combinés de la diffraction et de réfraction plus de ceux dus à la bathymétrie sont décrits dans l'équation de Berkhoff dénommée "Mild slop Equation" ou l'équation de pente douce [14]. Cette équation est souvent utilisée dans l'ingénierie côtière pour calculer le champ de vitesse des vagues dans les ports ou à proximité de la ligne de rivage. Le modèle de Berkhoff est étendu plus tard pour être valable pour tous les types bathymétrie [100], et modifié pour simuler la dissipation d'énergie due au frottement au fond [123] et celle due au déferlement des vagues.

On trouve dans [26] un état de l'art complet sur la modélisation des vagues.

Tableau 2.1 – Les Modèles de propagation des vagues

Date d'apparence	Le modèle
1845	Airy pour les vagues linéaires monochromatiques
1847	Stokes pour les vagues non-linéaires monochromatiques
1872	Boussinesq pour les eaux peu profondes
1955	Pierson pour les vagues aléatoires
1972	Berkhoff pour des changements à pente douce du fond

Les vagues sont considérés comme étant les principales responsables des dégâts de structures [108, 144, 148]. Leurs effets ont été étudiés en fonction de leurs caractéristiques. La hauteur des vagues et leur longueur jouent un grand rôle dans la création des dommages des structures ou des navires [143]. Une vague d'une hauteur de 0.30 m, par exemple, pourrait être le seuil maximale acceptable pour éviter les dommages des navires amarrés derrière un brise-lames [43].

La longueur des vagues est un paramètre important pour les dispositifs d'atténuation des vagues [67], elle joue également un rôle important dans les phénomènes de résonance dans les ports sur les navires, amarrés ou non [41]. Franco et al. [59] montre que ces dommages peuvent augmenter quand la période des vagues augmente. Habituellement, la résonance du port se produit lorsque des vagues de certaines périodes viennent dans une ouverture de port et se retrouvent piégées et

amplifiées dans un domaine semi-fermé [46]. Le mouvement de basse fréquence des navires peut interrompre la manutention du fret [83, 144].

L'obliquité des vagues et l'aspect multidirectionnel font que les vagues se comportent différemment sur les brise-lames [18]. Ils ont également une grande influence sur les forces appliquées sur les connecteurs en cas de brise-lames flottants [144].

Un autre effet des vagues est la rupture par fatigue des structures. Les études de la dégradation due à la fatigue des matériaux d'un brise-lames conduisent à la prise en compte de la durée de vie du brise-lames [59]. Cette sollicitation répétitive peut aussi conduire à affaiblir progressivement les bases et provoquer une défaillance des fondations [114].

La défaillance des fondations de la structure et l'affouillement du fond marin par liquéfaction, causé par l'instabilité des vagues induite au fond, peuvent être considérés comme des effets critiques des vagues, ce qui constitue une grande menace pour la stabilité des structures côtières [18, 77, 86, 108, 148].

En plus, le phénomène de submersion a été étudié en raison de ses inconvénients sur la fonctionnalité dans la zone située derrière les brise-lames [82, 156]. Malgré qu'elle a été identifiée comme un facteur de risque potentiel capable de provoquer des dommages structurels car elle produit des forces anormales qui sont préjudiciables à la stabilité [5, 101, 114]. Elle est finalement une source d'altération fonctionnelle plus que de dommages structurels [5, 58].

Les fréquences différentes, les volumes et vitesses de ces vagues déferlantes ont une influence sur la sécurité des structures et des personnes qui travaillent ou voyagent en leur présence. Elles peuvent réduire la visibilité dans le port ou entraîner la perte soudaine de la visibilité augmentant ainsi les risques dans la conduite ou la manœuvre de navire [16]. Par conséquent les brise-lames sont dimensionnés pour prendre en compte les plus grandes hauteurs de vagues afin d'éviter ces phénomènes de submersion [135]. Le déplacement des brise-lames plus loin dans la mer permettra de réduire l'effet de submersion dans la zone de travail du port [54]. Généralement le comportement à la submersion est considéré comme un critère majeur pour concevoir des brise-lames et déterminer la configuration des armures du brise-lames en enrochement [20, 80, 154] [132]. Généralement, le taux de submersion moyenne est considéré comme un paramètre clé pour la conception du brise-lames crête [134]. La submersion a été étudiée aussi pour le transport des sédiments. Elle modifie les tendances de circulation et de transport des sédiments autour des structures [47]. Des modèles numériques de submersion des vagues à des structures côtières ont été développés [19]. Des bases de données sur des observations concernant la submersion ont été créés [147].

2.3.2 L'érosion et l'inondation

L'érosion et l'inondation deviennent des problèmes majeurs de l'ingénierie côtière en raison de leur grande influence sur la vie écologique et les questions environnementales [2, 79].

L'érosion est un phénomène qui a lieu à la côte qui subit des changements dans

le niveau de la mer et d'énergie. En plus, l'apport de sédiments et la topographie existante stimule l'érosion[36]. L'érosion peut être une retraite de littoral, un mouvement en deçà de la contour de profondeur zéro mètre ou une érosion descendante de la plage plus basse. [24].

Les inondations littorales se produisent en raison de la combinaison entre les grandes vagues et des niveaux d'eau élevés [101]. Le changement climatique favorise la montée du niveau de la mer et augmente le risque d'inondation. A cela s'ajoutent ainsi les changements induits par l'homme tel que le dragage, la bonification des terres et de la défense côtière qui ont une incidence sur le comportement naturel de la zone côtière et de l'évolution des risques d'inondation [8].

Deux approches sont utilisées pour prévenir l'érosion : les approches non structurales qui sont limitées au rechargement de la plage, et les approches structurales comme les revêtements, les digues et les brise-lames [44]. Les objectifs de ces structures de défense couvrent également la prévention des inondations [2, 25].

Un système du brise-lames multi-segments est proposé pour protéger le côté de l'érosion [18, 67, 161].

2.3.3 La Bathymétrie

La profondeur de l'eau en face d'un brise-lame est un paramètre majeur qui affecte le déferlement des vagues [88]. Ainsi une grande importance est donnée à ce paramètre. La profondeur d'eau affecte également le choix du type du brise-lames qui doivent être utilisés dans un lieu déterminé. En effet, la profondeur peut être l'un des principaux facteurs qui déterminent le coût de la structure [58]. Lorsque la profondeur de l'eau sur le site du brise-lames est importante, le coût de construction est plus élevé [74].

2.3.4 Le tirant de l'eau

La profondeur de l'eau a gagné d'importance pour la fonctionnalité des ports ou des voies navigables dès que des navires de tirant d'eau raisonnable ont été en existence [60, 135]. Voilà pourquoi une bonne compréhension de la dynamique des sédiments dans les écosystèmes marins et côtiers est un sujet d'intérêt clé pour la gestion du littoral [81], où la concentration de sédiments peut réduire la profondeur du port [159].

2.3.5 Le courant

Un courant d'océan est un déplacement d'eau de mer caractérisé par sa direction, sa vitesse et son débit. Il existe deux types de courants : les courants de surface et les courants profonds.

Les courants de surface sont provoqués majoritairement par les vents. Leurs schémas sont déterminés par la direction du vent, les forces de Coriolis de la rotation de la terre et la position des formes de terrain qui interagissent avec les courants. Les courants de surface éoliennes génèrent des courants de remontées en

conjonction avec les formes de terrain, ce qui crée des courants d'eau profonde. En plus, les courants profonds ont principalement pour origine les gradients de température et de salinité qui affectent la densité de l'eau.

Les chercheurs se sont intéressés à la compréhension de ce phénomène et de leurs influences sur les ports et les zones côtières.

Les courants profonds peuvent entraîner une déformation du fond de la mer due au transport des sédiments [160]. Le mouvement des courants autour de l'entrée des ports ainsi que l'influence de la disposition de l'entrée sur la mouvement du courant ont été étudiés [153]. L'effet des structures existantes ou l'introduction de nouvelles structures sur la qualité de l'eau à l'intérieur des ports, en raison de son influence sur le rinçage induit par le courant dans le port, a également été simulé numériquement [84].

2.4 Contraintes liées aux structures

Dans les contraintes structurelles à la fois les aspects économiques et le point de vue mécanique seront considérés durant la conception des zones portuaires et côtières.

2.4.1 Les contraintes économiques

Les contraintes économiques sont habituellement les principaux facteurs à considérer dans toute la modélisation des structures. L'outil de calcul du coût, le choix des matériaux et le processus de construction sont des éléments importants dans le calcul des coûts.

2.4.1.1 Le coût

Certains auteurs considèrent le coût de construction ou le coût total (la construction, l'entretien et les réparations) comme des critères de conception. Ils ont essayé de minimiser le coût sous différentes contraintes comme des contraintes géométriques [25] ou en travaillant sur la topologie pour minimiser le poids de la structure afin de réduire le coût [30, 49, 50, 51], ou même en choisissant des matériaux alternatifs [51].

2.4.1.2 La sélection des matériaux

Les structures de défense exigent d'énormes quantités de matériaux de construction [93]. Le coût des matériaux est un facteur clé du coût global des structures.

En outre, pour le choix des matériaux, il est très important de prendre en considération l'environnement chimique agressif qui mènera à de grands dommages en raison de la dégradation des matériaux [59]. Le matériau choisi doit être suffisamment solide et résiste à des conditions météorologique extrêmes y compris l'exposition aux glaces [21].

2.4.1.3 Le processus de construction

Le processus de construction est discuté afin de montrer l'importance d'utiliser la bonne méthode d'installation. La vitesse du processus d'installation a une grande influence sur la prise de décision lors de la conception d'un brise-lames pour protéger un port. La structure incomplète peut être plus exposée au risque de destruction si des conditions extrêmes se produisent en cours de la construction.

La flexibilité dans la construction et la possibilité de modifier ou de supprimer un brise-lames peuvent favoriser un certain type des brise-lames par rapport aux autres. Par conséquent, ces facteurs doivent être pris en considération par les ingénieurs côtiers [58].

La flexibilité, la mobilisation et la simplicité de l'installation et la possibilité de réutilisation sont tous de solides avantages des brise-lames flottants. Ce type des brise-lames peut être adopté pour différents formes et tailles de ports. Ils peuvent être construits plus rapidement et pour des coûts moins chers. [61, 106, 117].

2.4.2 Les contraintes mécaniques

Les contraintes mécaniques sont les considérations physiques liées à la structure ; sa dimension, sa position et sa capacité de résister les efforts.

2.4.2.1 Les sollicitations mécaniques

La résistance de la structure aux contraintes mécaniques, qui viennent des différentes forces en particulier celle des vagues, présentent une condition importante pour la conception de la structure [4, 49, 50, 51]. La pression des vagues est composée d'une pression hydrodynamique et une pression hydrostatique venant du poids de la hauteur d'eau qui agisse sur les différents côtés de la structure.

L'impact le plus important se produit au point de frappe de la pointe de crête de la vague au voisinage du niveau d'eau calme [49, 50, 51, 135]. D'autre part, une pression négative peut se produire en raison de l'expansion de l'air comprimé et emprisonnés entre les vagues et la structure au moment de l'impact [69].

En outre, le fatigue est une autre contrainte mécanique qui peut agir sur la structure en raison de la nature cyclique de la charge des vagues [59, 114]. Ce type de contrainte nécessite un modèle numérique multidisciplinaires pour le traiter.

2.4.2.2 La position

La position d'un brise-lames est discutée à partir de deux points de vue. La première est la valeur touristique du site. Il est donc conseillé de ne pas dépasser le 2.5 m au-dessus du niveau de l'eau [137].

L'autre point est la fonctionnalité. La longueur d'un brise-lames est déterminée par rapport à sa distance de la côte [67]. Cette distance est appelée dans les ports le dégagement du mur latéral. Il est considéré comme le principal facteur influant sur le montant de l'accumulation d'énergie dans le domaine clos qui produit l'effet

de résonance. La variation du dégagement peut dominer le problème de résonance [52, 53]. En plus, et comme mentionné précédemment, la position du brise-lames pourrait affecter le degré d'altération fonctionnelle produite par le phénomène de submersion sur le port [54].

En outre, l'écart entre deux brise-lames adjacentes doit être choisi avec soin. Il est déterminé en fonction de la longueur des vagues incidentes. Par exemple, si l'écart entre les deux brise-lames adjacentes est deux fois la longueur des vagues incidentes ou plus, le rivage derrière chaque brise-lames répond indépendamment comme si il n'y a aucune interaction entre les brise-lames [67].

2.4.2.3 La géométrie et les dimensions

Beaucoup des chercheurs [55, 64, 65, 99, 107, 108, 109, 116] ont essayé de trouver un moyen pour déterminer les dimensions d'une structure de défense d'une manière optimale.

La longueur de la structure de protection doit être plus grande que la longueur des vagues pour que la dispersion ait des répercussions importantes sur le littoral (Isebe et al., 2008). Dans les systèmes des brise-lames multiples, un rapport spécifique entre la longueur des brise-lames et l'écart entre eux doit être cherché et respecté [67].

Quant aux brise-lames flottants, la largeur doit être comprise entre une et deux fois la longueur des vagues pour être efficace [135]. Cette largeur est l'un des paramètres clé de la conception [118].

Par contre, la hauteur peut être limitée à l'endroit où la pression dynamique est efficace. A une profondeur considérée de la surface libre la pression devient approximativement invariable et relativement faible [49, 51].

La forme de la section est considérée aussi dans le dimensionnement du brise-lames flottant. Elle a des influences sur le poids, le coût, la résistance mécanique, la flottabilité et la stabilité [49, 51, 118].

2.4.2.4 La flottabilité et la stabilité

La flottabilité et la stabilité sont deux contraintes limitées à la conception de structures flottantes. L'état de flottabilité est simplement représenté comme une application du principe d'Archimède. L'objectif est d'être sûr que la structure ne coule pas quelles que soient les forces qui agissent sur elle. La différence entre la force de flottabilité et le poids doit être compensée par la tension dans les lignes d'amarrage qui tient la structure à sa place si elle est mise à une position plus bas de sa position d'équilibre libre.

La stabilité est connue comme étant la capacité d'une structure à revenir à sa position initiale d'équilibre après une perturbation. Cet état d'équilibre pourrait être obtenu en étudiant les moments de forces agissant sur les structures à chaque instant [49, 50, 51].

2.4.2.5 La réponse sismique

Les brise-lames sont soumis non seulement à l'action des vagues, mais aussi à d'autres types de chargement de l'environnement, tels que les tremblements de terre. La conception des structures côtières devrait prendre en compte les facteurs les plus pertinents dans chaque cas, y compris le chargement sismique. Les tremblements de terre peuvent imposer des efforts destructeurs sur les structures côtières [34, 98].

La réponse sismique des structures portuaires a été étudiée pour résister aux charges cycliques qui s'appliquent à ces derniers pendant un séisme. [33]. Un facteur de sécurité sismique est introduit pour les caractéristiques de conception des structures afin d'assurer sa capacité de résister aux tremblements de terre [98].

2.5 Besoins de manœuvrabilité

Le critère fondamental pris en considération lors de la définition et du dimensionnement du canal de navigation ou d'un bassin du port est la sécurité dans les manœuvres et les opérations portuaires.

En général, les accidents maritimes surviennent le plus souvent près des ports [73]. Le nombre croissant de collisions avec les navires, l'échouement d'un navire en résultant et l'immense coût du nettoyage d'un déversement de pétrole ont tous conduit à un effort important vers l'amélioration de la performance du navire dans la manœuvrabilité [155].

Par conséquent, de nombreux éléments doivent être étudiés pour définir correctement les différentes structures portuaires. Parmi ces éléments nous citons la configuration géométrique des structures et du fond marin, les différents paramètres du navire comme le type, la taille, l'âge et les conditions opérationnelles du port et des navires [31, 73, 131]. Ensuite, l'influence des conditions maritimes et atmosphériques extrêmes et des conditions environnementales sur l'architecture des structures et la manœuvre du navire doivent être évalués afin de définir ce qui est connu par les conditions normales de fonctionnement [122]. Même si les navires naviguent habituellement dans des vagues assez importantes mais la performance de manœuvre peut être sensiblement différente de celui d'un état calme [133]. Le manœuvrer en face de perturbation du vent est assez compliqué [111].

2.5.1 Contraintes d'architecture

Le bassin du port est l'endroit où un navire doit manœuvrer dans le but de faire son travail (navigation, stationnement et chargement / déchargement). C'est pour cela qu'une architecture adéquate de la zone maritime est tout à fait essentielle dans l'assurance d'une manœuvre en toute sécurité du navire. L'entrée du port est l'endroit où les navires entrent et sortent du port. Le canal de navigation dans le domaine du port est utilisé par les navires pour se déplacer à l'intérieur du port. Enfin l'aire de manœuvre est la surface nécessaire pour que les navires puissent s'arrêter et tourner.

2.5.1.1 L'entrée

L'entrée du port doit être conçue de manière à maintenir un état calme des vagues sur le site d'entrée [127]. Les facteurs suivants doivent être pris en compte :

1. L'intégration de l'entrée du port dans ses infrastructures et zones de flottaison.
2. Les densités de trafic de la navigation et les plus grands navires opérant dans le port.
3. L'énergie maximales des vagues entrant au port qui va perturber la zone de flottaison.
4. L'influence des conditions de l'environnement marin comme les vagues déferlantes et les courants transversales lourds.
5. La dynamique du littoral à l'entrée et autour des infrastructures du port.

En outre, l'entrée doit être de préférence aussi droite que possible pour éviter que les navires aient à changer de cap dans cette zone critique [122]. En plus les vagues incidentes qui se reflètent obliquement par le brise-lames pourraient augmenter l'agitation des vagues à l'entrée du port [86]. La position du brise-lames et sa dimension ne devrait pas avoir d'impact négatif sur la navigation dans le port, une largeur d'entrée suffisante doit être maintenue [54, 153]. Cette largeur peut être définie selon le type du port et de la taille des navires qu'y naviguent. Cette définition doit également tenir compte des conditions environnementales très variables. Afin de maintenir des conditions de sécurité de la navigation, les zones occupées par le navire doivent être suffisamment larges. Une largeur supplémentaire doit être ajoutée pour corriger l'effet des facteurs d'incertitude [96, 122]. Un canal d'approche à double brise-lames de garde est considéré comme forme courante pour l'entrée d'un port de mer. Il est utilisé pour maintenir la sécurité pendant la navigation des navires [153]. Le type du fond marin peut imposer des contraintes supplémentaires sur la conception des entrées de navigation du port. Sur les côtes sableuses, les jetées et les brise-lames stabilisent les canaux de navigation et protègent les navires de l'action défavorable des vagues. Le dragage périodique maintient le canal à la profondeur navigable nécessaire [76].

2.5.1.2 Le canal de navigation et les régions de manœuvre

La conception des canaux de navigation n'est pas très différente de la conception de l'entrée d'un port, et tous les facteurs mentionnés ci-dessus doivent être prise en considération. La distribution des vagues le long du canal dépend de son orientation, la pente du côté sa largeur et sa profondeur [157].

Une attention additionnelle doit être apportée aux autres paramètres, par exemple :

1. Le type de navigation planifiée en fonction du nombre de canaux disponibles.
2. La profondeur et les caractéristiques géométriques du canal.
3. La stabilité de la pente du canal.

4. L'évitement des alignements en S. Un canal doit être aussi droit que possible.
5. La réduction de l'effet de courant transversal. Le canal suit la direction des principaux courants.

L'aire de manœuvre exige également de prendre en compte ces facteurs qui dépendent des navires et du trafic. Il ne faut pas oublier l'espace nécessaire par les navires pour faire des virages et l'influence de la bathymétrie de cette zone [122]. Le problème de la réflexion des vagues sur le mur des structures doit également être pris en compte pour assurer une navigation en toute sécurité à proximité des brise-lames et à l'intérieur des ports [95, 99, 150].

La manœuvre dans les ports en pleine mer est aussi importante à être étudiée. La sécurité des navires est considérée en entrant et sortant du port et tout ancrage lors d'une tempête [130].

2.5.2 Contraintes liées aux navires

Les navires qui utilisent généralement le même port sont de différents types avec des dimensions et des caractéristiques de manœuvrabilité très différentes. Les paramètres les plus utilisés pour définir un navire sont le poids morts en tonnes (DWT : Dead Weight Tones), qui est le poids en tonnes métriques pour la charge maximale pouvant être effectuée par le navire, et le tonnage brut (GT : Gross Tonnage) du navire qui est le volume interne globale dans l'unité métrique et les tonneaux de jauge brute (GRT : Gross Registered Tons) qui est aussi le volume intérieur global mais mesurée en tonnes Moorsom ce qui équivaut à 100 pieds cubes.

Les principaux facteurs qui déterminent la façon dont un navire se comporte dans les eaux non ou peu profondes sont : les moyens de propulsion, le système de direction, la forme de la carène, le tirant d'eau, l'état de chargement et les restrictions de la masse d'eau dans laquelle un navire se déplace. En outre, les effets du vent, courants et vagues doivent être considérés.

Le vent doit être considéré dans les manœuvres, car il est presque toujours soufflant. Un vent lourd a une influence observable sur l'action du gouvernail et les hélices lorsque le navire se déplace en avant. Il modifie aussi les lois tournant en marche arrière.

Les courants augmentent la résistance des vaisseaux pour avancer ou bouger. Il y a une grande similitude entre l'effet du vent sur le corps supérieure et l'effet du courant sur le corps sous l'eau, mais la force résultante du dernier est beaucoup plus grande parce que la densité de l'eau est plus élevée que l'air.

Il est indispensable de prendre l'effet des vagues en considération lorsqu'un navire fait une manœuvre. Les mouvements de balancement causés par des axes longitudinaux et transversaux du navire en raison des vagues doivent être considérés. L'effet le plus important de ces mouvements est qu'ils augmentent la profondeur nécessaire pour qu'un navire navigue en toute sécurité. Selon le type, les dimensions et les conditions de chargement d'un navire, une période naturelle de tangage et de roulis pourrait être définie indépendamment des amplitudes. Si l'une de ces périodes naturelles coïncide avec la période apparente des vagues, des phénomènes

de résonance peuvent se produire. Dans ce cas, le mouvement de balancement du bateau va augmenter considérablement. Mais la période apparente des vagues est différente de la vraie période dans le cas d'un bateau en mouvement. Il est l'intervalle de temps entre deux crêtes successives qui passent par le même point du bateau.

De plus, l'écoulement de l'eau créé par le mouvement du navire affecte la navigation près de la côte ou de la banque. L'écoulement de l'eau autour de la coque perd son symétrie, donc une iniquité dans la distribution de la pression va se produire. Cela conduira à l'un des deux phénomènes ; le navire va dériver dans la direction de la rive ou de la banque si une aspiration transversale se produit, ou un mouvement de lacet va le séparer de la proue du navire à partir de la rive ou d'une banque si un moment sur l'axe vertical du navire traverse son centre de gravité. Ces deux effets seront plus importants si la paroi est verticale que si elle a une pente inclinée.

Enfin, un navire peut entrer en interaction avec d'autres navires. En approchant, la pression d'eau entre eux va essayer de séparer leurs arcs. Ils auront tendance à rester en parallèle quand ils passent par le travers [122].

2.6 Conclusion

Une conception optimale d'un port doit être soumise à toutes les contraintes précitées (Figure 2.3). Parfois, on peut éliminer une ou plusieurs de ces contraintes en fonction des considérations de cas (eg. dépendance entre plusieurs contraintes, négligence des contraintes ou même le non influence total d'une contrainte). Un problème global doit être suggéré dans le début de toute nouvelle étude et un processus d'élimination doit être appliqué pour déterminer les contraintes indispensables.

Ces contraintes peuvent représenter certains phénomènes qui exigent des modèles physiques pour simuler leurs influences. Ces modèles sont parfois des modèles hydrodynamiques et parfois non. Des modèles beaucoup plus compliqués en combinant plusieurs disciplines physiques ou scientifiques ont besoin d'être utilisés dans des cas spéciales. Certains phénomènes complexes ne disposent pas encore de modèle physique pour la simulation. Ces phénomènes ne peuvent pas être pris en considération dans le problème d'optimisation jusqu'à ce que des modèles appropriés soient établis. Les contraintes prises en compte et leurs types, auront une incidence sur l'effort de calcul nécessaire pour trouver la solution optimale dans un temps raisonnable. La limitation de cet effort nous guide parfois à simplifier le modèle même si certaines contraintes éliminées sont représentatives.

2.7 Résumé du chapitre

Ce chapitre a été un résumé de travaux de recherche sur le domaine d'aménagement portuaire. Parmi ces contraintes nous avons illustré notamment :

- Les contraintes liées à l'environnement.

- Les contraintes liées à la mécanique de fluide et surtout les vagues.
- Les contraintes économiques ou mécaniques liées aux structures.
- Les besoins de manœuvrabilité.

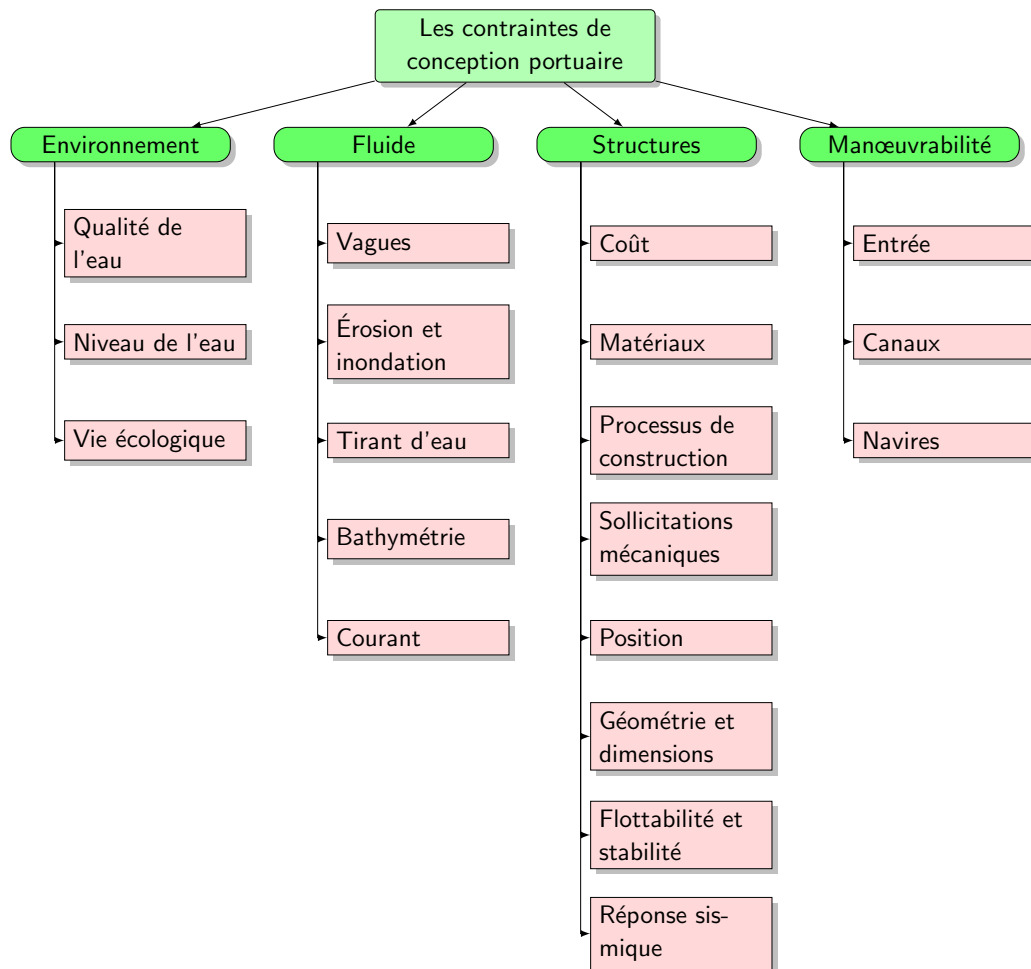


FIGURE 2.3 – Les contraintes de conception portuaire

Modélisation hydrodynamique

Sommaire

3.1	Introduction	47
3.2	La théorie du potentiel linéaire	49
3.3	Modèle de Berkhoff	50
3.3.1	Prise en compte des vagues aléatoires	52
3.3.2	Introduction des phénomènes de dissipation de l'énergie	53
3.4	Modèle des brise-lames flottants	55
3.5	Modèle 2.5D des brise-lames flottants	62
3.6	Simulation numérique	66
3.6.1	Éléments finis	67
3.6.2	Maillage	67
3.6.3	Conditions Limites	68
3.7	Validation de simulation numérique	71
3.7.1	Modèle de Berkhoff amélioré	72
3.7.2	Modèle dynamique des brise-lames flottants	78
3.8	Étude paramétrique du modèle 2.5D des brise-lames flottants	82
3.9	Résumé du chapitre	86

L'objectif principal de ce chapitre est de montrer les différents modèles hydrodynamiques utilisés dans cette thèse pour représenter le phénomène de la propagation des vagues dans les zones portuaires. Principalement nous détaillerons le modèle dit "2.5D" des brise-lames flottants établi pendant le travail de cette thèse.

3.1 Introduction

La construction de structures de défense comme les brise-lames et les brise-lames ont le rôle d'atténuer les vagues à l'intérieur du port. Le comportement du brise-lames est le résultat d'un problème d'interaction vagues-structure. Ainsi le modèle hydrodynamique représente le cœur problème. Le taux d'atténuation des vagues et les forces hydrodynamiques statiques ou dynamiques agissant sur la structure sont les contraintes principales de toute conception d'un brise-lame dans un projet côtier. De très nombreux chercheurs ont travaillé sur la mise et l'amélioration des théories de propagation des vagues pour simuler la distribution de la hauteur des vagues, la pression dynamique et les différents composantes du vecteur vitesse dans tout le domaine côtier.

Les théories fondamentales de propagation des vagues ont commencé à apparaître à la fin du XVII^{ème}. La propagation des vagues a d'abord été modélisée sans la considération de l'interaction avec le milieu. Les interactions linéaires et non linéaires décrivant les différents phénomènes naturels accompagnant la propagation des vagues dans les domaines maritimes ont été ensuite introduites. L'influence des variations topographiques artificielles comme la présence d'un brise-lame sur les caractéristiques de la propagation de la houle a été ajoutée également. L'apparition de différents modèles de propagation de vagues et leurs évolutions pendant les trois siècles précédents sont résumées dans des études et état de l'art menés par Craik [37], Darrigol [38] et Cavaleri et al. [26].

Afin de choisir une conception optimale des brise-lames avec un coût minimal dans un domaine où l'investissement est important, des modèles hydrodynamiques sophistiqués sont nécessaires. Ces modèles doivent tenir en compte le grand nombre de possibilités à tester et nécessitent donc un grand nombre de calculs. Néanmoins, les chercheurs choisissent souvent d'abandonner un grand nombre de phénomènes qui se produisent dans les océans et utilisent un modèle hydrodynamique plus léger afin de minimiser le temps de calcul.

Le modèle hydrodynamique choisi dépend bien sûr du type du brise-lame à construire. Un brise-lame fixe demande un modèle de propagation de vagues qui prend en compte les phénomènes de réflexion et diffraction des vagues. De plus, il doit considérer l'interaction avec le milieu naturel, comme par exemple le frottement au fond, le déferlement, l'aspect multifréquence ou multidirectionnel des vagues etc... Pour le brise-lames flottant, un modèle hydrodynamique dynamique doit être utilisé. Ce modèle doit prendre en compte le mouvement du brise-lames et son influence sur le milieu liquide qui l'entoure.

Comme dans tous les problèmes des modélisations, un modèle 3D est le plus adapté pour reproduire un comportement réaliste. L'impossibilité de calcul analytique et la difficulté numérique à résoudre un tel modèle nous conduit, parfois, à développer un modèle un peu moins représentatif.

Dans ce chapitre, on détaille les différents modèles hydrodynamiques utilisés dans cette thèse. Pour le brise-lames fixe, le modèle de Berkhoff [13] simple et connu sous l'appellation « mild-slope equation » et ses améliorations successives pour étendre sa validité pour tous les types de bathymétries [27] seront présentées. L'addition des phénomènes de frottement au fond [123], de déferlement [63] et de l'aspect multifréquence des vagues incidentes [66] sera, ensuite, expliquée. Un modèle dynamique des brise-lames flottants basé sur les concepts de masses additionnelles et de coefficients d'amortissement spécifiques [50] est présenté. Ces deux modèles sont basés sur la théorie du potentiel linéaire. Cela rend le couplage entre ces deux modèles plus simple, puisqu'ils peuvent être résolus avec le même outil numérique. Un modèle 2.5D couplant les deux modèles pour modéliser les brise-lames flottants dans un milieu côtier spécifique qui subit différentes phénomènes naturelles a été établi dans le travail de cette thèse et sera présenté dans ce chapitre.

3.2 La théorie du potentiel linéaire

En considérant que le fluide est parfait et homogène, et que la pression atmosphérique est constante sur toute la surface libre, et en supposant que le fond est imperméable et que le bilan de forces extérieurs agissant sur le fluide ne contient que la gravité, on peut appliquer la théorie de Stokes pour modéliser la propagation des vagues où la surface libre prend la forme d'une suite d'oscillations périodiques. Lorsque l'écoulement est considéré irrotationnel, ces oscillations peuvent être décrites par un potentiel des vitesses. En ajoutant que le milieu fluide est incompressible et non visqueux la théorie du potentiel linéaire s'applique dans le milieu fluide où un repère orthonormé (x, y, z) est défini. La surface libre est toujours dans le plan horizontal (x, y) représenté par l'équation $z = 0$. Le fluide occupe la zone de $-h < z < 0$ où p est la profondeur du milieu. Un champ de vitesse de la houle $\mathbf{u}$ est défini dans ce milieu par la relation de conservation de la masse comme suite :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.1)$$

L'écoulement a été considéré irrotationnel, on peut supposer l'existence d'un potentiel Φ tel que

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi \quad (3.2)$$

En combinant les équations (3.1 et 3.2) ensemble, on peut réécrire la relation de continuité sous la forme d'une équation de Laplace

$$\Delta \Phi = 0 \quad (3.3)$$

Une particule d'eau à la surface libre est fixe dans sa place, elle est toujours à la surface. La condition cinématique et dynamique de cette surface nous permet de définir l'équation limite de surface libre

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad \text{en } z = 0 \quad (3.4)$$

où :

g = Accélération gravitationnelle

t = Temps

Par contre, au fond la composante normale s'annule à cause de l'imperméabilité

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = -p \quad (3.5)$$

La solution de ce problème, en considérant que la surface libre a un mouvement périodique de pulsation ω et nombre d'onde k , est

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re} \left[\frac{\cosh(k(z + h))}{\cosh(kh)} \phi(x, y) e^{i\omega t} \right] \quad (3.6)$$

où :

ϕ = Potentiel des vitesses réduit bidimensionnel

Prenant en compte que le repère horizontale peut être toujours tourné jusqu'au que la vague se propage suivant x ou y seulement, on peut écrire le potentiel réduit en fonction de x :

$$\phi(x, y) = -i \frac{H_I g}{\omega} e^{-ik.x} \quad (3.7)$$

où :

H_I = Hauteur des vagues incidentes

La pulsation ω et le nombre d'onde k sont liés ensemble par la relation de dispersion suivante :

$$\frac{\omega^2}{gk} = \tanh(kp) \quad (3.8)$$

La pulsation peut être calculé à partir de la période T ,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.9)$$

La hauteur et la période d'une vague monochromatique sont présentées dans la figure 2.2.

3.3 Modèle de Berkhoff

L'équation de Berkhoff (3.10) connue « mild-slope equation » reste comme l'un des principaux modèles dans les problèmes d'ingénierie côtière pour calculer le potentiel de vitesse d'un champ de vagues.

Cette équation décrit un modèle de propagation des vagues de surface, qui se déplacent dans les eaux les moins profonds et interagissent avec des limites latérales telles que des falaises, plages, digues et brise-lames. L'amplitude de vagues, et l'amplitude des oscillations de la vitesse d'écoulement en dessous de la surface de l'eau peuvent être calculées. Ces amplitudes peuvent ensuite être utilisées pour déterminer les effets des vagues sur les structures côtières et offshore, des navires et autres objets flottants, le transport des sédiments et les changements géomorphologiques du lit de la mer et du littoral.

L'équation de Berkhoff a été introduite en 1972 [13]. Elle peut approximer le potentiel de vitesse dans l'état stationnaire en tout point (x, y) d'une région ayant une bathymétrie variable, elle est appelée par l'équation de pente douce, car elle était uniquement valable pour les bathymétries de décantation douce [13].

Elchahal et al. [54] ont utilisé le modèle de Berkhoff pour calculer le rapport d'atténuation des vagues due à la présence d'un brise-lames détaché. Pos and Kilner [121] ont calculé la diffraction causée par un gap entre deux brise-lames et Rojanakamthorn et al. [126] ont étudié l'influence d'un brise-lame submergé sur la propagation des vagues à l'aide de ce modèle. Beaucoup d'autres travaux qui utilisent cette équation peuvent être trouvés dans la littérature.

L'équation de Berkhoff est l'introduction du couplage de réfraction et diffraction qui sont les deux interactions les plus importants entre la houle et son milieu dans la théorie du potentiel linéaire [29].

La réfraction et la diffraction de la houle ont été étudiées d'une manière analogue à celles d'une onde lumineuse, et puisque le potentiel Φ vérifie l'équation de Laplace, le potentiel réduite $\phi(x, y)$ vérifie celle de Helmholtz

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + CC_g k^2 \phi = 0 \quad (3.10)$$

où :

C = Célérité de phase

C_g = Célérité de groupe

Les célérités C et C_g sont calculés alors en fonction de ω , k , et p comme ils les montrent les relations suivantes :

$$C = \frac{\omega}{k} \quad (3.11)$$

$$C_g = \frac{1 + 2kp}{2 \sinh(2kp)} C \quad (3.12)$$

La validité de cette équation a été généralisée pour représenter les différents types de bathymétries [100]. Celui-ci a été montré dans l'équation en ajoutant le terme ν (3.13).

$$\nu = F_1 (\nabla p)^2 + \frac{F_2}{k_0} \Delta p \quad (3.13)$$

où :

F_1 = Fonction de changement rapide de pente

F_2 = Fonction de changement rapide de courbure

k_0 = Nombre d'onde en profondeur infinie

L'équation devient alors :

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + (1 + \nu) CC_g k^2 \phi = 0 \quad (3.14)$$

Plusieurs expressions des fonctions de F_1 , décrivant le changement de pente, et F_2 , décrivant le changement de courbure, existent dans la littérature [27, 28, 100, 142]. Dans notre travail nous avons utilisé les expressions proposées par Chamberlain and Porter [27] comme il était recommandé par ARTEMIS [1] et Benoit [12].

$$F_1 = [(2kp)^4 + 4(2kp)^3 \sinh(2kp) - 9 \sinh(2kp) \sinh(4kp) + 6kp(2kp + 2 \sinh(2kp)) \cdot (\cosh^2(2kp) - 2 \cosh(2kp) + 3)] / \left[3 \left(1 + \frac{2kp}{\sinh(2kp)} \right) \cdot (2kp + \sinh(2kp))^3 \right] \quad (3.15)$$

$$F_2 = \frac{\sinh(2kp) - 2kp \cdot \cosh(2kp)}{2 \left(1 + \frac{2kp}{\sinh(2kp)} \right) \cdot \cosh^2(kp) \cdot (2kp + \sinh(2kp))} \quad (3.16)$$

3.3.1 Prise en compte des vagues aléatoires

Une vague causée par le vent dans l'océan ne sera jamais une vague monochromatique. Elle est une superposition de plusieurs vagues monochromatiques avec différentes périodes et décalages. Deux approches pour modéliser une vague aléatoire existent ; l'approche de domaine temporel et l'approche spectrale. Sachant que la solution de l'équation de Berkhoff est basée sur la relation de dispersion de fréquence, la seconde approche est utilisée. Pour résoudre l'équation avec une vague aléatoire incidente, le sens inverse est pris. La vague aléatoire est décomposée en nombre spécifique des vagues monochromatiques représentatives. La vague incidente est caractérisée par sa hauteur significative propre H_s et sa période de pointe T_p . Ces deux paramètres nous aident à créer une densité spectrale, comme par exemple le spectre de JONSWAP [68]. Puis la densité spectrale cumulative est calculée. Ensuite, la courbe est décomposée en parties égales d'énergie, et la période d'une vague monochromatique sera la période moyenne de sa partie. Les hauteurs des vagues seront presque les mêmes pour toutes les vagues monochromatiques. On prend, par exemple, le cas d'une houle multifréquence caractérisée par $[(H_s, T_p) = (1 \text{ m}, 10 \text{ s})]$. La figure 3.1 montre comment la houle est décomposée en 5 houles monochromatiques. Les caractéristiques de ces houles sont montrées dans le tableau 3.1.

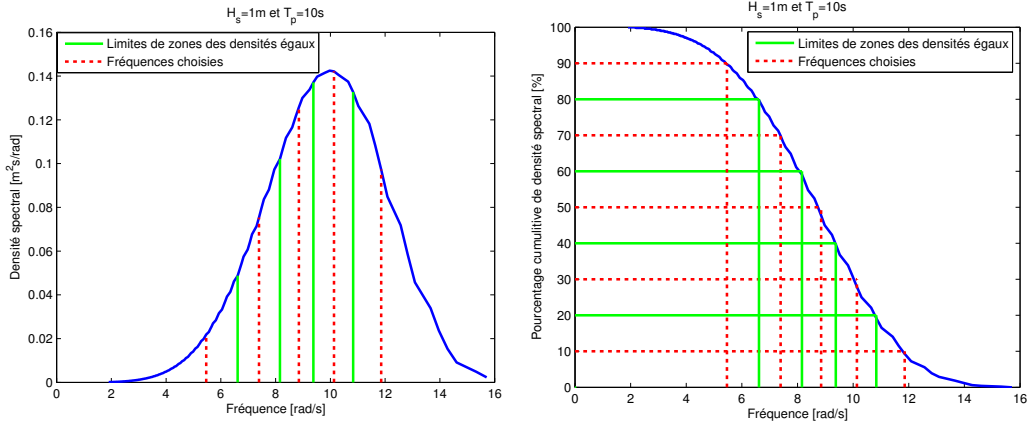


FIGURE 3.1 – Décomposition d'une houle multifréquences avec $H_s = 1 \text{ m}$ et $T_p = 10 \text{ s}$

Tableau 3.1 – Les caractéristiques de 5 vagues représentant une houle multifréquences avec $H_s = 1 \text{ m}$ et $T_p = 10 \text{ s}$

H_I [m]	0.30	0.32	0.31	0.33	0.32
T [s]	11.85	10.13	8.85	7.39	5.46

Sachant que l'énergie de chaque vague monochromatique incidente est le même, la hauteur énergétique totale à un point dans le domaine est la somme des hauteurs

des vagues monochromatiques qui le composent [66].

$$H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H_k^2} \quad (3.17)$$

où :

H = Hauteur des vagues

N = Nombre des vagues monochromatiques représentatives

H_k sont les hauteurs des vagues monochromatiques, et ils sont calculées à partir de la module de potentiel :

$$H_k = \frac{2\omega_k}{g} |\phi_k| \quad (3.18)$$

Notant que, dans le cas d'une vague aléatoire, les résultats sont en termes de hauteur énergétique, qui est combiné à partir de l'énergie des vagues monochromatiques. Cela signifie que nous ne disposons pas des informations plus complètes sur le potentiel de vitesse dans le champ de vagues, nous avons seulement le module du potentiel. Ceci signifie que nous ne pouvons pas calculer l'élévation de la surface dans le domaine à un instant t donné. L'élévation de surface η pour une vague monochromatique est donné par la relation suivante :

$$\eta_k = \frac{\omega_k}{g} \operatorname{Re}(i\phi_k) e^{i\omega_k t} \quad (3.19)$$

3.3.2 Introduction des phénomènes de dissipation de l'énergie

Afin de rendre l'équation physique le plus proche de la réalité, l'introduction des phénomènes de dissipation est nécessaire. Deux types d'effets dissipatifs ont été pris en compte; le déferlement bathymétrique et le frottement du fond. Une modification de « mild-slope equation » (3.14) est suggéré [63].

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + CC_g (k^2 (1 + \nu) + ik\mu) \phi = 0 \quad (3.20)$$

où :

μ = Coefficient de dissipation

3.3.2.1 Introduction des effets du frottement au fond

Selon la nature du fond, le frottement au fond pourrait avoir une grande influence sur l'énergie des vagues. Voilà pourquoi un facteur de frottement doit être ajouté pour décrire le type du fond. Plusieurs formules ont été proposées pour le coefficient de dissipation en fonction du facteur de frottement. Certaines d'entre elles sont plus simples à calculer que les autres [123].

$$\mu = \frac{2f_w H \omega^3}{3\pi g C_g \sinh^3(kp)} \quad (3.21)$$

où :

f_w = Facteur de frottement

Ce coefficient dépend directement de la hauteur des vagues qui sera dérivée du potentiel de vitesse résultant à travers l'équation (3.18). L'équation différentielle partiel n'est plus linéaire à cause de l'introduction de la dissipation, ceci crée plus de difficultés et des exigences de calcul.

3.3.2.2 Introduction des effets du déferlement

Le déferlement est un terme différent de dissipation d'énergie dans la propagation des vagues. Bien qu'il soit un terme non linéaire comme le frottement au fond, il est, en plus, non continu. Le déferlement des vagues se produit uniquement lorsque la vitesse d'une particule d'eau à la surface libre est supérieure à la vitesse de propagation des vagues. Une hauteur du déferlement critique H_m doit être calculée [102] pour connaître l'endroit où le déferlement se passe.

$$H_m = \frac{0.88}{k} \tanh \frac{0.8}{0.88} kp \quad (3.22)$$

où :

H_m = Hauteur de houle critique au point de déferlement

Le déferlement se produit lorsque H dépasse H_m . Pour une vagues aléatoire incidente la probabilité Q_b représente la chance que $H = H_m$ [10] et il est calculé à partir de la relation suivante :

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \quad (3.23)$$

où :

Q_b = Taux de déferlement

H_{rms} = Hauteur de houle quadratique moyenne

$$H_{rms} \approx \frac{H_s}{\sqrt{2}} \quad (3.24)$$

Le coefficient de dissipation est alors :

$$\mu = \frac{2Q_b}{T_p C_g} \left(\frac{H_m}{H_{rms}} \right)^2 \quad (3.25)$$

Dans le cas d'une vague monochromatique le taux de déferlement devient

$$Q_b = \begin{cases} 0, & \text{si } H \leq H_m, \\ 1, & \text{si } H > H_m. \end{cases} \quad (3.26)$$

En outre, le coefficient de dissipation μ devient

$$\mu = Q_b \frac{H\omega}{\pi C_g p} \quad (3.27)$$

Lorsque il y a plusieurs types de dissipation, le coefficient de dissipation sera la somme de tous les coefficients de dissipation des phénomènes auront lieu.

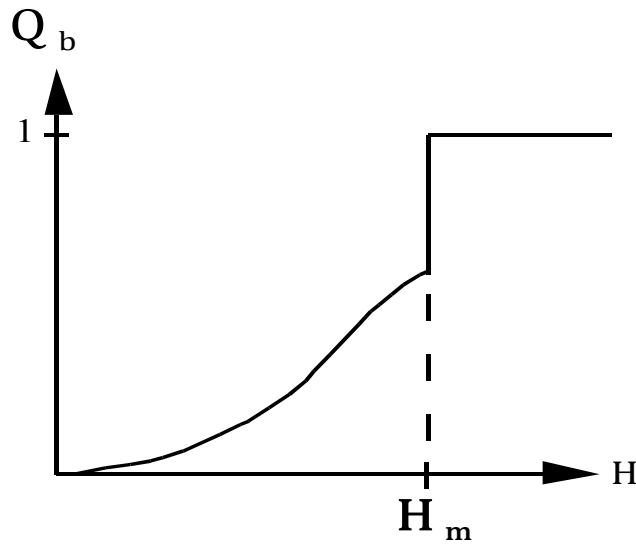


FIGURE 3.2 – Le taux de déferlement [1]

3.4 Modèle des brise-lames flottants

L'introduction du brise-lames flottant dans l'environnement maritime est principalement liée au mouvement des vagues de la mer. Ces vagues locales produisent les forces nécessaires qui mettront le brise-lames flottant en mouvement. Sachant que le brise-lames est utilisé, normalement, pour confronter les forces des vagues, la partie submergée du brise-lames, qui est la partie la plus grande du brise-lames flottant, est suffisamment profonde pour attraper le maximum des forces. Ainsi l'influence des forces des vagues sera grande sur le brise-lames flottant. Par conséquent un modèle dynamique sera indispensable pour modéliser les vagues du mer et le mouvement du brise-lames avec les vagues locales induites par ce mouvement en même temps. Un modèle dynamique a été élaboré par Elchahal et al. [50] où le comportement dynamique d'un corps flottant ressemble à un système masse-ressort. Il est affecté par la masse de la structure et les paramètres hydrodynamiques. L'importance des paramètres hydrodynamiques dépend de la fréquence du mouvement et les dimensions structurelles. La forme et les dimensions affectent le comportement structurel et sont les facteurs qui déterminent la performance du brise-lames flottant [48]. Autre phénomène physique qui intervient dans la modélisation du brise-lames flottant est l'ancrage de la structure qui est nécessaire pour la maintenir à l'endroit où il est censé être. Par conséquent, le système d'amarrage est un paramètre important qui détermine le comportement dynamique du système masse-ressort.

Par conséquent, ce modèle dynamique prend en compte les différents effets suivants :

- L'effet de diffraction représentant la réflexion de la houle sur le brise-lames.

- L'effet de radiation représentant les houles qui sont créés par les trois mouvements du brise-lames (balancement, pilonnement et roulis).
- L'effet de l'eau sur l'oscillation du brise-lames. Cela est considéré à travers des coefficients de masse et de frottement additionnels.
- L'effet des lignes d'ancrages sur le performance du brise-lames.

Le fluide a été considéré idéal et l'écoulement a été considéré irrotationnel, donc le théorie de vague linéaire est appliquée. La linéarisation de la potentiel de vitesse a permis de découpler le problème entre la diffraction et la radiation.

Le corps du brise-lames est supposé être rigide. Aucun échange d'énergie a lieu à travers la surface du fond ou la surface libre. L'énergie est gagnée ou perdue par le système uniquement à travers les vagues arrivant ou partant à l'infini ou en raison des forces externes agissant sur la brise-lames.

La propagation de vague dans un domaine bidimensionnel décrit par la théorie de vague linéaire est présentée par un potentiel de vitesse qui satisfait l'équation de Laplace (3.3).

$$\begin{aligned}\phi(x, z) &= \phi_D + \phi_R \\ \nabla^2 \phi(x, z) &= 0\end{aligned}\tag{3.28}$$

où :

ϕ_D = Potentiel de diffraction

ϕ_R = Potentiel de radiation

Le potentiel de diffraction ϕ_D (3.29) est la combinaison entre le potentiel incident ϕ_I et le potentiel dispersé ϕ_d .

$$\begin{aligned}\phi_D &= \phi_I + \phi_d \\ \nabla^2 \phi_D &= 0\end{aligned}\tag{3.29}$$

où :

ϕ_I = Potentiel incident

ϕ_d = Potentiel dispersé

sachant que le potentiel de vitesse incident est

$$\phi_I = -\frac{igH_I}{2\omega} \frac{\cosh(k(z+p))}{\cosh(kp)} e^{ikx}\tag{3.30}$$

Pour la radiation, c'est la somme de trois potentiels radiatifs correspondant au trois mouvements différents du brise-lames ; balancement, pilonnement et roulis.

$$\begin{aligned}\phi_R &= \sum_{j=1}^3 \phi_j \dot{\mathbf{q}}_j \\ \nabla^2 \phi_R &= 0\end{aligned}\tag{3.31}$$

où :

ϕ_j = Potentiel de radiation par unité de vitesse

$\dot{\mathbf{q}}_j$ = Le vecteur vitesse du corps

$j = 1, 2$ ou 3 pour balancement, pilonnement ou roulis

Afin de calculer ce potentiel, l'équation de mouvement du brise-lames doit être résolue. Ce qui permet d'étudier son comportement dynamique.

On considère que le brise-lames flottant ne génère pas des vagues induites qu'à cause de l'excitation subie par la propagation des vagues incidentes. Ces vagues vont mettre la structure en oscillation harmonique, alors elle doit commencer elle-même à générer des vagues dites induites. Les vagues induites se dirigent dans les deux sens, celui du port et celui de la mer également. Le mouvement du brise-lames dans l'eau est différent de l'oscillation d'un system mécanique dans l'air à cause de la présence de l'eau autour de la structure. L'interaction de la surface oscillante du brise-lames flottant avec les particules d'eau accélérées par cette oscillation est appelée la masse additionnelle Ψ . Cette force de réaction hydrodynamique ne dissipe pas l'énergie et se manifeste comme une vague stationnaire près de la surface du brise-lames. L'eau joue le rôle d'un amortisseur hydrodynamique. L'amortissement hydrodynamique Λ est liée à la quantité d'énergie des vagues induites par le brise-lames flottant sur les deux côtés de la structure. Parce que les vagues induites font dissiper l'énergie des mouvements du brise-lames ceci est la raison pour laquelle le mouvement meurt. Les composantes précédentes sont dépendantes de l'amplitude et de la fréquence du mouvement ; elles sont considérées comme des forces hydrodynamiques.

La position du brise-lames à chaque moment, indépendamment de son dynamique, provoque des forces dites hydrostatiques. Le principe d'Archimède définit un set des forces responsables de remettre la structure stable dans sa position d'équilibre après chaque changement dans le bilan des forces agissant sur le corps. La position du brise-lames détermine aussi la tension dans les câbles d'ancrages. Tous ces composantes entrent dans le calcul du vecteur de position du brise-lames $\mathbf{q}$ et ses dérivés comme montre la figure 3.3

$$[\mathbf{M} + \Psi]\ddot{\mathbf{q}} + \Lambda\dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K} + \Theta)\mathbf{q} = \mathbf{f}^e(t) \quad (3.32)$$

où :

$\mathbf{M}$ = Matrice de masse

Ψ = Matrice des coefficients de masses additionnelles

Λ = Matrice des coefficients d'amortissement hydrodynamique

$\mathbf{K}$ = Matrice de raideur

Θ = Matrice des forces de stabilité dans l'eau

$\mathbf{f}^e$ = Forces d'excitation.

Sachant que le brise-lames oscille à la même fréquence que celle de la vague incidente qui la met sous l'excitation de la force harmonique $\mathbf{f}_j^e(t) = \mathbf{f}_j^s e^{-i\omega t}$. $\mathbf{f}^s$ est le vecteur des amplitudes des forces. Le vecteur de position du brise-lames a la forme

$$\mathbf{q}_j(t) = \delta_j e^{-i\omega t} \quad (3.33)$$

où :

δ = Amplitude complexe du mouvement

En introduisant l'équation (3.33) dans (3.32) on obtient

$$[-\omega^2 (\mathbf{M} + \Psi(\omega)) - i\omega \mathbf{\Lambda}(\omega) + \mathbf{K} + \mathbf{\Theta}] \delta = \mathbf{f}^s(\omega) \quad (3.34)$$

Afin de trouver les différents composantes de l'équation (3.34) deux démarches vont

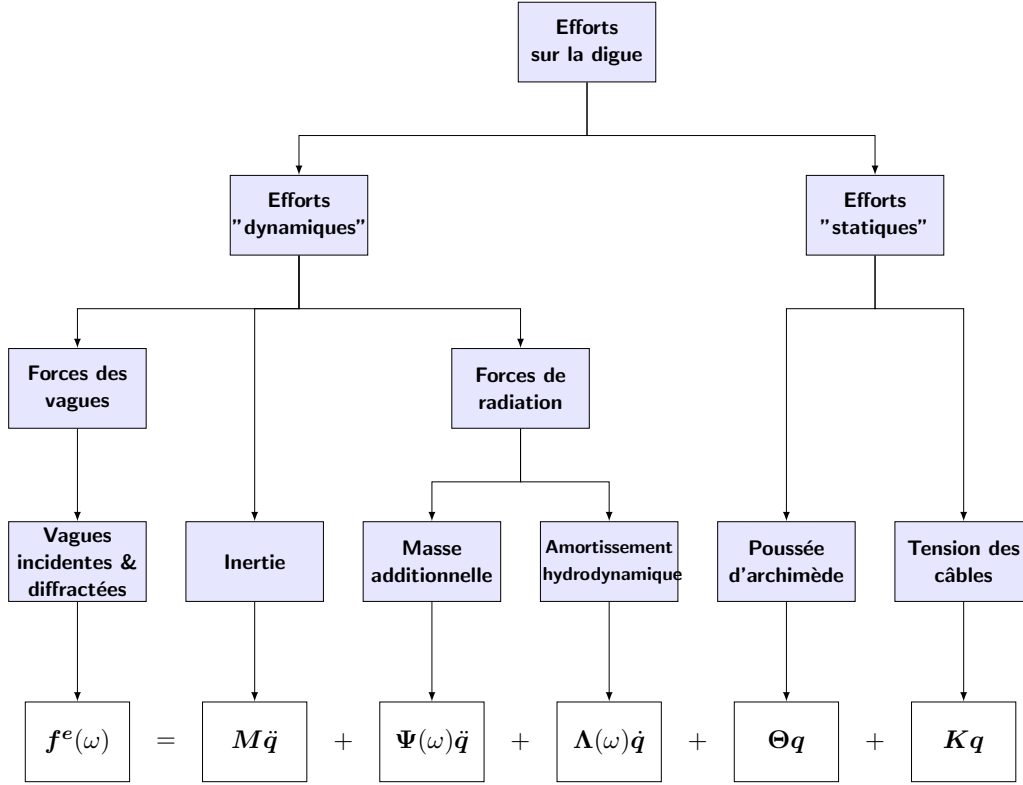


FIGURE 3.3 – Bilan des forces agissant sur le brise-lames flottant

être suivies. Les composantes hydrostatiques ($\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$ et $\mathbf{\Theta}$) sont calculées analytiquement. Par contre les composantes hydrodynamiques ($\mathbf{f}^s$, Ψ et $\mathbf{\Lambda}$) peuvent être calculées numériquement pendant la résolution de l'équation de Laplace (3.31).

Mécaniquement, il y a plusieurs méthodes à suivre pour résoudre le système de masse-ressort, le théorème de Lagrange est un de ces outils. Il est utilisé pour trouver $\mathbf{M}$ et $\mathbf{K}$ comme si le brise-lames oscille dans l'air. Le repère (xOz) (Figure 3.4) est fixe dans l'espace. Le vecteur de position est alors défini

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} x_G \\ z_G \\ \theta \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

où :

(x_G, z_G) = Les coordonnées du centre de gravité G

θ = l'angle de rotation du brise-lames autour du G

Les variations de x_G , z_G et θ représentent respectivement les mouvements de balancement, de pilonnement et de roulis.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_j} = 0 \quad (3.36)$$

avec la Lagrangien définie par

$$\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{V} \quad (3.37)$$

où :

$\mathcal{T}$ = Énergie cinétique du système

$\mathcal{V}$ = Énergie potentiel du système

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} \left(m \dot{x}_G^2 + m \dot{z}_G^2 + I \dot{\theta}_G^2 \right) \quad (3.38)$$

où :

m = Masse du corps

I = Inertie massique du corps au cas de roulis

$$\begin{aligned} \mathcal{V} = & \frac{1}{2} k_r \left(\sqrt{(x_{A_1} - x_{E_1})^2 + (z_{A_1} - z_{E_1})^2} - r \right)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_r \left(\sqrt{(x_{A_2} - x_{E_2})^2 + (z_{A_2} - z_{E_2})^2} - r \right)^2 - F_B \cdot z_G \end{aligned} \quad (3.39)$$

où :

A_1 et A_2 = Les contacts câbles-brise-lames

E_1 et E_2 = Les contacts câbles-fond

r = Longueur des câbles

F_B = La force de flottabilité nette

k_r = Raideur des câbles

Le brise-lames est supposée initialement stable dans sa position d'équilibre, et la tension des câbles est nulle à repos avant de subir d'excitation provoquant des mouvements qui changent sa position ($F_B = 0$). Du même, l'oscillation est considérée faible autour de la position d'équilibre ($\cos \theta \approx 1$ et $\sin \theta \approx 0$). Pour linéariser les équations, on définit le changement de variables :

$$x_G = x_{G_{eq}} + x_{G_v}, \quad z_G = z_{G_{eq}} + z_{G_v}, \quad \theta = \theta_{eq} + \theta_v = \theta_v$$

qui relie la position réelle avec la position d'équilibre (indice : eq) en fonction de la variation (indice : v).

Après le changement de variable, on substitue T et V dans l'équation (3.37) par leurs valeurs dans les équations (3.38 et 3.39). Puis on applique l'équation (3.36)

pour le vecteur $(x_{G_v} \ z_{G_v} \ \theta)$, tout en faisant attention que la linéarisation d'une équation de trois variables, comme le cas de T , s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned} f(x_G, z_G, \theta) = & f(x_{G_{eq}}, z_{G_{eq}}, \theta_{eq}) + x_{G_v} \frac{\partial f(x_{G_{eq}}, z_{G_{eq}}, \theta_{eq})}{\partial x_G} \\ & + z_{G_v} \frac{\partial f(x_{G_{eq}}, z_{G_{eq}}, \theta_{eq})}{\partial z_G} + \theta_v \frac{\partial f(x_{G_{eq}}, z_{G_{eq}}, \theta_{eq})}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (3.40)$$

A la fin on obtient trois équations différentielles d'ordre deux mais linéaires sous la forme $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_v + \mathbf{K}\mathbf{q}_v = 0$.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

avec :

$$\begin{aligned} K_{11} = & k_r \left[2 + rP^{-3/2}a - rP^{1/2} + rQ^{3/2}b^2 - rQ^{-1/2} \right] \\ K_{12} = & k_r \left[rP^{-3/2}ac + rQ^{-3/2}bd \right] \\ K_{13} = & k_r \left[z_{A_2} + rP^{-3/2} (z_{A_2}a^2 - x_{A_2}ac) - rP^{-1/2}z_{A_2} + z_{A_1} - rz_{A_1}Q^{-1/2} \right. \\ & \left. + rQ^{-3/2} (z_{A_1}b^2 - x_{A_1}bd) \right] \\ K_{21} = & K_{12} \\ K_{22} = & k_r \left[2 + rP^{-3/2}c^2 + rP^{-1/2} + rQ^{-3/2}d^2 + rQ^{-1/2} \right] \\ K_{23} = & k_r \left[x_{A_2} + rP^{-3/2} (x_{A_2}c^2 - z_{A_2}ac) - rP^{-1/2}x_{A_2} + x_{A_1} - rx_{A_1}Q^{-1/2} \right. \\ & \left. + rQ^{-3/2} (x_{A_1}d^2 - z_{A_1}bd) \right] \\ K_{31} = & K_{13} \\ K_{32} = & K_{23} \\ K_{33} = & k_r \left[x_{A_2}^2 - z_{A_2}c + rP^{-3/2} (z_{A_2}a - x_{A_2}c)^2 - rP^{-1/2} (z_{A_2}^2 - x_{A_2}a + x_{A_2}^2 - z_{A_2}c) \right. \\ & + x_{A_1}^2 - z_{A_1}d + z_{A_2}^2 - x_{A_2}a + z_{A_1}^2 - x_{A_1}b + rQ^{-3/2} (z_{A_1}b - x_{A_1}d)^2 \\ & \left. - rQ^{-1/2} (z_{A_1}^2 - x_{A_1}b + x_{A_1}^2 - z_{A_1}d) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a = & x_{G_{eq}} + x_{A_2} - x_{E_2} & c = & z_{G_{eq}} + z_{A_2} - z_{E_2} & P = & a^2 + c^2 \\ b = & x_{G_{eq}} + x_{A_1} - x_{E_1} & d = & z_{G_{eq}} + z_{A_1} - z_{E_1} & Q = & b^2 + d^2 \end{aligned}$$

Les points E_1 et E_2 sont fixes dans l'espace, avec

$$\begin{aligned} z_{E_1} &= z_{E_2} = -p \\ x_{E_1} &= -\frac{l}{2} - r \sin \beta \\ x_{E_2} &= \frac{l}{2} + r \sin \beta \end{aligned} \quad (3.43)$$

où :

β = L'angle des câbles avec le vertical

L'effet de la stabilité dans l'eau est introduit par la matrice Θ

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Theta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Theta_{33} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Cependant, et comme montre la figure 3.4, pour le balancement qui est une translation horizontale dans la direction de x , il n'y a pas d'influence, alors

$$\Theta_{11} = 0, \quad (3.45)$$

tandis que pour le pilonnement où le mouvement est une translation verticale du brise-lames en oscillant, l'effet est égal au poids de l'eau déplacé à cause du mouvement

$$\Theta_{22} = \rho_e g l, \quad (3.46)$$

où :

l = Largeur du brise-lames flottant

Finalement pour le roulis, la hauteur métacentrique transversal GM nous permet de calculé cette influence

$$\Theta_{33} = \rho_e g l h GM \quad (3.47)$$

où :

h = Hauteur totale du brise-lames flottant

$$\begin{aligned} GM &= BM - BG \\ BG &= OG - \frac{h_r}{2} \\ BM &= \frac{l^2}{12h_r} \end{aligned} \quad (3.48)$$

où :

h_r = Hauteur submergée du brise-lames flottant

B = Centre de carène.

En outre, les forces hydrodynamiques sont calculées numériquement, par intégration des potentiels le long de la frontière mouillée de la structure Γ_0 . Les coefficients de masses additionnelles Ψ et d'amortissement spécifique Λ sont ajoutés pour gérer l'effet de l'eau entourant la structure et qui joue le rôle d'amortisseur hydrodynamique.

$$\begin{aligned}\Psi &= \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} & \Psi_{13} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} & \Psi_{23} \\ \Psi_{31} & \Psi_{32} & \Psi_{33} \end{bmatrix} \\ \Lambda &= \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} \\ \Lambda_{31} & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{3.49}$$

avec

$$\begin{aligned}\Psi_{jk} &= \rho_e Re \left[\int_{\Gamma_0} \phi_k \mathbf{n}_j d\Gamma \right] \\ \Lambda_{jk} &= \rho_e \omega Im \left[\int_{\Gamma_0} \phi_k \mathbf{n}_j d\Gamma \right]\end{aligned}\tag{3.50}$$

où :

ρ_e = Masse volumique de l'eau de mer

Γ_0 = La frontière mouillée du corps

avec, $\mathbf{n}_j$ les composantes du vecteur normal unitaire à la surface du structure dirigeant vers l'intérieur du domaine. n_1 et n_2 sont respectivement les composant en x et z , tandis que en θ le vecteur normal unitaire est :

$$n_3 = (x - x_G) n_2 - (z - z_G) n_1\tag{3.51}$$

Les forces d'excitation $\mathbf{f}^s$ viennent de la houle incidente, et mettent la structure en oscillation. Elles sont reliées au potentiel incident (3.30) et au potentiel de diffraction (3.29).

$$\mathbf{f}_j^s = i\omega\rho_e \int_{\Gamma_0} (\phi_I + \phi_d) \mathbf{n}_j d\Gamma\tag{3.52}$$

Après avoir calculé toutes les forces hydrodynamiques et hydrostatiques, l'équation (3.34) peut être réécrite

$$\boldsymbol{\delta} = [-\omega^2 (\mathbf{M} + \Psi(\omega)) - i\omega\Lambda(\omega) + \mathbf{K} + \Theta]^{-1} \cdot \mathbf{f}^s(\omega)\tag{3.53}$$

L'équation du mouvement de trois degrés de liberté en fonction du temps est alors calculée en remplaçant le vecteur $\boldsymbol{\delta}$ par sa valeur dans l'équation (3.33).

3.5 Modèle 2.5D des brise-lames flottants

Dans ce travail de thèse, on a essentiellement essayé d'introduire un modèle hydrodynamique pour les brise-lames flottants qui permet de prendre en compte le plus grand nombre de phénomènes physiques maritimes possibles. Nous cherchions

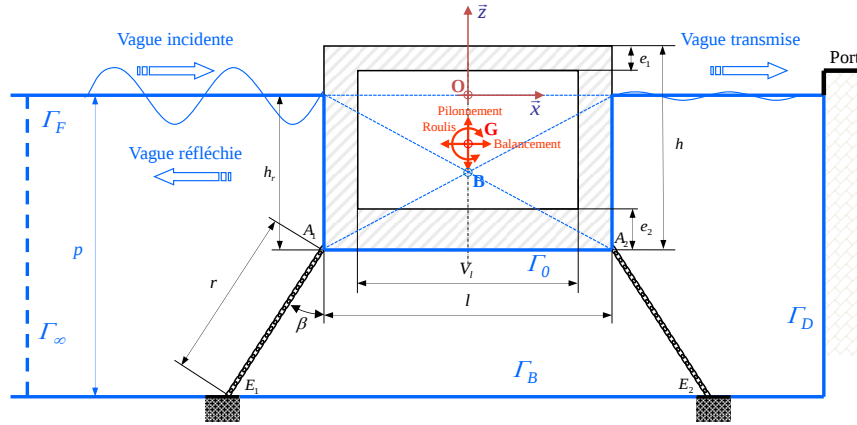


FIGURE 3.4 – Représentation du brise-lames flottant [50](Avec modifications)

un modèle simple à résoudre numériquement, où tous ces composantes peuvent être représentées et résolues par le même démarche numérique, avec un temps de calcul raisonnable. Ce modèle sera ensuite utilisé dans les problèmes de l'optimisation afin de définir un outil d'aide à la décision pour la conception des brise-lames flottants dans les domaines portuaires complexe.

Le fait que les deux modèles précédemment représentés dans les sections 3.3 et 3.4 sont tous les deux basés sur la théorie du potentiel de vitesse rend les conditions de simplicité et de l'homogénéité de résolution satisfaisantes. Ils peuvent être résolus par le même outil numérique, tout en soulignant en plus la simplicité à résoudre un problème du potentiel par rapport aux autres modèles et surtout la possibilité de définir des conditions limites mixtes qui peuvent prendre en compte l'effet de réflexion et de l'incidence induite sur le brise-lames en même temps, ou l'incidence et la radiation du côté de la mer.

Ce modèle prend les effets de propagation de vagues dans les plans horizontal et vertical et de nombreuses interactions avec le milieu et la structure d'une façon tri-dimensionnelle sans être obligé de résoudre les équations dans le 3D. Il traite les différents effets chacun dans son plan d'une manière bidimensionnelle puis il les combine pour avoir une approximation de la performance en 3D. Nous nommons ce modèle le modèle 2.5D des brise-lames flottants.

La méthode proposée consiste (Figures 3.5) est un processus en trois étapes :

- **Étape 1 :** Un calcul de potentiel de vitesse de champ des vagues dans le plan horizontal du port est effectué à partir des caractéristiques des vagues incidentes (H_I, T) dans une configuration présentée dans la figure 3.6a. Cette étape nous permet de calculer la vague d'excitation du brise-lame flottant et après de prendre en compte toutes les interactions avec le milieu naturel et artificiel traitées par le modèle de Berkhoff amélioré. Dans ce calcul le brise-lames est considérée comme absorbant l'énergie des vagues car la valeur qui nous intéresse est la hauteur des vagues juste devant le brise-lames après

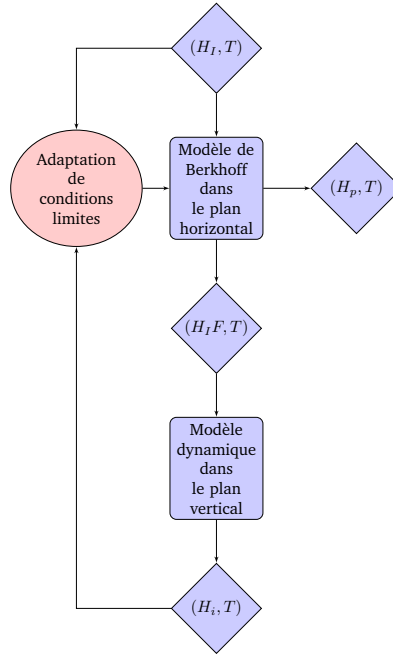


FIGURE 3.5 – Les étapes du modèle 2.5D des brise-lames flottants

l'interaction avec le milieu mais pas avec le brise-lames lui-même.

- **Etape 2 :** Un calcul dynamique dans le plan vertical (Figure 3.6b) va nous permettre d'étudier la performance de ce brise-lames soumis à l'excitation de la houle calculée dans l'étape 1. Ce calcul détermine l'amplitude des vagues induites H_i qui vont être générées par les mouvements du brise-lames uniquement.

$$H_i = \frac{2\omega}{g} |\phi_R|, \quad (3.54)$$

où ϕ_R est le potentiel de radiation induit par la somme de tous les mouvement du brise-lames, et calculé dans l'équation (3.31).

Il est à noter que la période des vagues reste toujours la même et ne subit pas de modification.

- **Etape 3 :** La dernière étape est l'étape de superposition les deux résultats précédents. La figure 3.6c montre comment les conditions limites sur le paroi du brise-lames s'adaptent pour simuler la performance de cette paroi. Le brise-lames flottant est bien une paroi solide qui reflète les vagues incidentes mais il est aussi une source des vagues induites dans tous les directions à cause de son mouvement. L'effet de création des vagues induites par les côtés courts du brise-lames est négligé.

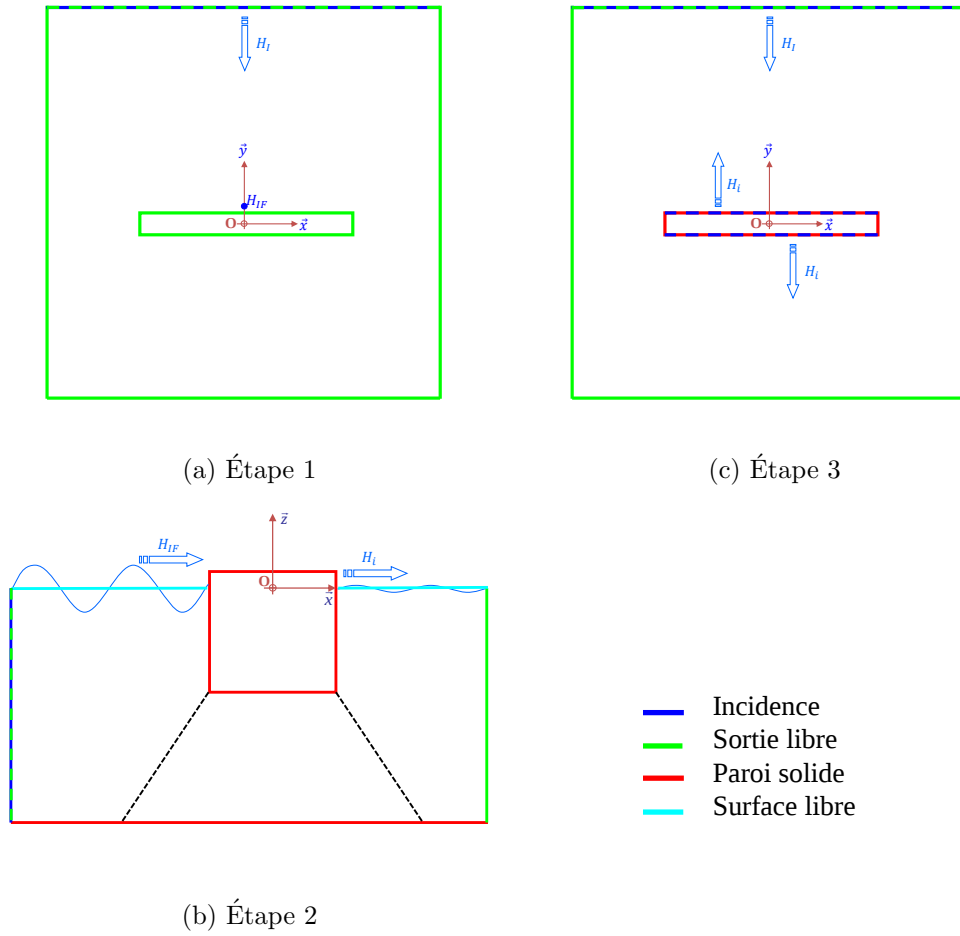


FIGURE 3.6 – Les représentations des étape du modèle 2.5D des brise-lames flottants.

Il faut reconnaître que la combinaison de deux modèles produit un cumul des hypothèses à prendre en compte pour résoudre le problème. Les hypothèses de la théorie de potentiel de vitesse, puis de Berkhoff et du modèle hydrodynamique sont toutes prises en compte. Elles se résument en :

1. Le fluide est parfait.
2. Le fluide est homogène.
3. La pression atmosphérique sur la surface libre est constante.
4. Le fond est imperméable.
5. La gravité est la seule force extérieure agissant sur la propagation des vagues.
6. L'écoulement est irrotationnel.
7. Le milieu fluide est incompressible.
8. Le milieu fluide est non visqueux.

9. Les particules de l'eau ne se déplace pas à la surface.
10. Le corps du brise-lames est rigide.
11. Aucun échange d'énergie n'a lieu à travers la surface du fond ou la surface libre.
12. Le brise-lames flottant génère des vagues induites seulement à cause de l'excitation des vagues incidentes.
13. Le brise-lames flottant est initialement stable dans sa position d'équilibre et la tension des câbles est nulle.
14. L'oscillation est faible et autour de la position d'équilibre.
15. Les vagues induites par les côtés courts du brise-lames sont négligeable.

Malgré ce grand nombre d'hypothèses, ce modèle se justifie de part le nombre de phénomènes et d'interactions qu'il peut introduire dans l'outil de conceptions des brise-lames flottants. Ces phénomènes sont donnés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Liste de phénomènes pris en compte dans le modèle 2.5D des brise-lames flottants.

	Berkhoff	Modèle Dynamique	2.5D
Diffraction	✓	✓	✓
Réflexion	✓	✓	✓
Variation des bathymétrie	✓	•	✓
Frottement au fond	✓	•	✓
Déferlement	✓	•	✓
Vagues induites	•	✓	✓
Vagues aléatoires	✓	•	✓
Hauteur fini	•	✓	✓
Largeur fini	✓	•	✓

La définition des conditions limites mixtes concernant le paroi du brise-lames sera présentée dans la section suivante en décrivant les composantes de la simulation numérique.

3.6 Simulation numérique

L'équation de Laplace est considérée comme une forme particulière de l'équation elliptique. Cette équation a été utilisée pour présenter les deux modèles de base précédents. Les modèles sont résolus numériquement par éléments finis en utilisant la boîte à outils « PDE : équations aux dérivées partielles » de MATLABTM. Il faut alors créer deux maillages bidimensionnels du domaine. Un maillage dans le plan horizontal pour la résolution de « mild-slope equation » et un maillage dans le plan vertical pour le comportement dynamique du brise-lames flottant. Les différentes conditions limites doivent être représentées sous la forme de conditions de Newman ou de Dirichlet.

3.6.1 Éléments finis

L'équation elliptique a la forme générale :

$$-\nabla \cdot (c_e \nabla u_e) + a_e u_e = f_e \quad (3.55)$$

La solution inconnue u_e et les coefficients c_e, a_e et f_e sont tous des fonctions complexes définies dans le domaine Ω borné par des équations des conditions limites reliant u_e à ses dérivés normales sur la frontière. Les coefficients peuvent être indépendants de u_e , dans ce cas l'équation devient linéaire, dans le cas contraire elle est une équation non linéaire.

Les PDEs ont normalement beaucoup des solutions qui les satisfont mais la complexité de la géométrie complique la recherche d'une solution convenables. Par conséquent, pour trouver une approximation de la solution d'une équation aux dérivées partielles elliptiques il faut suivre les étapes suivantes :

1. Décrire la géométrie de Ω et les conditions limites.
2. Créer un maillage triangulaire sur le domaine Ω
3. Discrétiser les équations aux dérivées partielles et les conditions limites à fin d'obtenir un système linéaire $K_e u_e = F_e$ sur les centres ou les nœuds des éléments triangulaires du maillage.

Ce schéma est suivi par l'outil « PDE » du MATLABTM. En se référant aux sections 3.3 et 3.4, on peut distinguer les différents valeurs des coefficients définissant les équations elliptiques à résoudre. Ces coefficients sont présentés dans le tableau 3.3

Tableau 3.3 – Les coefficients des équations elliptiques

	c_e	a_e	f_e
Le modèle de Berkhoff	CC_g	$CC_g(k^2(1 + \nu) + ik\mu)$	0
Le modèle dynamique	1	0	0

3.6.2 Maillage

Le maillage a été généré avec l'outil PDE de MATLABTM. Deux maillages pour chaque problème ont été créés, un pour le plan horizontal (Figure 3.7a) et l'autre pour le plan vertical (Figure 3.7b).

La boîte d'outil de MATLABTM propose deux manières pour faire une maillage. Soit un maillage régulier où le raffinement est appliqué dans tout le domaine d'une manière proportionnelle. Ce type de maillage sera fait avant de résoudre l'équation elliptique. Soit un maillage adaptatif qui sera fait en même temps avec la résolution de l'équation. En se basant sur le gradient du potentiel, ce dernier permet de raffiner seulement dans les zones où le raffinement va changer dans les valeurs du potentiel d'une manière plus importante. Il permet de rattraper des détails plus fins sans être obligé de consommer la mémoire et perdre le temps avec un calcul exceptionnellement long.

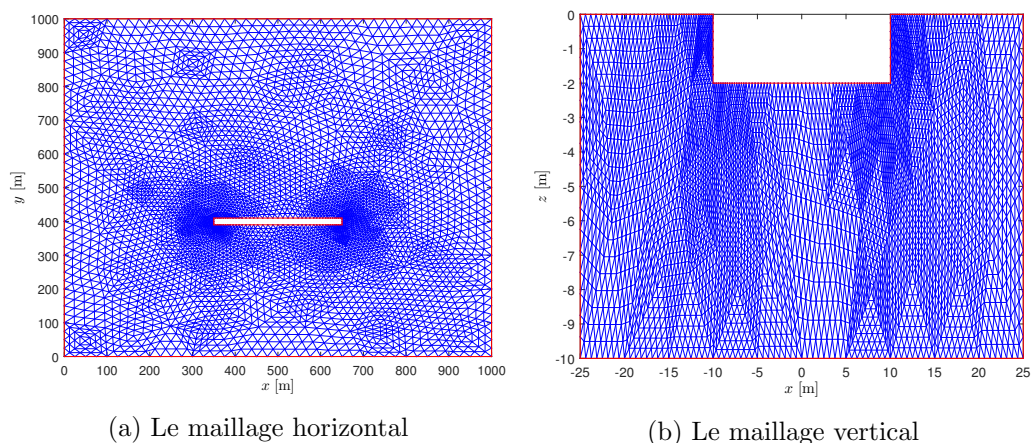


FIGURE 3.7 – Les maillages du domaine

La figure 3.8 montre la différence entre les deux outils de maillages pour mailler un brise-lames qui a une forme de surface spécifique. Le nombre des nœuds et des éléments triangulaires dans le domaine est résumé dans le tableau 3.4.

La solution par maillage adaptatif de ce problème a montré l'influence du type

Tableau 3.4 – Les paramètres des maillages

	Nb. des nœuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
Le maillage régulier	2988	5708	0.16
Le maillage régulier raffiné	5170	10000	0.295
Le maillage adaptatif	2612	5003	0.146

de surface du brise-lames sur son performance (Figure 3.9). La quantité des vagues réfléchit est moins important dans le cas du brise-lames à surface zigzagüée. Les deux figures 3.8 et 3.9 ensemble montrent l'importance d'avoir un maillage de bonne qualité.

3.6.3 Conditions Limites

Ils existent trois types des conditions aux limites qui peuvent venir avec l'équation elliptique ; Dirichlet (3.56), Neumann (3.57) ou mixte entre les deux.

$$h_e \cdot u_e = r_e \quad \text{sur } \partial\Omega, \quad (3.56)$$

$$\mathbf{n} \cdot (c_e \nabla u_e) + q_e u_e = g_e \quad \text{sur } \partial\Omega, \quad (3.57)$$

Dans notre cas tous les conditions aux limites sont définies par le type Neumann. Une limite (Figure 3.10) pourrait être une limite incidente (3.60), une limite de rayonnement (3.59) ou une limite de réflexion partielle ou totale (3.58).

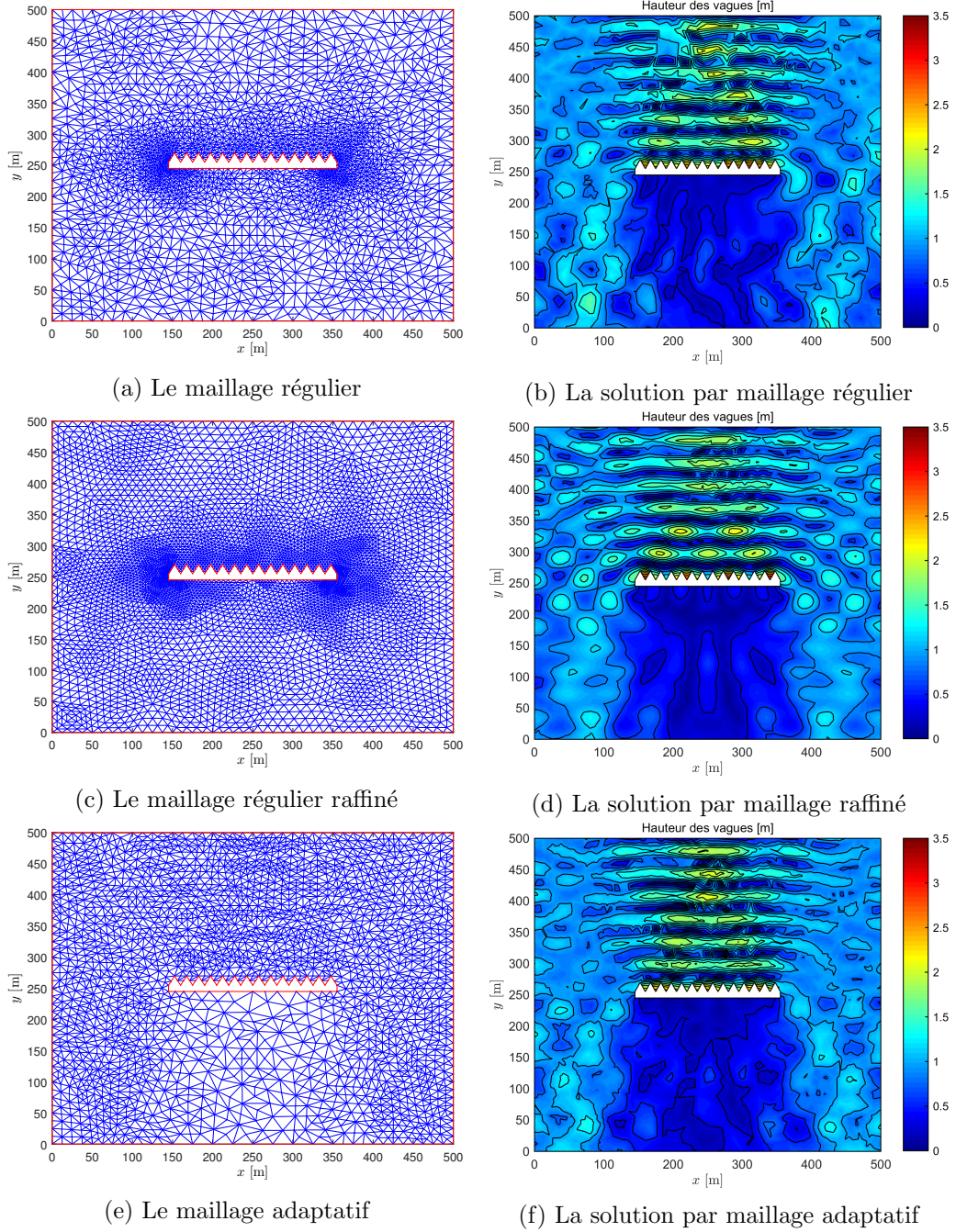


FIGURE 3.8 – Les différents maillages et leurs résultats

La frontière de réflexion (Figure 3.10) est définie par l'équation de condition limite

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} - i \frac{1 - Re^{i\alpha}}{1 + Re^{i\alpha}} k \cos \theta_p \phi = 0 \quad (3.58)$$

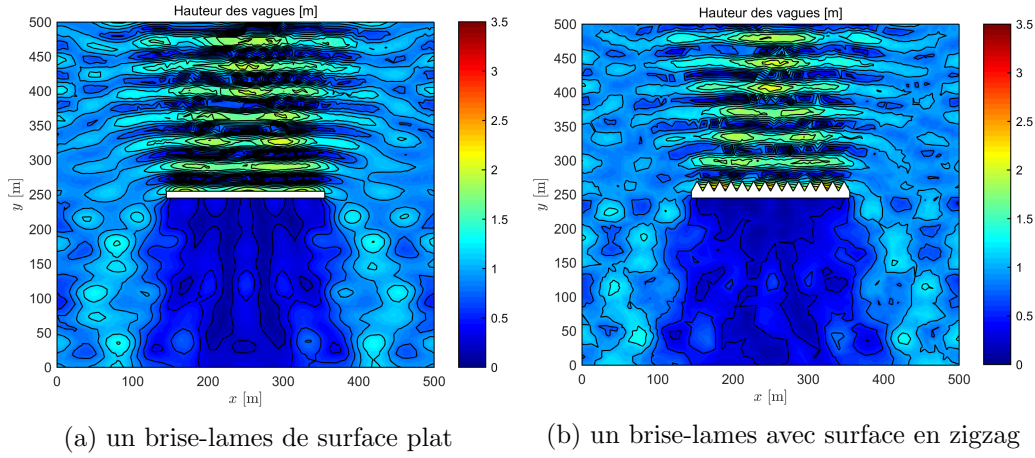


FIGURE 3.9 – L'influence du type de surface du brise-lames

où :

$\mathbf{n}$ = Le vecteur unitaire normal sortant de la frontière

θ_p = L'angle entre $\mathbf{n}$ et le normal à la vague

R = le coefficient de réflexion

α = le délai

Le valeur de R détermine si les vagues subissent une réflexion total $R = 1$ ou partielle $0 < R < 1$. ce type de frontière a une importance spécifique pour simuler les brise-lames selon leurs natures de constructions et les matériaux utilisés.

Pour $R = 0$ on est dans le cas d'une frontière totalement absorbant. cette frontière est nommée limite de rayonnement ou sortie libre.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} - ik \cos \theta_p \phi = 0 \quad (3.59)$$

Une frontière incidente n'est jamais une frontière ouverte dans un seul sens seulement, elle est mixte à la fois incidence entrante et rayonnement sortante pour les vagues réfléchies.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} - ik \cos \theta_p \phi = \frac{\partial \gamma}{\partial \mathbf{n}} - ik \cos \theta_p \gamma \quad (3.60)$$

où :

γ = Le potentiel imposé.

Si le modèle à résoudre est dans le plan horizontal (Figure 3.10) γ est trouvé à partir de l'équation (3.7) et si c'est le cas du plan vertical (Figure 3.6b) on le trouve à partir de l'équation (3.6).

Une autre frontière mixte est définie pour représenter un brise-lames flottant dans le plan horizontal (Figure 3.6b). Il s'agit d'une frontière incidente et réfléchi en même temps.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} - i \frac{1 - Re^{i\alpha}}{1 + Re^{i\alpha}} k \cos \theta_p \phi = \frac{\partial \gamma}{\partial \mathbf{n}} - ik \cos \theta_p \gamma \quad (3.61)$$

Par conséquent, les frontières du brise-lames peuvent être dans le plan horizontal une frontière de réflexion (3.58) quand on résout Berkhoff simple comme l'étape 1 du modèle 2.5D des brise-lames flottants. Ils peuvent être également une frontière mixte incident-réflexion pour résoudre l'étape 3 du modèle.

Quant au plan vertical, les frontières du brise-lames prennent la valeur de réflexion en traitant le problème de diffraction dans le modèle dynamique des brise-lames flottants. Tandis que ces frontières prennent des équations différentes dans les problèmes de radiations :

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{n}_j \quad (3.62)$$

Un dernier type des conditions limites utilisées dans notre travail est la condition limite sur la surface libre dans le plan vertical (Figure 3.6b).

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \quad (3.63)$$

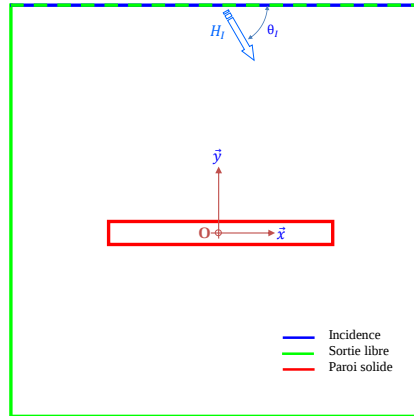


FIGURE 3.10 – Les conditions limites pour le modèle de Berkhoff

3.7 Validation de simulation numérique

On a essayé de valider notre solution numérique après chaque étape. Ce travail a été effectué en faisant la simulation sur des conditions de cas étudié avant dans des travaux de recherches antérieures, et comparant nos résultats à eux. L'idée de ces validations est d'être sûr que notre modèle 2.5D des brise-lames flottants est composé de deux sous modèles validés et que leurs solutions numériques sont fiables. Les solutions numériques obtenues par l'outil PDE de MATLABTM ont été calculées sur une machine core i5-3210M CPU @ 2.50GHz 6GB RAM.

3.7.1 Modèle de Berkhoff amélioré

Les validations du modèle de Berkhoff et ses améliorations, présentées dans la section 3.3, sont effectuées à l'aide de cas de validation du ARTEMIS [1]. On a comparé nos résultats aux résultats du logiciel et les expériences des références utilisées pour le valider.

Le modèle de base a été validé par les deux phénomènes essentiels qui ont lieu ; la diffraction et la réflexion.

Pour la diffraction, le cas test 010 d'ARTEMIS qui est basé sur le conditions de l'expérience décrit par US Army Engineer Waterways Experiment Station [145] a été traité. Le domaine est construit comme indique la figure 3.11a avec une profondeur d'eau constante $p = 64$ m. La houle incidente est caractérisée par une hauteur $H_I = 1$ m, une période $T = 14$ s et une direction par rapport à l'axe de x faisant l'angle $\theta_I = 0^\circ$. Les parois solides sont caractérisés aussi par leur coefficient de réflexion $R = 1$ et un angle de délai $\alpha = 0^\circ$. Les conditions limites sont aussi définies sur la même figure.

Le problème est résolu et les valeurs de la hauteur de vagues sur la section $y = 915$ m sont comparés à ceux obtenus par ARTEMIS et avec les résultats expérimentaux [145]. Ces résultats sont montrés dans la figure 3.11b. Les différences dans les tailles de maillages et le temps du calcul pour la solution numérique sont comparés dans le tableau 3.5.

Concernant la réflexion, on a traité le cas test 004 d'ARTEMIS en se basent sur

Tableau 3.5 – Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de diffraction dans Berkhoff

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
ARTEMIS	7313	14 304	< 1
MATLAB	10 665	20 992	0.75

l'expérience menée par Delft Hydraulics Laboratory [45]. La figure 3.12a montre le domaine et les conditions limites. La profondeur est constante $p = 0.3$ m, la houle incidente a un hauteur $H_I = 0.04$ m, une période $T = 1.4$ s et un angle avec l'axe de x $\theta_I = 90^\circ$. Les coefficients de réflexion sont $R_1 = 0.23$, $R_2 = R_3 = 1$, $R_4 = R_5 = 0.05$ et $R_6 = 0.23$ respectivement pour les parois P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 et P_6 . Le délai pour tous les parois est $\alpha = 0^\circ$.

Le coefficient d'amplification est définit par

$$Amp = 100 \frac{H(x, y)}{H_I} \quad (3.64)$$

La comparaison des coefficients d'amplification avec ARTEMIS et l'expérience [45] pour la section $y = 5.25$ m est présentée dans la figure 3.12b et pour la section $y = 4.75$ m dans la figure 3.12c.

Les différences dans les tailles de maillages et le temps du calcul pour la solution

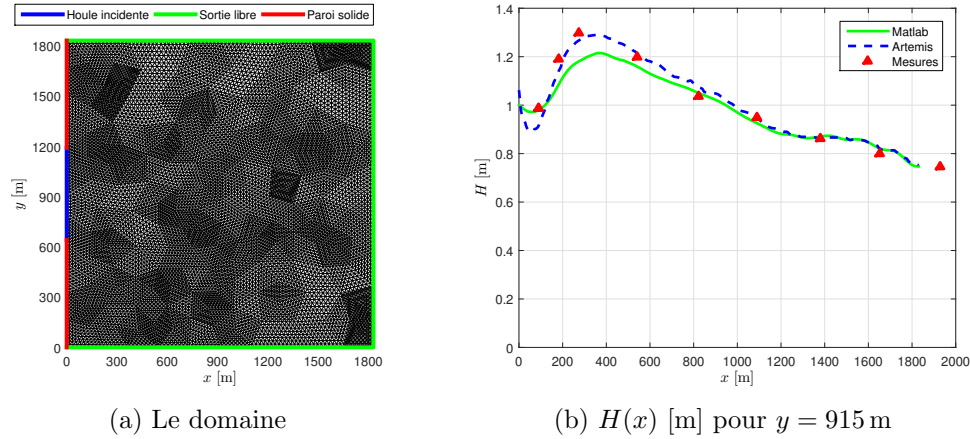


FIGURE 3.11 – Validation de phénomène de diffraction dans Berkhoff.

numérique sont comparés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 – Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de réflexion dans Berkhoff

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
ARTEMIS	-	3265	1
MATLAB	1767	3376	0.458

Ces deux tests de validation nous montrent que pour l'équation de Berkhoff simple (3.10) la solution numérique obtenue à partir de l'outil PDE est satisfaisante. Il y a presque une similarité avec ARTEMIS et un bon accord avec les résultats expérimentaux dans une temps de calcul plus petite.

3.7.1.1 Généralisation des pentes

Pour valider les changements rapides dans la bathymétrie, le cas test 006 d'ARTEMIS a été considéré dans notre étude. Ce test a été défini par Davies and Heathershaw [40] comme la figure 3.13a le présente. La bathymétrie prend une forme analytique. Les conditions limites sont bien définies.

Les vagues incidentes ont la hauteur $H_I = 0.01$ m et font l'angle $\theta_I = 0^\circ$ avec l'axe de x . La période T varie dans une intervalle de 0.97 s et 2.37 s.

Les parois solides ont un coefficient de réflexion $R = 1$ et un délai $\alpha = 0^\circ$.

La figure 3.13b représente le coefficient de réflexion des vagues C_r défini par

$$C_r = \frac{H_{max} - H_I}{H_I} \quad (3.65)$$

pour $x < 25$ m en fonction de $2\lambda_b/\lambda$ où λ_b est la longueur d'onde de la fonction sinusoïdale décrivant les rides dans la bathymétrie. λ_b est égale à 1 m dans notre

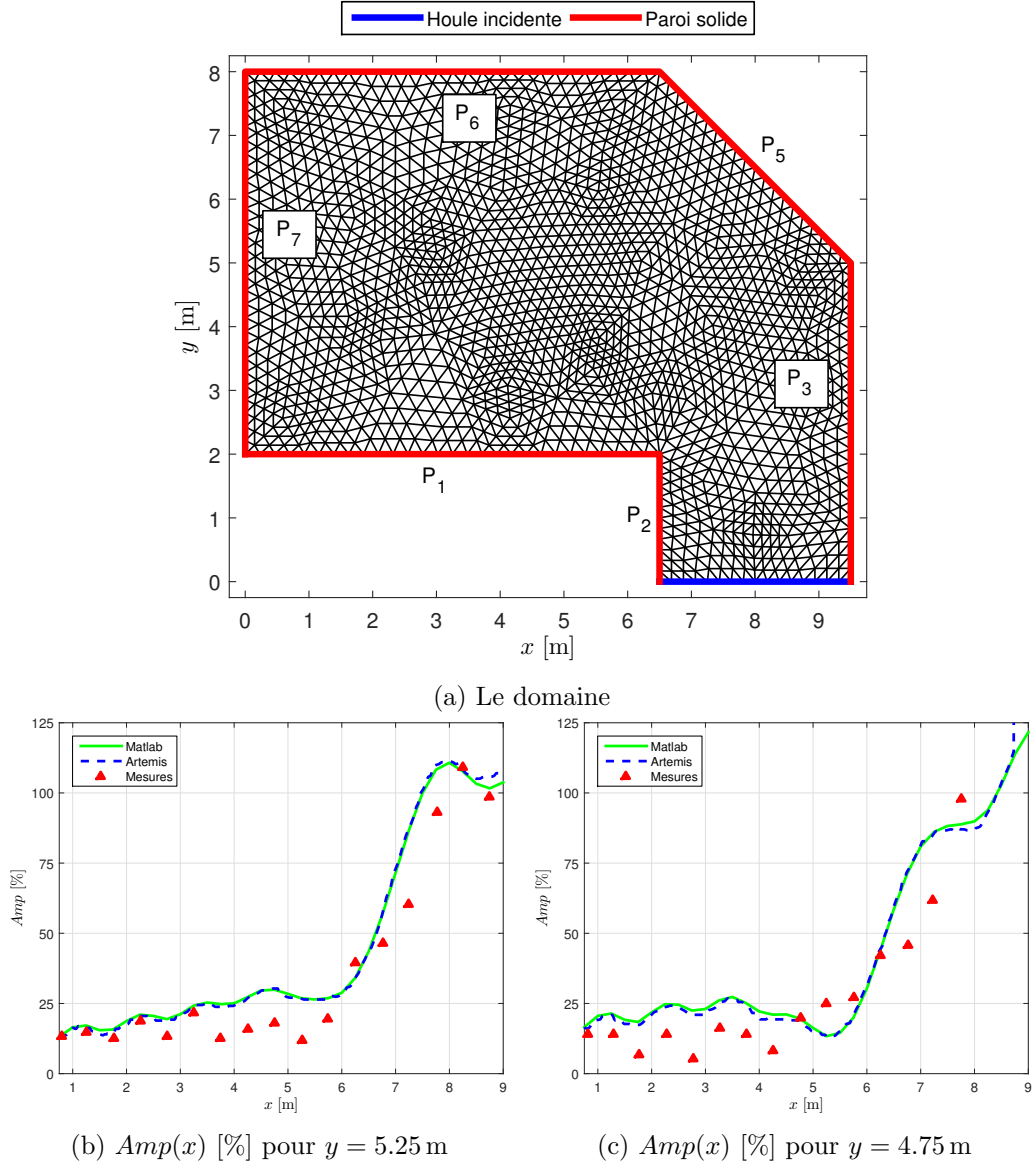


FIGURE 3.12 – Validation de phénomène de réflexion dans Berkhoff.

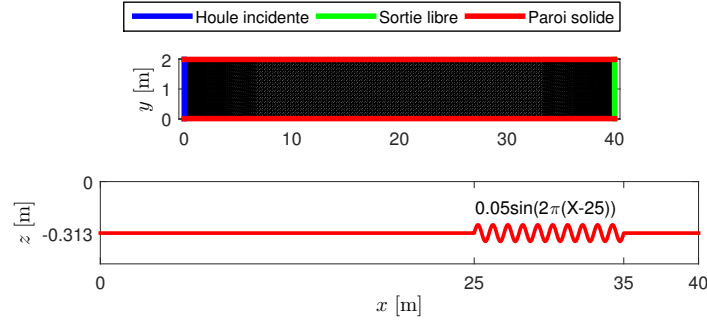
cas. et λ est le longueur des vagues.

Ces résultats sont comparés aux résultats trouvés par ARTEMIS et les résultats de l'expérience [40]. Le tableau 3.7 résume les différences dans les maillages et les temps de calcul.

Ces résultats donnent la confiance dans la généralisation du bathymétrie (3.14. Ils prouvent, en plus la possibilité numérique à chercher le gradient et le Laplacien de bathymétrie (3.13) dans MATLAB d'une manière correcte.

Tableau 3.7 – Les paramètres des maillages pour la validation d’extension de type de bathymétrie dans Berkhoff.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
ARTEMIS	-	400 000	17
MATLAB	247 553	491 520	19.206



(a) Le domaine et la bathymétrie

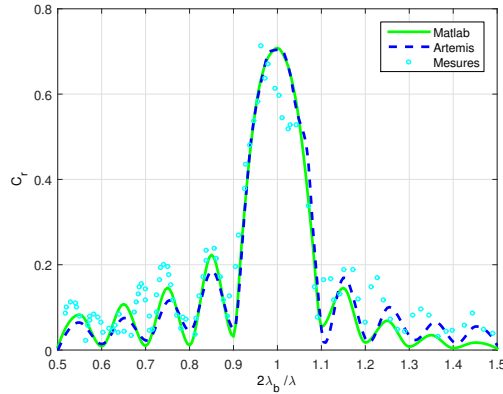
(b) C_r en fonction de $2\lambda_b/\lambda$

FIGURE 3.13 – Validation d’extension de type de bathymétrie dans Berkhoff.

3.7.1.2 Validation de frottement au fond

Le cas test 011 d’ARTEMIS a été utilisé pour valider le modèle après l’introduction de frottement au fond présenté dans la section 3.3.2.1. Ce cas est réalisé par Inman and Bowen [78] dans le domaine montré par la figure 3.14a. Dans ce domaine les conditions aux limites sont présentées. La profondeur de l’eau est $p = 0.5$ m. La houle incidente, de hauteur $H_I = 0.175$ m et de période $T = 2$ s, entre le domaine de la gauche en faisant un angle $\theta_I = 0^\circ$ avec l’axe de x .

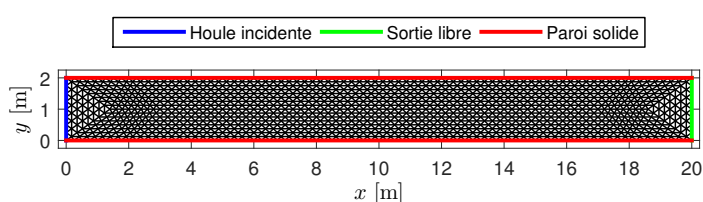
Les parois solides ont un coefficient de réflexion $R = 1$ et un délai $\alpha = 0^\circ$.

Le fond sableux a un coefficient de frottement $fw = 0.17$ (3.21). Les hauteurs des vagues sur la section de $y = 1$ m sont montrées dans la figure 3.14b en comparaison avec celles obtenus par ARTEMIS et celles mesurées dans l’expérience [78]. Le ta-

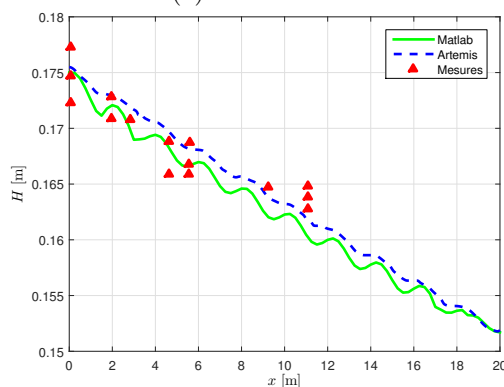
bleau 3.8 montre les caractéristiques des maillages et le temps du calcul consommé pour la recherche de la solution numérique.

Tableau 3.8 – Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de frottement au fond dans Berkhoff.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
ARTEMIS	1169	1896	< 1
MATLAB	1369	2560	1.049



(a) Le domaine



(b) $H(x)$ [m] pour $y = 1$ m

FIGURE 3.14 – Validation de phénomène de frottement au fond dans Berkhoff.

Les résultats montrent que même la solution du problème non linéaire (3.20 , 3.21 et 3.18) est fiable. Il est très clair que l'énergie des vagues se dissipe tout au long de la propagation.

3.7.1.3 Validation de déferlement

Le déferlement qui est le deuxième type de dissipation à être introduit dans l'équation de Berkhoff dans la section 3.3.2.2, a été validé pour sa solution numérique en considérant le cas test 009 d'ARTEMIS. Le test prend le cas expérimental réalisé par Stive [139]. Le domaine de l'expérience est défini dans la figure 3.15a où on peut voir la bathymétrie de la plage qui décroît avec une pente de 1/40. Les conditions limites sont montrées aussi. La houle incidente vient de la gauche faisant un angle

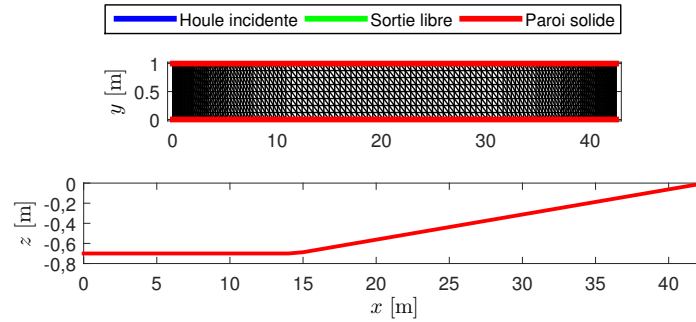
Tableau 3.9 – Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de déferlement dans Berkhoff.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
ARTEMIS	863	1421	< 1
MATLAB	1361	2432	1.76

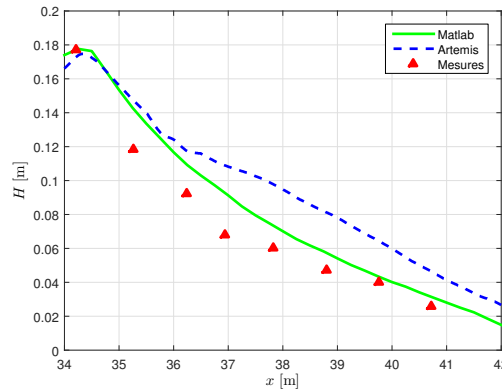
$\theta_I = 0^\circ$ avec l'axe de x . Sa hauteur est $H_I = 0.145$ m et sa période $T = 1.79$ s. Les parois solides ont $R = 1$ comme coefficient de réflexion et $\alpha = 0^\circ$ comme délai. La figure 3.15b montre la variation de la hauteur des vagues sur la section $y = 0.5$ m pour $34 \text{ m} < x < 42 \text{ m}$. Ces résultats sont comparés avec la solution d'ARTEMIS et avec les résultats expérimentaux [139].

Les paramètres de maillages pour les deux solutions numériques sont comparés dans le tableau 3.9.

Les résultats montrent de nouveau que notre solution est bien adaptée au problème. Le déferlement qui est toujours un terme dissipatif, montré non linéaire à partir des équations (3.20, 3.27 et 3.18), provoque la diminution de l'énergie dans la zone de déferlement. Le fait que nos résultats sont plus proche de l'expérience que ARTEMIS



(a) Le domaine et la bathymétrie



(b) $H(x)$ [m] pour $y = 0.5$ m

FIGURE 3.15 – Validation de phénomène de déferlement dans Berkhoff.

revient, probablement, à la raison qui apparaît dans le tableau 3.9. On peut voir dans ce tableau que le nombre des éléments triangulaires dans notre maillage est 70 % de plus que le maillage d'ARTEMIS, et par suite un temps de calcul plus long.

3.7.1.4 Validation de vague incidente aléatoire

Une étude expérimentale sur un modèle physique d'un port réel a été réalisée par Hydraulic Research Wallingford et utilisé par ARTEMIS afin de valider le logiciel d'une manière globale. Ce cas test portant le numéro 012 prend en compte l'incidence aléatoire comme montré dans la section 3.3.1 avec l'existence de déferlement. Le domaine du port avec les conditions limites sont montrés dans la figure 3.16a et la bathymétrie représentée dans la figure 3.16b.

La houle incidente aléatoire a une hauteur significative $H_s = 2.8$ m et une période de pique $T_p = 10.4$ s. Il entre le domaine en faisant un angle $\theta_I = 114^\circ$ avec l'axe de x .

Les parois solides comme les structures portuaires existants ont un coefficient de réflexion $R = 1$ et le délai $\alpha = 0^\circ$.

La simulation a été réalisée et les hauteurs de vagues sur le profil 1 montrées dans la figure 3.16b ont été comparées aux les résultats d'ARTEMIS et expérimentaux dans la figure 3.16c.

Les caractéristiques des maillages sont résumées dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10 – Les paramètres des maillages pour la validation d'incidence aléatoire dans Berkhoff.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
ARTEMIS	20 775	40 506	31
MATLAB	22 741	44 352	261

Les résultats montrent que notre solution reste valable malgré la complexité du domaine et le couplage des phénomènes. La façon qu'on décompose la vague aléatoire en plusieurs vagues monochromatiques, puis la superposition des résultats (3.17) et enfin le déferlement dans le cas de l'incidence aléatoire (3.2 et 3.25) ont montré une bonne capacité de résoudre un problème réel. La grande différence dans le temps du calcul peut être causée par le déferlement dans un environnement d'incidence aléatoire se résout itérativement et se répète le nombre des vagues représentatives. Ce démarche de boucles à deux niveaux rend le calcul avec MATLAB plus long lorsqu'il n'y a pas une possibilité à résoudre parallèlement.

3.7.2 Modèle dynamique des brise-lames flottants

La validation du modèle dynamique des brise-lames flottants présentée dans la section 3.4 a une importance spécifique puisque le modèle utilisé dans cette thèse

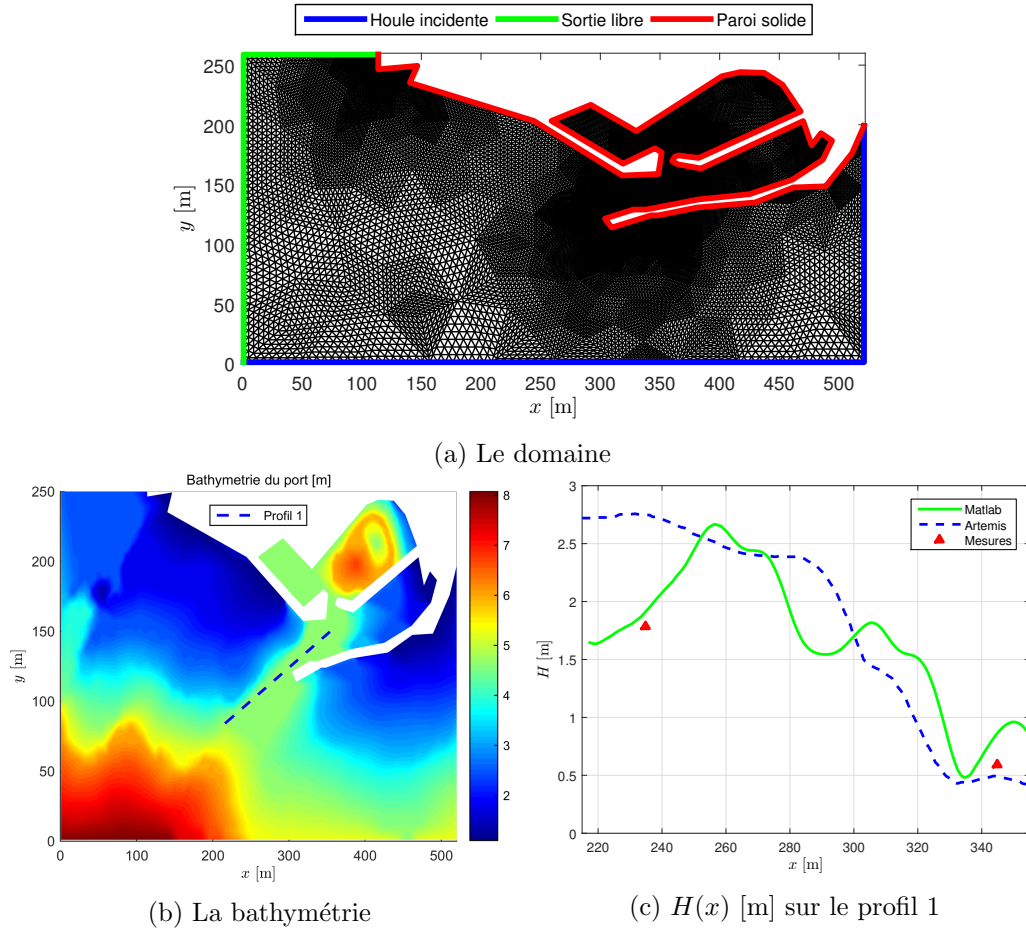


FIGURE 3.16 – Validation d’incidence aléatoire dans Berkhoff.

est élaboré par Elchahal et al. [50] sans avoir été validé par rapport aux mesures expérimentales ou autres modèles déjà validés. C’est pour cela qu’on a cherché des travaux antérieurs ou des expériences qui ont été menées dans des centres de recherches sur la performance du brise-lames flottant d’une manière découplée. Le découplage a joué un rôle essentiel dans la diagnostique et la correction du modèle.

3.7.2.1 Validation de diffraction

Dans le but de valider la phénomène de diffraction sur un brise-lames flottant l’expérience effectuée par Koutandos et al. [91] a été considérée. Le cas d’une seule brise-lames flottant fixe a été reconstitué numériquement et résolu. Le domaine d’expérience est décrit dans la figure 3.17a. Trois configurations du brise-lames ont été testé où la largeur du brise-lames est $l = 2$ m (Figure 3.4) mais la hauteur submergée h_r varie entre $2/5$ m, $1/2$ m et $2/3$ m. La houle incidente venant de la gauche a une hauteur $H_I = 0.2$ m et une période T qui varie entre 2.04 s et 9.17 s. Les conditions de la solution numérique sont montrées dans le tableau 3.11.

La performance prédictee numériquement du brise-lames est comparée à la per-

Tableau 3.11 – Les paramètres des maillages pour la validation de phénomène de diffraction dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
MATLAB	4929	9344	0.941

formance réelle à partir des coefficients de transmission (Figure 3.17b), réflexion (Figure 3.17c) et de dissipation (Figure 3.17d). Le coefficient de transmission est défini derrière le brise-lames (coté port) par

$$C_t = \frac{H_{max}}{H_I} \quad (3.66)$$

pour $x > 1$ m.

Le coefficient de réflexion est défini devant le brise-lames (côté mer) par

$$C_r = \frac{H_{max} - H_I}{H_I} \quad (3.65 \text{ rappel})$$

pour $x < -1$ m.

Le coefficient de dissipation est alors défini comme

$$C_d = \sqrt{1 - C_t^2 - C_r^2} \quad (3.67)$$

Ces coefficients sont représentés en fonction de la valeur non-dimensionnelle de la largeur du brise-lames multipliée par le nombre d'onde lk .

Les résultats dans la figure 3.17 montrent que le brise-lames a la même performance surtout que les variations des coefficients ont les mêmes tendances comme dans l'expérience lorsque h_r ou k augmente. Malgré la marge d'erreur sur les extrémités, les courbes restent toujours dans l'intervalle de solutions raisonnables. Les valeurs exactes dépendent beaucoup des conditions expérimentales non précisées dans l'article décrivant l'expérience [91]. Le coefficient de réflexion du paroi du brise-lames par exemple et leur nature sont des paramètres qui affectent la réflexion et la dissipation et en suite la transmission.

3.7.2.2 Validation de modes de radiations

Un brise-lames librement flottant a été utilisé pour tester un modèle décrit par Sannasiraj et al. [128]. Le brise-lames rigide est défini dans son domaine dans la figure 3.18a. Plus précisément, et comme un brise-lames flottant est définie dans la figure 3.4 sa largeur $l = 15$ m, sa hauteur submergée $h_r = 3$ m et son centre de gravité G existe à un mètre au-dessous de la surface libre. En considérant que le brise-lames est symétrique par rapport à son centre de gravité et homogène, on peut calculer sa hauteur total $h = 4$ m.

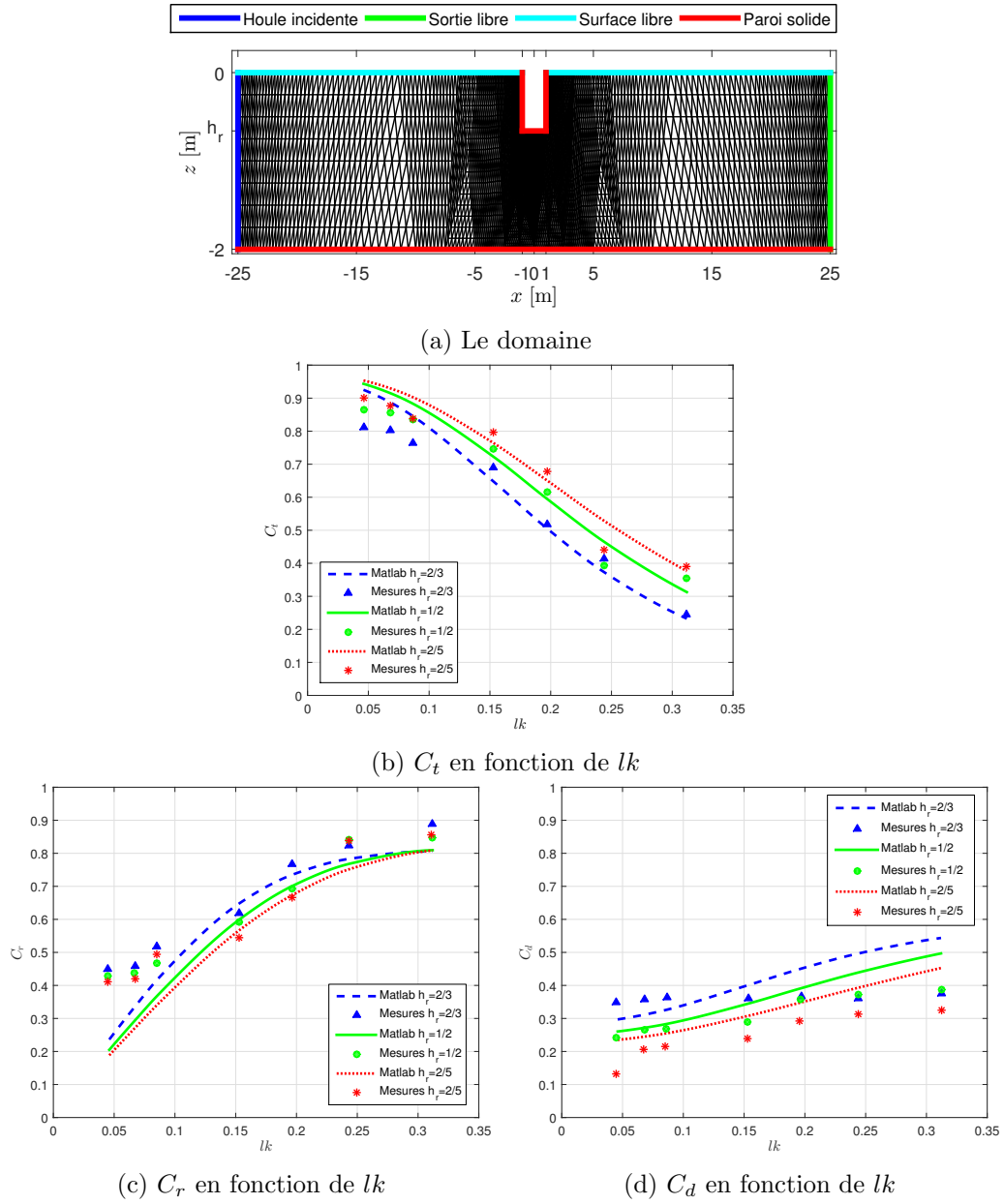


FIGURE 3.17 – Validation de phénomène de diffraction dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.

La vague incidente vient de la gauche faisant un angle $\theta_I = 0^\circ$ avec l'axe de x dans le plan horizontal avec une hauteur $H_I = 1$ m. La période T est calculée en fonction du nombre d'onde k sur la frontière d'incidence qui varie entre 0 m^{-1} et 0.27 m^{-1} . La solution numérique a été cherchée sous les conditions de maillage montrées dans le tableau 3.12.

Une comparaison entre les opérateurs d'amplitude de réponse (RAO) calculés et ceux de référence pour les trois types de mouvements du brise-lames provoqués

Tableau 3.12 – Les paramètres des maillages pour la validation des phénomènes de radiations dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
MATLAB	3497	6656	2.103

par l'excitation des vagues a été faite. Ces mouvements sont le balancement, le pilonnement et le roulis, et leurs opérateurs d'amplitude de réponse définie comme

$$RAO_j = \frac{\delta_j}{H_I/2}, \quad (3.68)$$

avec δ_j tiré de l'équation (3.53) et $j = 1, 2$ et 3 pour le mouvement de balancement, pilonnement et roulis respectivement. Ils sont présentés en fonction de coefficient non-dimensionnel ka avec $a = l/2 = 7.5$ m dans la figure 3.18.

Les résultats de balancement (Figure 3.18b), de pilonnement (Figure 3.18c) et de roulis (Figure 3.18d) montrent un accord presque parfait avec les références. Il est clairement perceptible qu'une fréquence de résonance identique existe pour les trois mouvements. Cette fréquence caractérise le brise-lames. Elle dépend fortement de la configuration géométrique, du matériau de construction qui affecte la masse, de l'inertie et de la position de centre de gravité. En fixant les dimension extérieur du brise-lames, chaque chargement dans la configuration intérieur du brise-lames, en gardant $e_1 = e_2$ (Figure 3.4) pour maintenir G à sa place, affecte la valeur de l'inertie I . Sous le condition de flottabilité libre, on peut calculer la masse du corps pour maintenir la hauteur submergée $h_r = 3$ m. Puis on peut calculer l'inertie I du corps. Par conséquent, il existe une infinité des valeurs de m et I qui peuvent respecter les conditions de test. On a essayé plusieurs matériaux comme les bétons, bétons armés ... Nous avons ensuite déduit que l'acier est le mieux adapté au test.

3.8 Étude paramétrique du modèle 2.5D des brise-lames flottants

Après avoir validé les deux modèles de base et leurs solutions numériques, on va modéliser un brise-lames flottant dans un environnement maritime simple à l'aide du modèle 2.5D des brise-lames flottants défini dans la section 3.5. Le domaine est présente dans la figure 3.19 qui présente également les maillages horizontal et vertical de la problème. La bathymétrie est analytique, elle change seulement suivant y d'une pente $1/150$ avec une profondeur à la côte égale à 15 m. Les conditions limites rassemblent à celles qui sont définies dans la figure 3.6 selon l'étape du calcul. Le brise-lames est localisé au milieu du domaine avec une longueur $L = 250$ m. Sa largeur est $l = 20$ m et sa hauteur totale est $h = 4$ m. Ses dimensions internes sont $(e_1, e_2, V_l) = (0.15 \text{ m}, 0.15 \text{ m}, 14.6 \text{ m})$ (Figure 3.4). Le matériau utilisé est l'acier avec $\rho_m = 7130 \text{ kg m}^{-3}$. Les câbles font un angle $\beta = 30^\circ$ avec le vertical et ont un

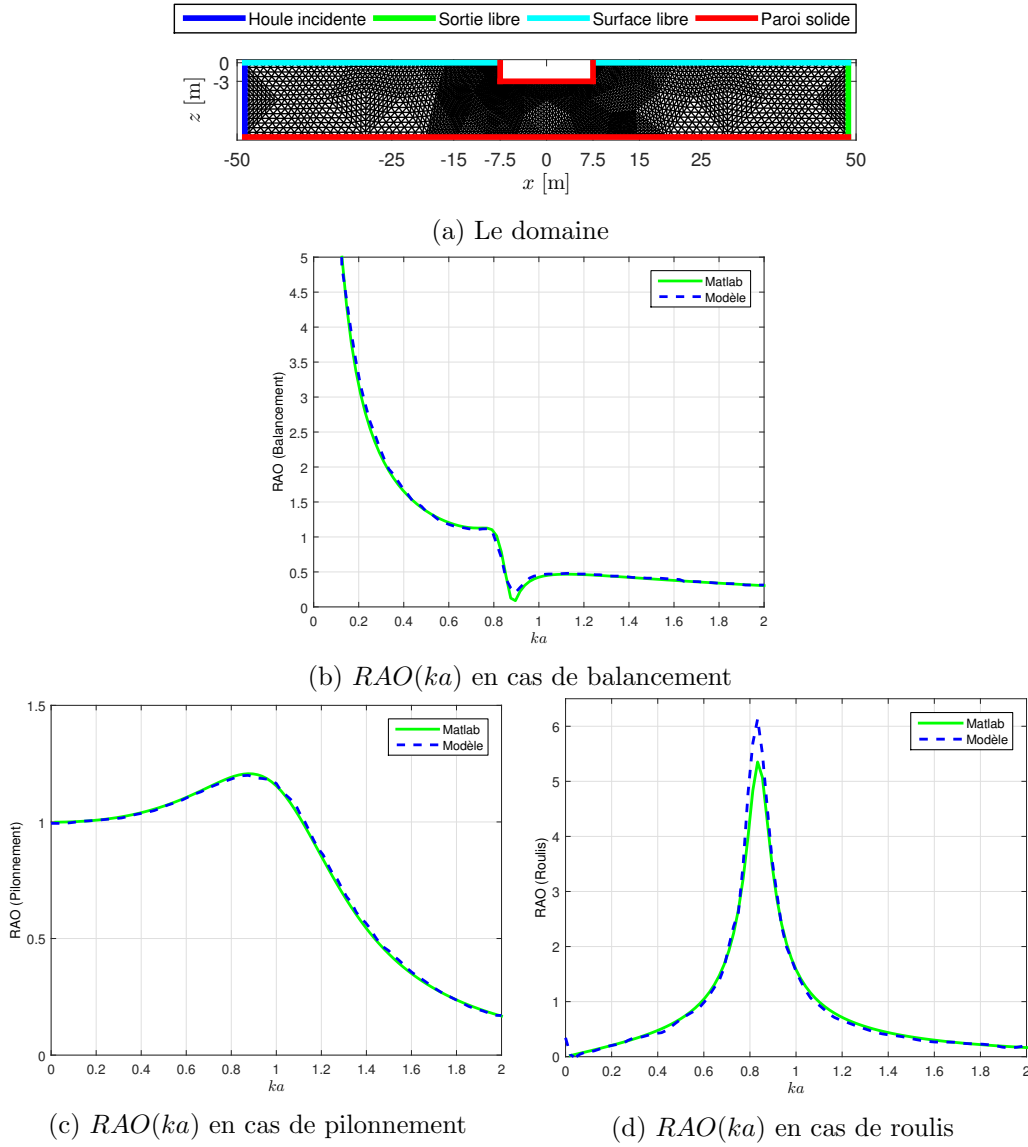


FIGURE 3.18 – Validation des phénomènes de radiations dans le modèle dynamique des brise-lames flottants.

coefficient de raideur $k_r = 1 \times 10^6 \text{ N m}^{-1}$

La houle incidente a une hauteur $H_I = 1 \text{ m}$, une période $T = 12 \text{ s}$ et elle vient du côté nord. Les parois solides ont un coefficient de réflexion $R = 0.77$.

Les paramètres des maillages et du calcul sont présentés dans le tableau 3.13.

Les résultats sont présentés dans la figure 3.20, où on peut voir l'évolution de la solution étape par étape. En fin, on compare la figure 3.20c qui est la solution du problème à l'aide du modèle 2.5D en considérant le brise-lames comme flottante, et la figure 3.20d qui est la solution du même problème mais à l'aide du modèle de Berkhoff. Les résultats montrent clairement l'influence de considérer un brise-lames

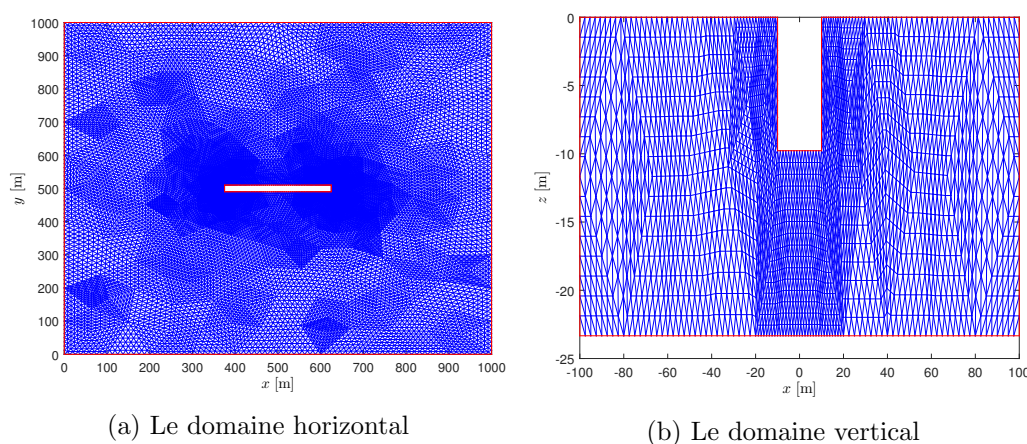


FIGURE 3.19 – Les domaines d'étude d'un brise-lames flottant

Tableau 3.13 – Les paramètres des maillages durant une solution par le modèle 2.5D des brise-lames flottants.

	Nb. des noeuds	Nb. des éléments triangulaires	Temps de calcul [s]
Étape 1	18 616	36 736	2.042
Étape 2	2177	4096	0.432
Étape 3	18 616	36 736	1.399

flottant sur la zone portuaire. Pour mieux comprendre, le coefficient de transmission (3.66) sur la section $x = 500$ m a été montré dans la figure 3.21.

On voit sur cette figure que la hauteur des vagues juste à côté du brise-lames est plus grande en utilisant un brise-lames flottant (BLF), mais loin du brise-lames le port devient plus calme. La performance du brise-lames est évaluée différemment selon la zone à protéger. Autrement dit, une zone de danger pour la navigation auprès du brise-lames va être définie. Cette zone dépend des paramètres du brise-lames, et surtout de sa capacité à bouger et à atténuer les vagues. Une étude paramétrique sur son comportement permet de donner une idée plus compréhensible. On a varié le longueur L , le raideur du câble k_r et la hauteur submergé h_r et on a obtenu les résultats montrés dans la figure 3.22.

La figure 3.22a montre l'influence de k_r et L sur le coefficient de transmission C_t à 250 m du brise-lames. On peut remarquer, sans être surpris, l'existence d'un seuil de souplesse $k_r = 1 \times 10^2 \text{ N m}^{-1}$ au-dessous de laquelle les câbles n'ont aucune influence sur les mouvements du brise-lames, et une seuil de rigidité $k_r = 1 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$ au-dessus de laquelle le brise-lames flottant agit comme un brise-lames fixe. On note, en plus l'existence d'une pique minimum à une valeur spécifique de k_r mais qui varie en fonction de L . En outre, il existe une longueur L minimum au-dessous de la quelle un brise-lames flottant est toujours mieux que la fixe dans cette zone. Mais la figure 3.23 montre que cette influence disparaît si la

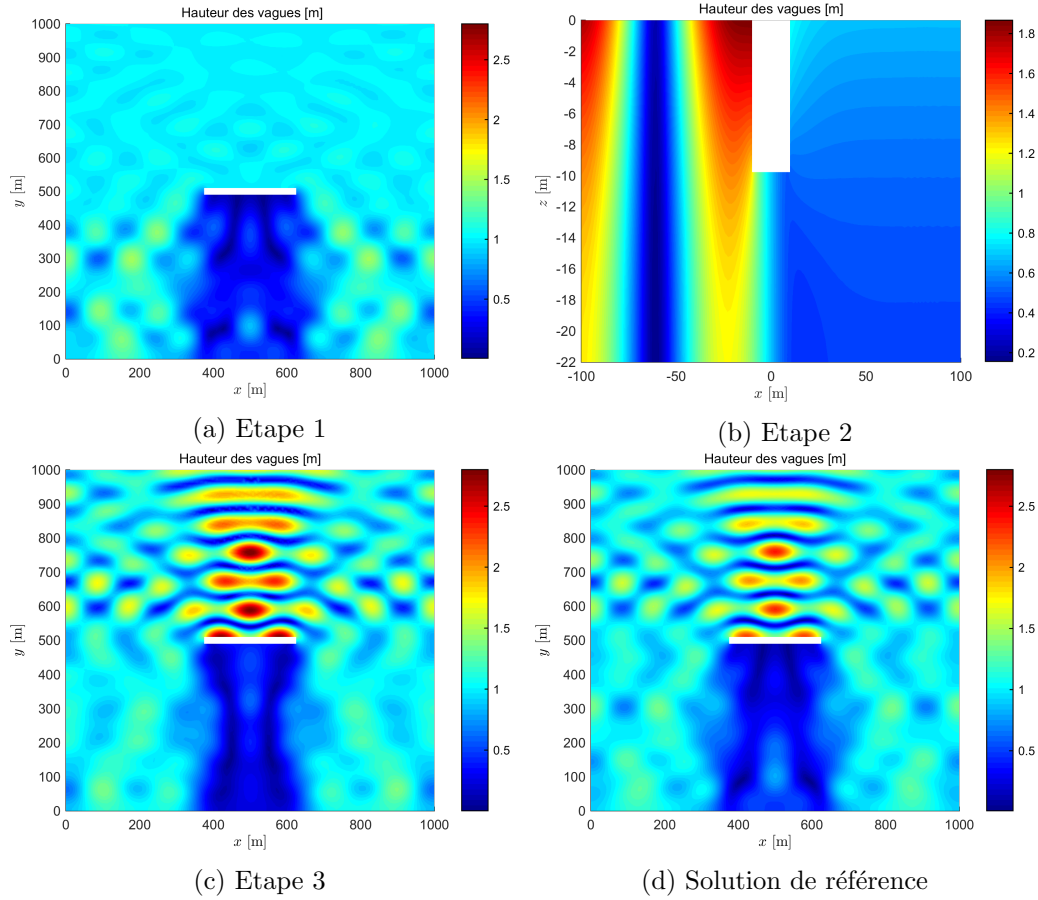


FIGURE 3.20 – Les résultats de la simulation par 2.5D

zone à protéger considère la totalité de l'endroit derrière la brise-lames.

La figure 3.22b montre que pour un $k_r = 1 \times 10^6 \text{ N m}^{-1}$ le brise-lames flottant est plus performante que le brise-lames fixe sur la totalité de l'endroit qui se trouve derrière elle quel que soit sa longueur L . Elle montre aussi que la hauteur de la partie submergée du brise-lames a une influence sur son performance. Il existe de même une pique minimum spécifique qui varie en fonction de L et h_r .

Ces résultats ont montré la capacité du modèle 2.5D à modéliser l'effet d'un brise-lames flottant dans le milieu portuaire. Ils ont souligné le fait que le modèle fonctionne lui-même dans l'esprit physique correcte, ce qui donne une information essentielle sur son validité.

L'existence des plusieurs minimums qui sont plus moins reliés montre le besoin d'un outil d'aide à la décision performant pour chercher la meilleure configuration du brise-lames. Il doit être basé sur l'aspect stochastique à cause des nombreux minimums locales dans la surface des solutions. Par contre le temps du calcul pour résoudre le modèle hydrodynamique nous oblige à chercher une démarche qui rende la convergence plus rapide. Les outils de l'optimisation appliqués sur le problème sont montrés dans le chapitre suivant.

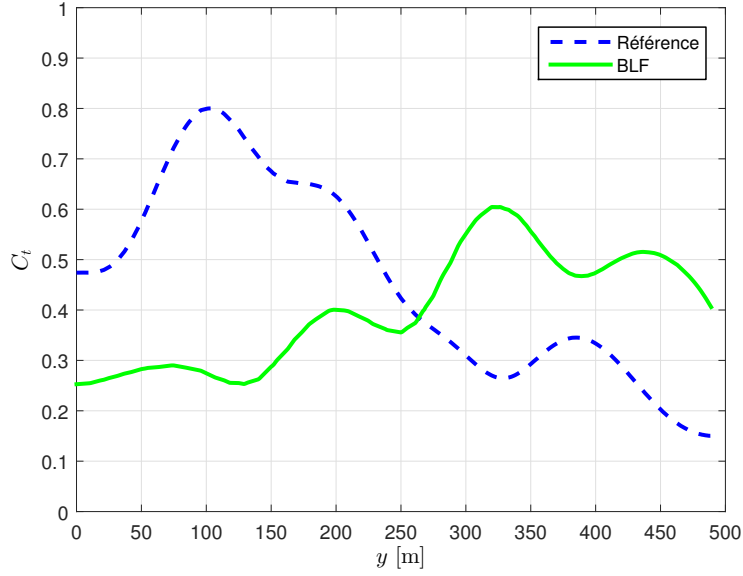
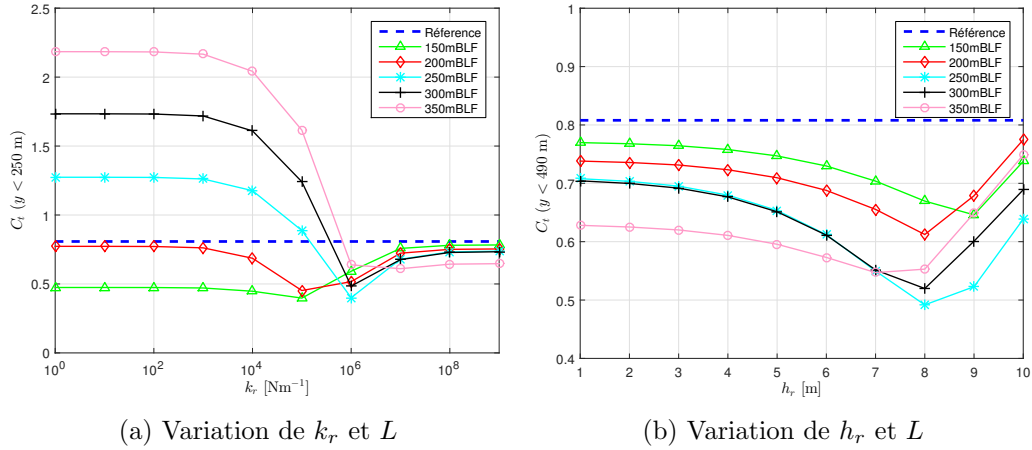
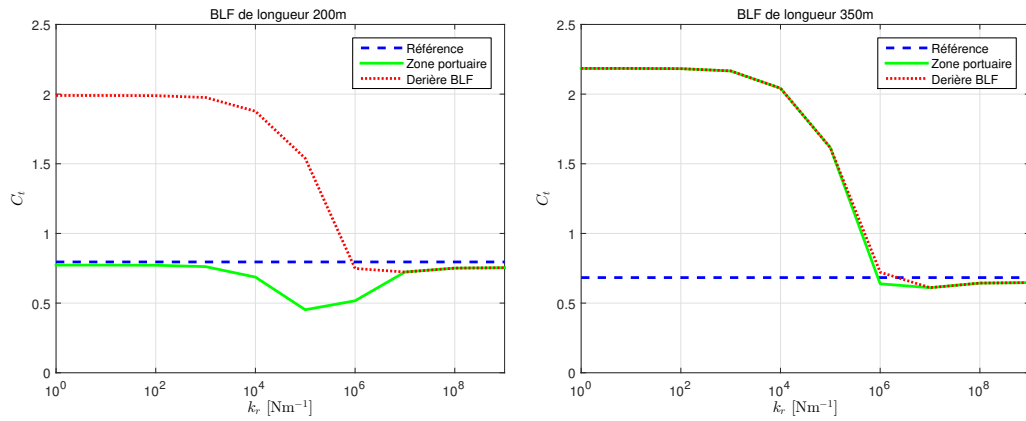
FIGURE 3.21 – C_t derrière le brise-lames pour $x = 500$ m

FIGURE 3.22 – Étude paramétrique de la performance d'un brise-lames flottant

3.9 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre les différents modèles hydrodynamiques utilisés dans la thèse pour modéliser la propagation des vagues et leurs interactions avec le milieu et les structures sont montrés.

- Le modèle de Berkhoff dans le plan horizontal, ses améliorations et ses validations.
- Le modèle dynamique des brise-lames flottant dans le plan vertical avec sa validation.
- Le modèle élaboré dans cette thèse, le 2.5D des brise-lames flottants qui combinent les deux modèles précédents.



(a) Variation de C_t en fonction de k_r pour $L = 200$ m
 (b) Variation de C_t en fonction de k_r pour $L = 350$ m

FIGURE 3.23 – L'influence de k_r et L selon la zone à protéger

Outils d'aide à la décision

Sommaire

4.1	Méthodes d'optimisation : synthèse de l'état de l'art	90
4.1.1	Introduction	90
4.1.2	Formulation du problème d'optimisation et modèle physique	90
4.1.3	Principes fondamentaux des algorithmes d'optimisation	91
4.1.4	Algorithmes déterministes	93
4.1.5	Algorithmes stochastiques	93
4.1.6	Particularités des problèmes multi-objectifs	95
4.1.7	Méta-modèles, plans d'expériences	97
4.1.8	Couplage de méta-modèles et d'algorithmes d'optimisation	99
4.2	L'influence du modèle hydrodynamique sur les résultats de l'optimisation	100
4.2.1	Cas du port profond	102
4.2.2	Cas du port peu profond	102
4.2.3	Cas du port en pleine mer	104
4.2.4	Conclusion	105
4.3	L'optimisation des brise-lames flottants	107
4.3.1	Définition du problème d'optimisation	107
4.3.2	Démarche de l'optimisation	112
4.3.3	Optimisation pour le brise-lames fixe dans le plan horizontal	113
4.3.4	Optimisation sur le brise-lames flottant dans le plan vertical	116
4.3.5	Optimisation sur le brise-lames flottant dans le 2.5D	118
4.3.6	Justification de la démarche	120
4.4	Application : Port de Hanstholm au Danemark	121
4.5	Résumé du chapitre	125

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter la démarche d'optimisation qu'on a apporté dans le travail de cette thèse pour optimiser la positionnement et la dimensionnement des digues flottantes d'une manière efficace en se basant sur le modèle 2.5D des brise-lames flottants.

4.1 Méthodes d'optimisation : synthèse de l'état de l'art

4.1.1 Introduction

L'optimisation concerne quasiment tous les domaines scientifiques, les sciences du vivant, la chimie, la physique, les mathématiques, l'économie et évidemment l'ingénierie, au sens large.

On se propose ici de présenter une synthèse de quelques principes et méthodes des principales démarches d'optimisations en relation avec notre problématique de conception et d'optimisation de structure d'aménagement portuaire. On se limitera ici aux méthodes d'optimisation permettant de résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires multi-objectifs avec des fonctions contraintes formulés en utilisant des variables de natures continues et discrètes.

Rappelons en préambule qu'il n'existe malheureusement pas d'algorithme d'optimisation universel capable de résoudre efficacement tous types de problèmes d'optimisation. Sans aller jusqu'au développement ou l'amélioration d'algorithmes existants, une des problématiques actuelles est déjà d'assembler un ensemble de techniques et d'algorithmes pour résoudre efficacement le problème posé.

4.1.2 Formulation du problème d'optimisation et modèle physique

Il existe de nombreuses manières de formuler mathématiquement un problème d'optimisation. On considère ici une formulation générale en ingénierie, celle d'un problème d'optimisation non linéaire multi-objectif en variables mixtes (entières et continues).

$$\mathcal{P}_{\text{MultiObj}} : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), \dots, f_i(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})] \\ \text{Sous les contraintes} \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 & j = 1 \dots m \\ c_j(\mathbf{x}) = 0 & j = m + 1 \dots m + l \end{cases} \quad \text{avec : } \begin{cases} \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^p \\ c_j(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Ici $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des variables d'optimisation (ou de conception) composé des n variables scalaires continues.

Le vecteur $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ est l'ensemble des fonctions objectifs à minimiser, c'est le vecteur des p fonctions scalaires à minimiser $f_i(\mathbf{x})$, $i = 1 \dots p$.

Les limitations sur les valeurs des variables d'optimisation (de conception) sont exprimées via des fonctions « contraintes ». Ces fonctions contraintes scalaires, $c_j(\mathbf{x})$ sont ici divisées en m fonctions contraintes inégalités pour $j = 1 \dots m$ et l égalités pour $j = m + 1 \dots m + l$. On définira donc l'ensemble des solutions $\mathcal{D}$ de ce problème comme l'ensemble des valeurs des variables d'optimisation $\mathbf{x}$ tel que toutes les fonctions contraintes $c_j(\mathbf{x})$, $j = 1 \dots m + l$ soient satisfaites.

Le choix et l'expression des fonctions à minimiser, des fonctions contraintes et des variable d'optimisation est évidemment crucial et doit être cohérent avec

l'objectif recherché dans la démarche d'optimisation, les méthodes de résolutions et les modèles physiques disponibles.

En effet, la nature des modèles physiques qui seront utilisés dans la formulation des fonctions objectifs et contraintes conditionne le choix des méthodes de résolution, les temps de recherche de ou des solutions du problème.

De manière générale, il sera nécessaire de pouvoir évaluer les fonctions objectifs et contraintes pour l'ensemble des valeurs admissibles des variables d'optimisation $\mathbf{x} \in \mathbb{N}^{n_e} \times \mathbb{R}^{n_c}$. Il faut noter que très souvent il sera nécessaire d'évaluer les fonctions du problème sur une ensemble plus large que l'ensemble des solutions $\mathcal{D}$, cet ensemble étant souvent définies par des bornes inférieures $\mathbf{x}_{\text{Inf}}$ et supérieures $\mathbf{x}_{\text{Sup}}$ sur les variables d'optimisation.

Cette évaluation des fonctions s'appuie sur l'existence d'un ou plusieurs modèles physiques. Ces modèles physiques doivent exister pour pouvoir formuler le problème d'optimisation. Ils peuvent prendre de nombreuses formes, comme par exemple un ensemble d'expression analytiques ou bien souvent comme des modèles numériques.

La vitesse d'évaluation de ces modèles est l'élément essentiel dans le temps de résolution d'un problème d'optimisation. En effet les algorithmes d'optimisation étant par nature itératifs, la majeure partie du temps de calcul est consommée par le temps d'évaluation des modèles physiques.

On présente dans la suite quelques principes essentiels des algorithmes utilisés dans la recherche de la ou des solutions optimales. Cette présentation concerne dans un premier temps, les problèmes d'optimisation mono-objectif, où le vecteur de fonctions à minimiser $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^p$ se réduit à une fonction scalaire $f(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}$ et nous définirons le problème $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$:

$$\mathcal{P}_{\text{MonoObj}} : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ f(\mathbf{x}) \\ \text{Sous les contraintes} \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 & j = 1 \dots m \\ c_j(\mathbf{x}) = 0 & j = m + 1 \dots m + l \end{cases} \quad \text{avec : } \begin{cases} \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \\ f(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \\ c_j(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

4.1.3 Principes fondamentaux des algorithmes d'optimisation

Rappelons qu'en général le problème d'optimisation $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ peut admettre un ou plusieurs optimums locaux et que lorsque dans les rares situations, où $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ est convexe ces optimums locaux sont alors des optimums globaux.

Tous les algorithmes d'optimisation procèdent par itérations successives de sorte qu'à partir d'une configuration initiale (constituée d'une ou plusieurs solutions potentielles des variables d'optimisation $\mathbf{x}_k$) ils génèrent une suite de configuration dans l'espace des valeurs admissibles des variables d'optimisation. Cette suite est construite à partir d'opérateurs sensés garantir que cette suite converge vers un des optimums locaux $\mathbf{x}^*$ (globaux si $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ est convexe).

Une des propriétés fondamentale d'un algorithme d'optimisation est celle de sa convergence globale, c'est à dire sa capacité à converger vers une optimum local

$\mathbf{x}^*$ quelque soit la configuration initiale. Pour le problème $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$, c'est optimum local doit vérifier les conditions d'optimalité de Karush Kuhn et Tucker [92].

Ces conditions d'optimalité nécessitent que les fonctions objectif et contraintes soient continues et différentiables au moins une fois.

En optimisation, de nombreux algorithmes de base ont été développés pour la recherche des minimums locaux d'une fonction scalaire de plusieurs variables $f(\mathbf{x})$ sans fonction contrainte. De sorte que dans de nombreux algorithmes pour les problèmes du type $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$, s'appuie sur ces algorithmes de bases se ramenant au cas sans fonction contrainte par l'introduction d'une nouvelle fonction objectif (dite « pénalisée » ou « duale » selon les techniques utilisées).

Par exemple avec une technique de pénalisation on définit :

$$\varsigma(\mathbf{x}, \varrho) = f(\mathbf{x}) + \varrho \varepsilon(\mathbf{x}) \text{ avec : } \begin{cases} \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \text{ et } \varrho \in \mathbb{R}^+ \\ \varsigma(\mathbf{x}, \varrho) \in \mathbb{R} \\ \varepsilon(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

Ici la fonction de pénalisation $\varepsilon(\mathbf{x})$ est telle que $\varepsilon(\mathbf{x}) = 0$ si $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$ et $\varepsilon(\mathbf{x}) \gg 1$ si $\mathbf{x} \notin \mathcal{D}$, de sorte que le minimum de $\varsigma(\mathbf{x}, r)$ n'est atteint que pour $\mathbf{x} \in \mathcal{D}$, donc lorsque les fonctions contraintes sont satisfaites. Le coefficient positif r ou coefficient de pénalisation permet de calibrer numériquement les ordres de grandeurs de $\varepsilon(\mathbf{x})$ par rapport à $f(\mathbf{x})$.

La fonction duale ou lagrangienne associée à $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ permet également de se ramener à un problème sans fonctions contraintes, avec :

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\vartheta}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{m+l} \vartheta_j c_j(\mathbf{x}) \text{ avec : } \begin{cases} \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \text{ et } \boldsymbol{\vartheta} \in \mathbb{R}^{m+l} \\ \mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\vartheta}) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

On montre que le minimum de la fonction $\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\vartheta}^*)$ est un optimum local $\mathbf{x}^*$ de $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ où $\boldsymbol{\vartheta}^*$ sont les multiplicateurs de Kuhn et Tucker à l'optimum $\mathbf{x}^*$. Cette technique nécessite donc d'opérer dans l'espace des variables d'optimisation $\mathbf{x}$ mais aussi dans l'espace des variables dites « duales » $\boldsymbol{\vartheta}$.

Les conditions les moins restrictives sur les fonctions objectif et contraintes imposent au moins la continuité sur l'ensemble des valeurs admissibles. On peut alors démontrer que lorsqu'au cours des itérations les valeurs générées d'une fonction duale associée (lagrangien, pénalités quadratiques extérieures, ..) à $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ sont décroissantes, la suite converge vers un point « d'accumulation » qui est un optimal local [92].

Dans cette situation les qualités d'un bon algorithme d'optimisation sont :

- Sa capacité de convergence globale.
- La vitesse de convergence de la suite des configurations générées au cours des itérations vers un optimum local.
- Sa capacité à converger vers le meilleur optimum local lorsqu'il en existe plusieurs.

Dans la suite nous proposons une synthèse des opérateurs disponibles, synthèse structurée en deux catégories selon les principes itératifs mis en jeu (déterministes et stochastiques).

4.1.4 Algorithmes déterministes

Dans ces algorithmes les opérateurs ont un comportement déterministe. Selon que ces opérateurs utilisent uniquement les valeurs des fonctions objectif et contraintes, ou également leur gradient, voire les hessiens de ces fonctions, ces opérateurs sont dits d'ordre 0,1 ou 2.

Les opérateurs manipulent une solution dans le processus itératifs et génèrent donc une suite $\{\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_k\}$ de solutions $\mathbf{x}_k$ dans l'espace des valeurs admissibles, suite convergeant vers $\mathbf{x}^*$.

On trouvera dans [62] une description détaillée de ces opérateurs. Actuellement une des combinaisons la plus efficace pour résoudre des problèmes $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}$ avec des fonctions différentiables au moins une fois utilise :

- Une combinaison d'une fonction de pénalisation et d'un lagrangien, dite « lagrangien augmentée ». Cette fonction « lagrangien augmentée » est substituée par une approximation de Taylor à l'ordre 2.
- Une approximation de Taylor à l'ordre 2 du lagrangien augmenté, dans laquelle le hessien est calculé à partir des gradients avec une mise à jour de type « quasi newton ».

Les algorithmes déterministes présentent les caractéristiques suivantes :

- Une bonne propriété de convergence globale et une bonne vitesse de convergence.
- Converge vers un optimum local et lorsqu'il existe plusieurs minimums locaux la convergence vers l'un de ces optimums dépend de la configuration initiale.
- Une certaine sensibilité au conditionnement numérique du problème et en particulier à la qualité des gradients calculés par différences finies.
- Une sensibilité à la continuité des fonctions objectif et contrainte.

4.1.5 Algorithmes stochastiques

Dans ces algorithmes les opérateurs permettant de faire évoluer la configuration initiale utilisent des mécanismes heuristiques, donc faisant appel aux générateurs de nombres aléatoires des calculateurs.

On peut distinguer deux classes d'algorithmes, ceux qui manipulent une solution à chaque itération, à l'instar des algorithmes déterministes et ceux qui manipulent un ensemble de solutions à chaque itération.

Dans la première famille on trouve principalement :

- La méthode de recherche « tabou » qui conserve les informations relatives aux minimums déjà atteints ainsi que les jeux de paramètres qui leur sont associés. Ces informations sont stockées au fur et à mesure des itérations dans une liste « tabou ». Ainsi la progression à chaque itération de l'algorithme se fait dans une direction et vers un jeu de paramètres qui n'est pas « tabou » (i.e. autorisé). La mise en œuvre de cette démarche permet d'éviter l'arrêt de l'algorithme aux optimums locaux.

- La méthode le recuit simulé qui se base sur un phénomène observé en métallurgie. La méthode de recuit permet d'améliorer les caractéristiques d'un matériau métallique en le chauffant graduellement puis en le refroidissant progressivement. Cette méthode est utilisée par exemple pour faciliter la relaxation des contraintes internes qui apparaissent au cœur des pièces suite à leur mise en forme. Elle permet de rétablir l'état d'équilibre de la microstructure du matériau. Le recuit simulé vise à reproduire numériquement les phénomènes thermodynamiques qui se déroulent lors du recuit pour obtenir le nouvel état du matériau (obtenu en minimisant son énergie). Il a été développé par [89] et emploie l'algorithme de Metropolis [105] qui permet de décrire l'évolution d'un système thermodynamique. Par analogie avec le phénomène physique, l'algorithme de recuit simulé cherche à minimiser la fonction objectif (qui, par analogie avec le phénomène physique, serait l'énergie du système) par le biais d'un variable interne (qui serait la température). Cet algorithme assure une exploration à la fois aléatoire (l'algorithme de Metropolis cherche à reproduire le phénomène aléatoire de ré-agencement des atomes au sein du matériau basé sur l'équation de Boltzmann) et contrôlée afin de converger vers le minimum global en évitant les minima locaux (c'est ce qui se produit lorsque l'on refroidit de manière contrôlée la pièce pour atteindre l'état le plus stable à énergie minimale dans le matériau).

Dans la seconde famille d'algorithmes, on distinguera les algorithmes évolutionnaires, s'inspirant de phénomènes d'évolution en biologie et ceux d'intelligence en essaim inspirés des mode de déplacement de groupe d'insectes.

- Les méthodes évolutionnaires sont des méthodes stochastiques basées sur l'analogie avec la théorie de la sélection naturelle de Darwin : les individus les plus performants d'une population ont une plus grande probabilité de survivre et d'engendrer des descendants encore plus résistants. Le mimétisme de ce constat peut être obtenu numériquement en considérant les individus de la population comme des jeux de solutions potentielles à l'itération k , $\mathbf{x}_{k_i}$ (i étant l'indice de chaque individu dans la population). La « performance » de chaque individu est mesurée par la valeur de la fonction objectif (ou par une fonction pénalisée lorsqu'on traite des problèmes avec contraintes). L'algorithme ainsi conçu considère une population initiale et un ensemble d'opérations de sélection, de croisement et de mutation. Il se déroule ensuite en trois phases :
 1. tout d'abord, certains individus de la population sont choisis pour leurs performances (en fonction de la valeur de la fonction objectif qui leur est associée),
 2. puis par croisement de ces individus, de nouveaux individus sont créés,
 3. finalement, une perturbation aléatoire des individus (mutation) permet de générer la population.

L'algorithme continue itérativement jusqu'à convergence (régie par un critère

d'arrêt).

- Les méthodes basées sur l'intelligence en essaims sont fondées sur le comportement de certaines espèces animales. Plus précisément, certaines espèces qui vivent en colonie (de 2 ou plusieurs membres) adoptent un comportement de groupe pour assurer leur survie. Chaque individu (on parle également « d'agents ») du groupe semble avoir un comportement autonome mais celui-ci est au service du groupe, ce qui lui permet, par exemple, d'atteindre un endroit qu'un individu seul ne pourrait atteindre. L'étude et l'adaptation informatique de ces comportements a donné lieu à la création de nombreuses stratégies d'optimisation regroupées sous le terme générique d'intelligence en essaim. Actuellement, de nombreux algorithmes basés sur le principe de l'intelligence en essaim sont développés. Néanmoins deux implémentations sont très utilisées : celle des colonies de fourmis et celle des essaims particuliers. Pour plus de détails le lecteur pourra consulter [85].

4.1.6 Particularités des problèmes multi-objectifs

Les problèmes multi-objectifs $\mathcal{P}_{\text{MultiObj}}$ sont fréquents en ingénierie mécanique car ils traduisent le besoin de minimiser simultanément des critères d'optimisation souvent antagonistes.

Généralement ces problèmes n'admettent pas une solution unique (même s'il s'agit d'un problème convexe), mais un ensemble de solutions, l'ensemble des meilleurs compromis au sens du critère d'Edgeworth-Pareto.

Toutes les solutions de cet ensemble sont telles qu'aucune diminution d'une composante $f_i(\mathbf{x})$ du vecteur de fonctions objectifs $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), \dots, f_i(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})]$ ne peut être obtenue sans augmentation d'au moins une autre composante du vecteur de fonctions objectifs.

La figure 4.1 propose une illustration du front de Pareto dans le cas d'un problème avec deux fonctions objectifs. Le front de Pareto correspond à une partie des frontières de $\mathcal{D}_f$, l'image du domaine des solutions $\mathcal{D}$ du problème d'optimisation. Sur les segments $[P_2, P'_2]$ et $[P_1, P'_1]$ on constate bien que toute diminution de $f_1(\mathbf{x})$ est traduite par une augmentation de $f_2(\mathbf{x})$. Sur le segment $[P'_2, P'_1]$, qui ne fait pas partie du front de Pareto ce critère n'est pas vérifié. Les méthodes d'obtention du front de Pareto peuvent être

4.1.6.1 Les méthodes dites « directes »

Dans ces méthodes, le problème d'optimisation multi-critères $\mathcal{P}_{\text{MultiObj}}$ est résolu comme un problème mono critère. Par exemple, [87] propose de définir une fonction « d'agrégation » du type :

$$f_{\text{Agreg}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^p \psi_i f_i(\mathbf{x}) \text{ avec } 0 \leq \psi_i \leq 1 \forall i = 1 \dots p \text{ et } \sum_{i=1}^p \psi_i = 1$$

On peut obtenir le front de Pareto en faisant varier les valeurs des coefficients ψ_i en résolvant le problème mono critère où l'on minimise $f_{\text{Agreg}}(\mathbf{x})$ pour chaque ensemble

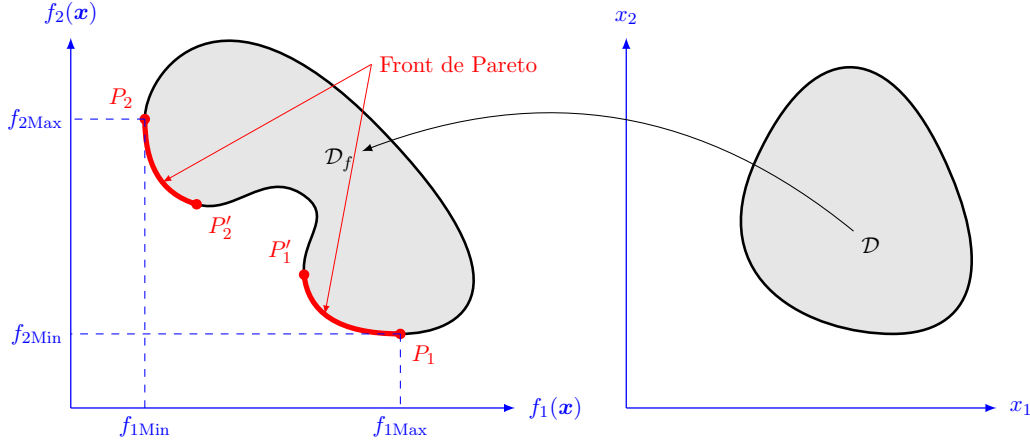


FIGURE 4.1 – Front de Pareto : exemple dans le cas de deux fonctions objectifs

de valeur de ψ_i . Cette méthode est simple mais elle ne permet pas de capturer toutes les parties du front de Pareto surtout si celui-ci n'est pas convexe comme dans le cas de la figure 4.1.

Il est aussi possible de modifier l'expression du problème d'optimisation par l'ajout de contraintes inégalités formulées à partir des fonctions objectifs, ce qui se traduit par :

$$\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}(\varphi) : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ f_k(\mathbf{x}) \quad \forall k \in [1 \dots p] \\ \text{Sous les contraintes} \\ f_l(\mathbf{x}) \leq \varphi_l \quad l = [1 \dots k-1, k+1 \dots p] \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1 \dots m \\ c_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = m+1 \dots m+l \end{cases} \quad \text{avec : } \begin{cases} \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \\ f(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \\ c_j(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

On obtient alors le front de Pareto en résolvant le problème d'optimisation mono-objectif paramétrique $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}(\varphi)$. Cette méthode nécessite de déterminer en premier lieu les bornes de l'espace du vecteur de paramètres $\varphi = [\varphi_1 \dots \varphi_{k-1}, \varphi_{k+1} \dots \varphi_p]$. Ces bornes correspondent au minimum et au maximum de chacune des fonctions objectifs $f_k(\mathbf{x})$, $k = [1, \dots, p]$. La précision de description du front de Pareto dépendra alors de l'échantillonnage du vecteur de paramètres φ et de la capacité de l'algorithme d'optimisation à fournir un optimum global pour $\mathcal{P}_{\text{MonoObj}}(\varphi)$.

Enfin nous citerons la technique proposée par [39] dite « NBI » (Normal Boundary Intersection) qui consiste à formuler à partir du problème $\mathcal{P}_{\text{MultiObj}}$ le problème d'optimisation mono objectif $\mathcal{P}_{\text{NBI}}(\varphi)$ suivant :

$$\mathcal{P}_{\text{NBI}}(\mathbf{w}) : \begin{cases} \text{Maximiser} \\ f_{\text{NBI}}(\mathbf{x}, \iota) = \iota \\ \text{Sous les contraintes} \\ c_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1 \dots m \\ c_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = m + 1 \dots m + l \\ \Upsilon \cdot \mathbf{w} + \iota \cdot \boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{f}^* \end{cases} \quad \text{avec :} \begin{cases} \iota \in \mathbb{R} \\ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \\ (\mathbf{f}(\mathbf{x}), \boldsymbol{\tau}, \mathbf{w}) \in \mathbb{R}^p \\ c_j(\mathbf{x}) \in \mathbb{R} \\ \Upsilon \in \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p \end{cases}$$

Dans cette formulation $\mathbf{f}^* = [f_1(\mathbf{x}_1^*) \dots f_k(\mathbf{x}_k^*) \dots f_p(\mathbf{x}_p^*)]$ est le vecteur des minimums de chaque fonction objectif $f_k(\mathbf{x})$. Υ est une matrice $p \times p$ dont la $k^{\text{ième}}$ est le vecteur $\mathbf{f}(\mathbf{x}_k^*) - \mathbf{f}^*$. Le vecteur $\mathbf{w} = [w_1 \dots w_p]$ est tel que $\sum_i w_i = 1$. Ce vecteur représente les p paramètres du problème $\mathcal{P}_{\text{NBI}}(\mathbf{w})$. En résolvant le problème $\mathcal{P}_{\text{NBI}}(\mathbf{w})$ pour des valeurs de w_i comprise entre 0 et 1 on obtient des solutions qui balayent le front de Pareto.

La figure 4.2 présente une illustration d'algorithme « NBI » pour le cas d'un problème à deux objectifs. Dans le cas de la figure on remarquera que l'algorithme « NBI » permet d'obtenir toute la frontière du domaine $\mathcal{D}_f$ située entre P_1 et P_2 . Pour obtenir le front de Pareto, c'est à dire l'ensemble des « morceaux » de frontière non connexe de la figure 4.1, $[P_2, P'_2]$ et $[P_1, P'_1]$, il suffira de « filtrer » les parties de frontière n'appartenant pas au front de Pareto [104].

4.1.6.2 Les méthodes dites « indirectes »

Les méthodes dites « indirectes » (MOGA, NSGA-II, SPEA) au sens où le problème d'optimisation multicritères n'est pas résolu. Ces méthodes utilisent toutes des heuristiques et s'appuient sur les algorithmes évolutionnaires. Le front de Pareto est construit itérativement, par des mécanismes appropriés les individus les moins proches du front de Pareto (les dominés dans le langage consacré) sont remplacés progressivement par les individus les plus proches (les dominants). Ces méthodes n'offrent en général aucune garantie de fournir « une bonne approximation » de ce front mais les tests faits sur de nombreux problèmes montrent en moyenne des bons résultats [7, 75].

4.1.7 Méta-modèles, plans d'expériences

Lorsque l'évaluation du ou des modèles physiques sur lesquels s'appuie le processus d'optimisation est trop couteuse en temps de calculs, il d'usage d'avoir recourt à des « modèles de modèles » ou « méta-modèles » plus simple et moins couteux à évaluer. Pour construire ces « méta-modèles » est il nécessaire de disposer d'un nombre suffisant d'évaluations du modèle physique permettant de construire un méta-modèle suffisant proche du modèle physique sur l'ensemble du domaine des solutions $\mathcal{D}$ du problème d'optimisation.

Les techniques permettant d'évaluer de modèle physique sur l'ensemble $\mathcal{D}$ de manière pertinente et en essayant de minimiser le nombre d'évaluation relève des

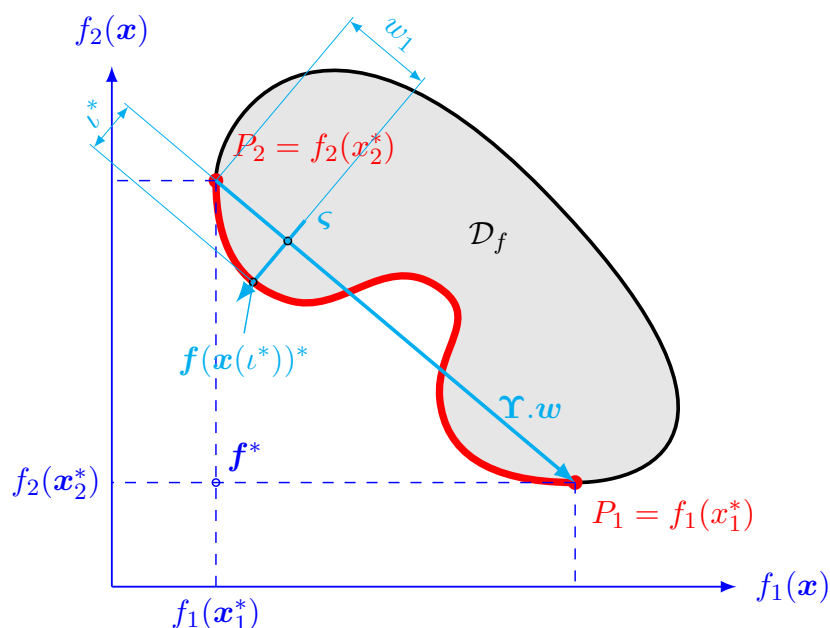


FIGURE 4.2 – Front de Pareto : exemple dans le cas de deux fonctions objectifs

plans d'expériences numériques. Il existe de nombreuses techniques permettant de définir des plans d'expérience numériques. Les techniques classiques dites « full factoriel » permettent d'explorer systématiquement l'espace des solutions $\mathcal{D}$ mais pour des espaces de grande dimension (ici n , la dimension du vecteur variables $\mathbf{x}$) et/ou avec p facteurs le nombre d'évaluations est p^n et croît exponentiellement. Il existe de nombreuses techniques pour limiter la taille du plan d'expériences, on trouvera dans [136] une présentation détaillées de celles-ci.

De même il existe de nombreuses techniques de construction de méta- modèles, on peut distinguer 3 catégories de techniques :

- Les techniques de régression, permettant de définir un méta-modèles passant

au mieux par les évaluations du plan d'expériences.

- Les techniques d'interpolation, permettant de définir un méta-modèles passant exactement par les évaluations du plan d'expériences.
- Les techniques mixte permettant à la fois de faire de la régression ou de l'interpolation.

On trouvera dans [94] une présentation synthétique de ces techniques de méta-modélisations.

4.1.7.1 Métriques d'erreur

Ces métriques mesurent la distance entre le modèle physique et le méta-modèle. Elle permettent de quantifier cet écart et renseignent sur la « qualité » du méta-modèle.

En effet, même si dans le cas d'un méta-modèle interpolant, par exemple, rien de ne garantit qu'entre deux points d'évaluation, le méta-modèle est proche du modèle physique. Dans ce cas on utilisera des points d'évaluation différents de ceux qui ont servis à la construction du méta-modèle.

Dans le cas de méta-modèle de régression on pourra par contre calculer la métrique d'écart en utilisant les points d'évaluation, et la métrique nous renseignera sur l'écart entre le méta-modèle et le modèle physique.

On trouvera dans [94] et [110] des détails sur l'expression de cette différente métriques d'erreur.

4.1.8 Couplage de méta-modèles et d'algorithmes d'optimisation

L'utilisation de méta-modèle dans un processus d'optimisation se conçoit suivant deux démarches :

- Une démarche que l'on pourrait qualifier de « séquentielle », dans la laquelle on a les étapes suivantes :
 1. Définition d'un plan d'expérience numériques sur le domaine des solutions $\mathcal{D}$ du problème.
 2. Construction des méta-modèles associés à chaque modèle physique utilisés dans la formulation du problème d'optimisation.
 3. Lancement du processus d'optimisation dans lequel toutes les évaluations sont faites à partir des méta-modèles.
- Une démarche que l'on pourrait qualifier de « couplée » dans la laquelle le méta-modèle est construit et mis au cours du processus d'optimisation. Cette démarche est pour l'instant implémentée avec un meta-modèle de type « krigage » et utilise un « prédicteur » permettant d'estimer le point d'évaluation du modèle physique permettant d'améliorer au mieux le méta-modèle [90].

4.2 L'influence du modèle hydrodynamique sur les résultats de l'optimisation

L'un des éléments primordial pour choisir la démarche d'optimisation d'un problème mécanique est de connaître les coûts de calcul des différentes équations utilisées dans les fonctions objectifs et contraintes. Dans le domaine côtier nous sommes intéressés principalement à la distribution des vagues dans le port, et à leurs forces agissant sur ses structures. Le modèle hydrodynamique est la composante la plus importante qui aide à clarifier l'adaptation des solutions proposées aux conditions structurelles et fonctionnelles de sécurité portuaire. Le modèle devient plus complexe afin de prendre en compte plus de phénomènes maritimes pour rendre la simulation numérique la plus proche de la réalité physique. L'approche de simulation numérique est nécessaire parce que la propagation des fluides dans un domaine vaste, varié et complexe est guidée par des équations différentielles étroitement reliées. Les dimensions du domaine portuaire sont une autre source de difficulté numérique. Le maillage contient beaucoup d'éléments de calcul, c'est qui rend le calcul plus long. Des efforts excessifs de calculs sont alors nécessaires pour résoudre un modèle hydrodynamique sophistiqué. En plus, le nombre de possibilités à tester avant de choisir une conception optimale des brise-lames dans ce domaine large est très grand. Nous allons essayer de trouver la solution pour obtenir un coût minimum possible dans un domaine où les coûts d'investissement sont gigantesques. Pour réduire au minimum le coût de calcul, les auteurs ont travaillé sur un grand nombre d'approches. Ils ont utilisé des techniques d'optimisation qui ont permis de trouver la solution optimale dans un temps de calcul raisonnable. Ils ont souvent choisi d'abandonner un grand nombre de phénomènes qui se produisent dans les océans pour utiliser un modèle hydrodynamique léger.

Dans notre travail, et pour mieux définir la démarche d'optimisation qu'on doit utiliser, on a essayé de comprendre l'importance de chaque composante et son influence sur les résultats. Pour cela on a testé les différents degrés de complexité du modèle de Berkhoff représenté dans la section 3.3 pour déterminer comment les phénomènes dissipatifs et les types des vagues incidentes affectent la solution optimale, et si la réduction du coût de la solution optimale justifie l'augmentation dans le temps de calculs.

Pour cela, nous ferons référence à une étude d'optimisation du brise-lames fixe basée sur l'algorithme génétique [54]. Elle minimise le volume de brise-lames nécessaire pour protéger une zone portuaire soumis à une contrainte de perturbation maximale acceptable des vagues. Le calcul de cette perturbation est le résultat de la résolution de l'équation de Berkhoff simple (3.10) dans tout le domaine.

Le problème d'optimisation vise à trouver le vecteur de l'ensemble des variables de conception $\mathbf{x}$ qui se réfère aux coordonnées des extrémités du brise-lame optimal $P_1 P_2$ dans le domaine $\mathcal{D}$. Il peut être représenté mathématiquement par $\min_{\mathbf{x}} f_{obj}(\mathbf{x})$ soumis à la contrainte $c(\mathbf{x}) \leq 0$ avec $\mathbf{x} = (x_{P_1}, y_{P_1}, x_{P_2}, y_{P_2})$.

La largeur est égale pour tous les brise-lames. L'équation objectif est alors le vo-

lume du brise-lames en $[m^2.m \text{ largeur}]$, il est calculé par intégration de la profondeur $p(x, y)$ le long du segment décrivant le brise-lames :

$$f_{obj}(\mathbf{x}) = \int_0^1 p(x_{P_1} + u(x_{P_2} - x_{P_1}), y_{P_1} + u(y_{P_2} - y_{P_1})) du \quad (4.1)$$

La contrainte de perturbation dans la zone portuaire demande que les vagues à l'intérieur de la zone à protéger (Z.P.) bien délimitée ne dépassent pas un seuil maximal acceptable qui garantit la sécurité opérationnelle du port H_{op} ,

$$c(\mathbf{x}) = \frac{\max_{(x,y) \in Z.P} (H(x, y))}{H_{op}} - 1 \leq 0 \quad (4.2)$$

D'autres contraintes dépendent des conditions de navigation ont été prises en compte implicitement en définissant le domaine des solutions $\mathcal{D}$. Le domaine géométrique des brise-lames a été définie en gardant une distance suffisante avec les structures existantes.

Trois cas représentatifs ont été utilisés pour faire les tests. Le premier est un port en eau profonde où le changement rapide de la bathymétrie et le frottement au fond ont été testés. Ensuite, un port peu profond a été considéré pour tester l'effet de déferlement de vagues. Enfin, un cas plus simple à définir, situé en pleine mer, a été utilisé pour étudier l'influence de l'incidence aléatoire des vagues. Dans chaque cas, le domaine avec une bathymétrie approprié sont définis. La zone à protéger est choisie. avec le domaine qui contient l'ensemble des solutions possibles.

Pour chaque cas, une solution avec le modèle de Berkhoff de base a été cherchée pour être la référence de comparaison. Un total de 7 essais d'optimisation ont été faits. Ces différents essais sont présentés dans le tableau 4.1. Tous les essais ont été effectués sur une machine core i5-3210M CPU @ 2.50GHz 6GB RAM. Nous avons utilisé la fonction de l'algorithme génétique « ga » dans l'outil de l'optimisation globale de MATLABTM. Dans tous ces essais, Les populations initiales ont été formées des 50 individus et le nombre des générations maximale alloué au calcul a été 200.

Tableau 4.1 – Liste des essais pour tester l'influence du modèle hydrodynamique sur l'optimisation.

	Port profond	Port peu profond	Port en pleine mer
Berkhoff de base	✓	✓	✓
Berkhoff étendus	✓	•	•
Frottement au fond inclus	✓	•	•
Déferlement inclus	•	✓	•
Vagues aléatoires	•	•	✓

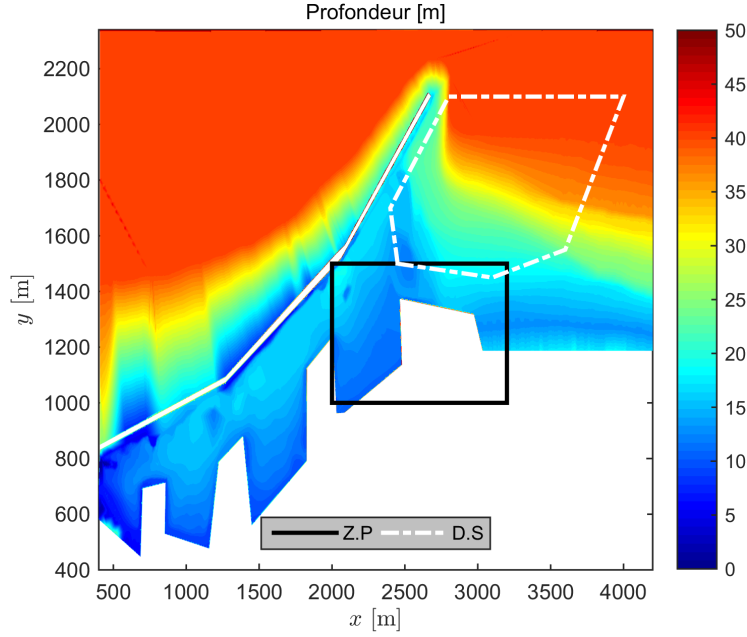


FIGURE 4.3 – Le domaine du port profond

4.2.1 Cas du port profond

Pour le cas du port profond, le cas étudié par Elchahal et al. [54] sur le port du Beyrouth a été considéré. La figure 4.3 montre le domaine du port, avec sa bathymétrie. La zone à protéger est définie également sur la même figure avec le domaine des solutions ou une distance de 100 m entre ce domaine et les brise-lames existants a été laissée.

La houle incidente vient du côté de Nord-est faisant un angle $\theta_I = 225^\circ$ avec l'axe des x . Elle a une hauteur $H_I = 3$ m et une période $T = 9$ s. Le côté ouest est un côté de rayonnement ouvert sur la mer. Les frontières de réflexion ont un coefficient de réflexion $R = 0.33$ sans aucun délai. Le coefficient de frottement au fond est $f_w = 0.1$. La hauteur maximale des vagues autorisée dans la zone à protéger est $H_{op} = 0.5$ m.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.4 où la convergence de la fonction objective est présentée dans la figure 4.4a. Les figures 4.4b, 4.4c et 4.4d représentent respectivement les solutions optimales calculées avec le modèle de Berkhoff de base, Berkhoff étendu et Berkhoff avec frottement au fond inclus. Ces résultats sont résumés dans le tableau 4.2.

4.2.2 Cas du port peu profond

Puisque le déferlement ne se produise que dans les eaux peu profonde, le port présenté dans la section 3.7.1.4 est considéré dans ce cas. La figure 4.5a montre le domaine du port, avec sa bathymétrie. La zone à protéger est définie également sur

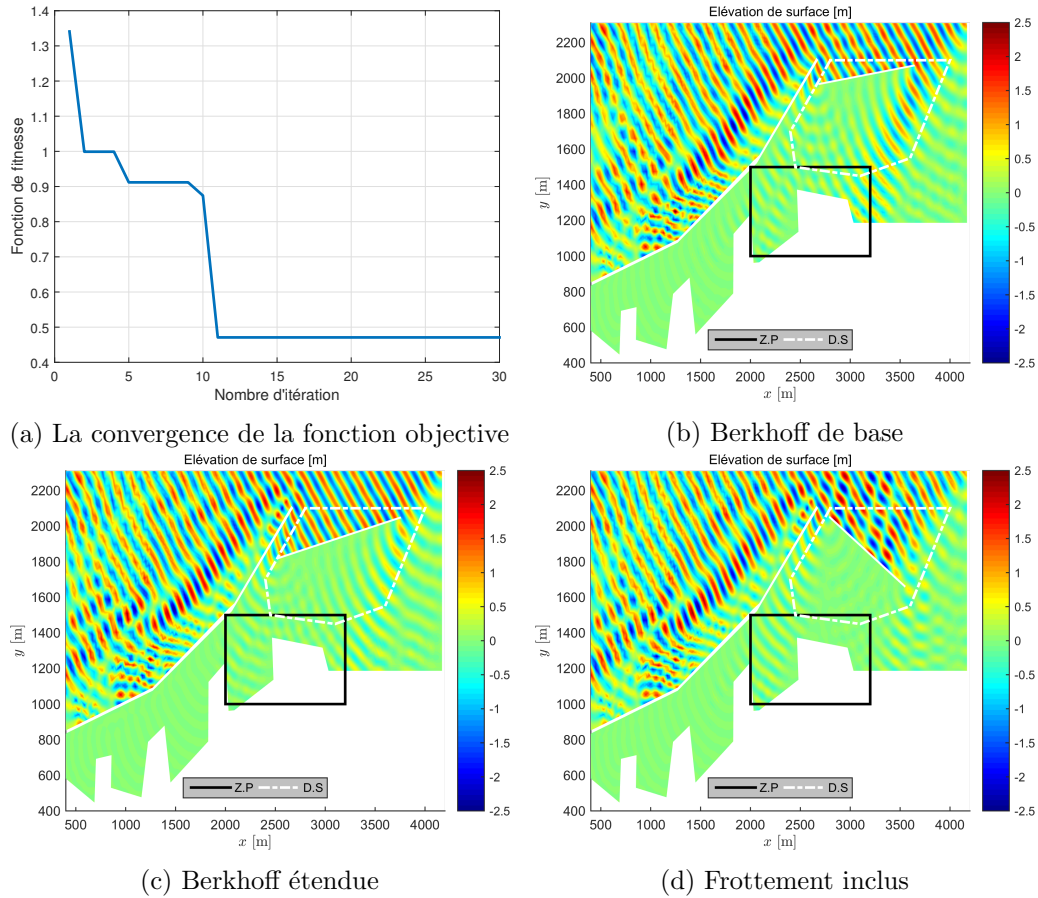


FIGURE 4.4 – Les résultats du cas de port profond.

Tableau 4.2 – Les résultats du cas de port profond.

	Référence	Berkhoff étendu	Frottement au fond
Temps de calcul [s]	1119	1206	7100
Volume du brise-lames [m ² .m largeur]	30 000	38 000	28 000

la même figure avec le domaine des solutions. La houle incidente vient du côté Sud-ouest faisant un angle de $\theta_I = 45^\circ$ avec l'axe des x . Elle a une hauteur $H_I = 2$ m et une période $T = 4$ s. Le côté de l'est est un côté de rayonnement ouvert sur la mer. Les frontières de réflexion ont un coefficient de réflexion $R = 0.33$ sans aucun délai. La hauteur des vagues maximale autorisée dans la zone à protéger est $H_{op} = 0.5$ m. Le phénomène de déferlement se produise dans les zones montrées sur la figure 4.5b. La solution de référence est montrée par la figure 4.6a et la solution obtenue après l'addition de l'effet de déferlement est montrée sur la figure 4.6b. Les différences entre ces deux solutions sont montrées dans le tableau 4.3.

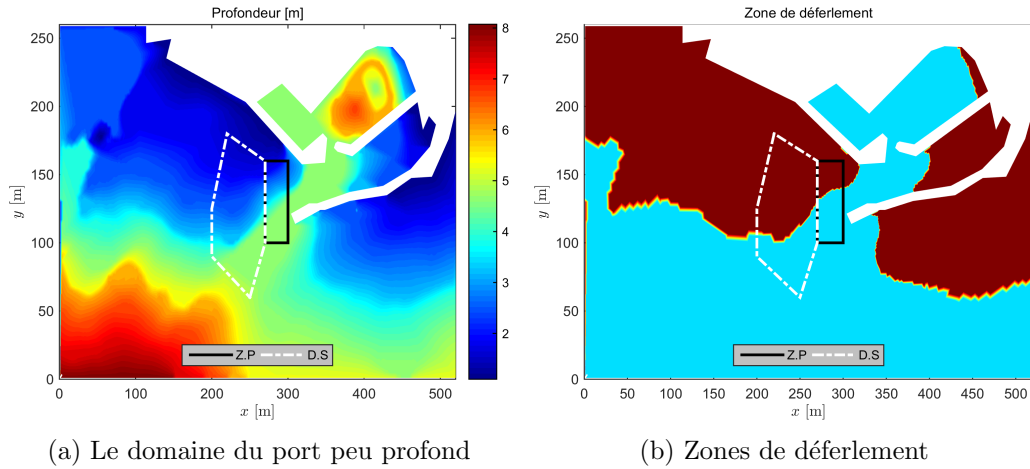


FIGURE 4.5 – Le domaine de port peu profond.

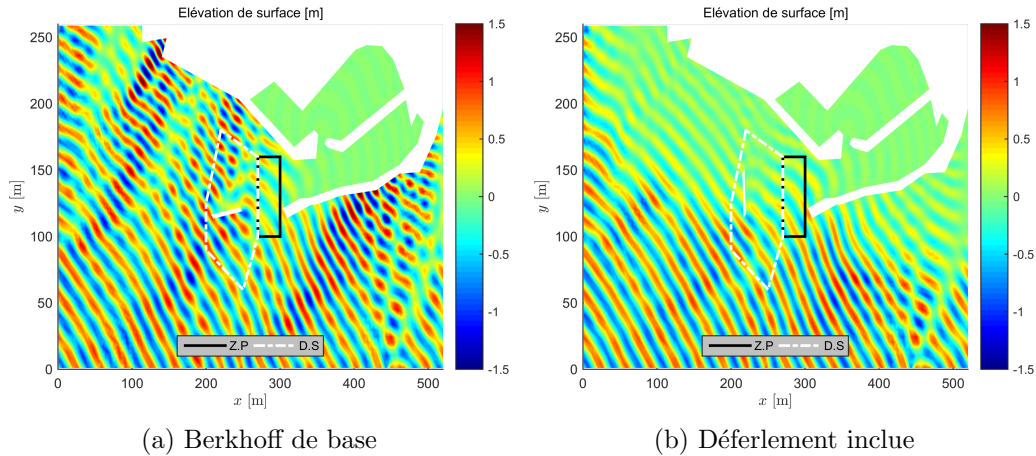


FIGURE 4.6 – Les résultats du cas du port peu profond.

Tableau 4.3 – Les résultats du cas de port peu profond.

	Référence	Déferlement
Temps de calcul [s]	2290	16 900
Volume de brise-lames[m ² .m largeur]	120	80

4.2.3 Cas du port en pleine mer

En fin, pour tester l'effet de l'incidence aléatoire des vagues multifréquences, le cas d'un port en pleine mer a été considéré.

Ces types de ports sont des terminaux en pleine mer où les énormes pétroliers sont ancrés pour pomper du pétrole ou du gaz par des tuyaux vers les réservoirs terrestres. Le cas du Dier Amar au Liban (Figure 4.7) est un exemple réel de tels terminaux. Afin d'assurer la sécurité de l'opération, les brise-lames sont construits en avant pour atténuer l'énergie des vagues au niveau du terminal.

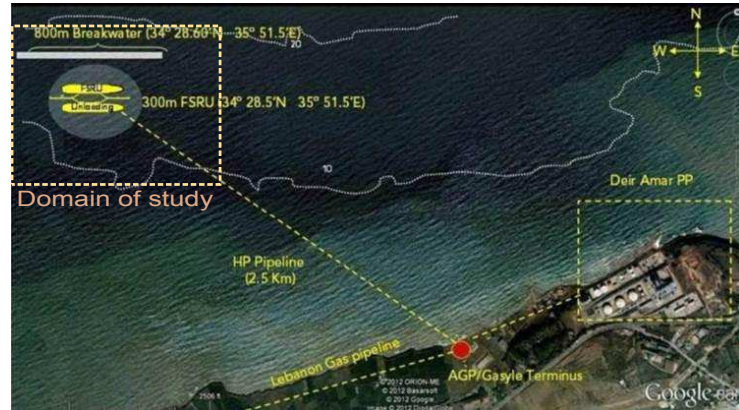


FIGURE 4.7 – Le terminal en pleine mer - Dier Amar / Liban

La bathymétrie du domaine est illustrée par la figure 4.8, où le domaine des solutions est définie avec la zone à protéger.

Les vagues incidentes viennent du côté Nord-ouest faisant un angle $\theta_I = 315^\circ$ avec l'axe des x . Elles ont une hauteur significative $H_s = 2.8\text{m}$ et une période de pic $T_p = 10.4\text{s}$. Les côtés est et nord sont des côtés de rayonnement ouvert sur la mer. Les frontières de réflexion (les frontières de brise-lames) ont un coefficient de réflexion $R = 0.33$ sans aucun délai. La hauteur des vagues maximale autorisée dans la zone à protéger est $H_{op} = 0.5\text{m}$.

La solution de référence est montrée sur la figure 4.9a et la solution obtenue sous l'incidence aléatoire est montrée sur la figure 4.9b. Les différences entre ces deux solutions sont montrées dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 – Les résultats du cas du port en pleine mer.

	Référence	Incidence aléatoire
Temps de calcul [s]	13 500	60 600
Volume de brise-lames [$\text{m}^2 \cdot \text{m}$ largeur]	51 000	40 000

4.2.4 Conclusion

Pour le changement rapide de la bathymétrie, les résultats montrent que le volume du brise-lames est plus grand par rapport à ce qu'il était dans le cas référence. C'est logique, car le changement rapide de la bathymétrie dans un domaine avec de grands pentes et courbures perturbe le champ des vagues et généralement sous-estime la quantité de l'énergie des vagues. Il est donc évident que l'algorithme aura tendance à générer un brise-lames plus grand que celui du cas référence .

Ces résultats montrent également que le paramètre de changement rapide a légèrement affecté le temps de calcul. De ce point, il est recommandé toujours de

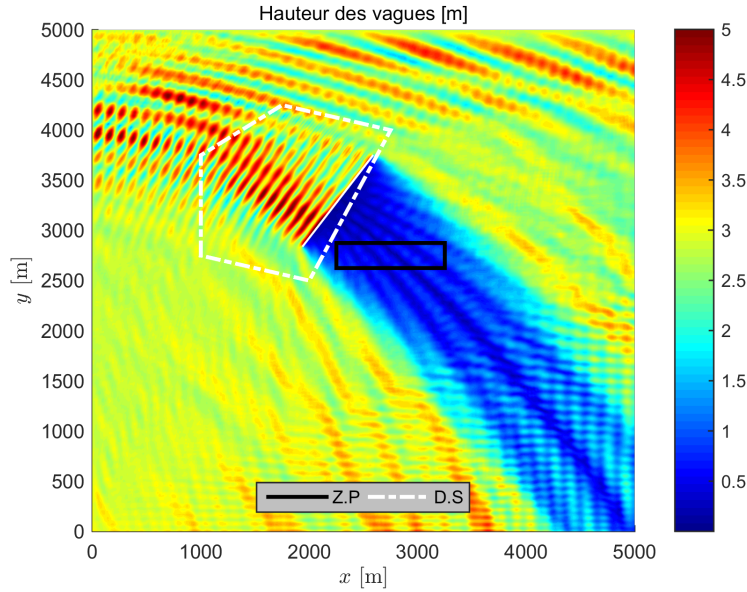


FIGURE 4.8 – Le domaine du port en pleine mer

le prendre en considération.

La solution optimale obtenue en considérant le frottement au fond montre que, dans ce cas, le volume du brise-lames a été moins important que celui du cas de référence, mais le temps du calcul a augmenté d'une façon significative à cause de la résolution de l'équation différentielle non linéaire qui décrit le potentiel de vitesse dans le cas de dissipation (3.20). Ces résultats montrent que l'ignorance d'un phénomène dissipatif comme le frottement au fond provoque une surestimation de la solution.

Du même pour l'autre phénomène dissipatif qui est le déferlement. Si on ne prend pas en compte l'énergie dissipée dans la zone de déferlement, la solution va être sensiblement surestimée. Le temps du calcul est lui-même sensiblement plus grand.

L'incidence aléatoire des vagues affecte sévèrement le temps de calculs ; il est N fois plus grand qu'une vague monochromatique, où N est le nombre des vagues représentatives. Elle a une grande influence aussi sur le volume du brise-lames qui avait été réduit de 21 %. Ces résultats montrent qu'il ne faut pas substituer une analyse complète d'une vague aléatoire par une approximation de vague monochromatique qui a une hauteur des vagues égale à H_s et période égale à T_p .

Tous ces résultats, qui sont résumés par la figure 4.10, montrent l'importance d'introduire les phénomènes physiques différentes dans la conception des brise-lames. Une solution qui ne sous-estime pas et qui ne surestime l'influence de ces phénomènes, va aider à bien protéger le port et le rendre opérationnel pour une plus longue durée avec un coût d'investissement limité.

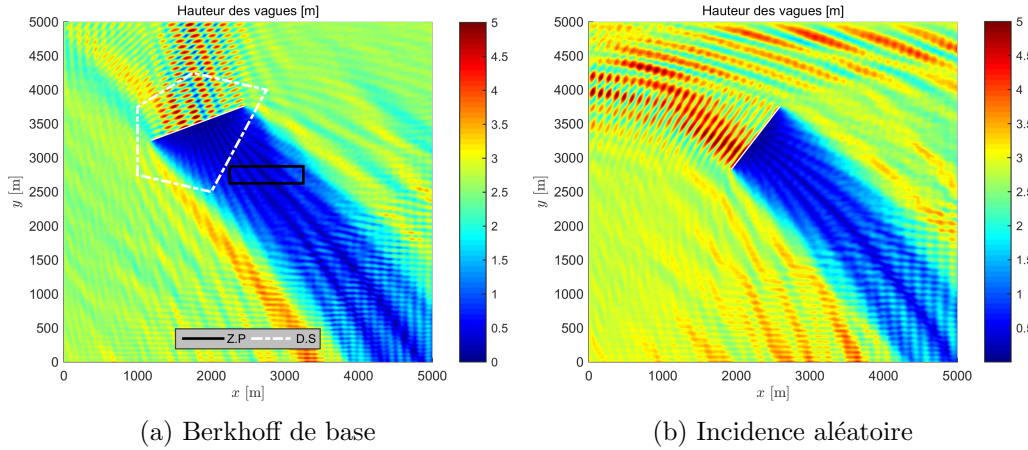


FIGURE 4.9 – Les résultats du cas du port en pleine mer.

4.3 L'optimisation des brise-lames flottants

La section précédente a montré l'importance d'introduire le plus de phénomènes maritimes afin de mieux concevoir les brise-lames. Ceci nous permet de mieux justifier l'importance d'optimiser les brise-lames flottants en les évaluant à l'aide du modèle 2.5D proposé dans la section 3.5. Mais le modèle hydrodynamique d'évaluation des performances des brise-lames flottants proposé dans la section 3.5 est basé sur deux modèles différents et nécessite trois résolutions numériques pour chaque évaluation d'un brise-lames. En ajoutant l'influence de complexité du modèle sur le temps du calcul montrée dans la section 4.2 on peut souligner l'un des défis de ce travail. Comment est-il possible d'optimiser la conception d'un brise-lames flottant dans un domaine portuaire complexe avec un temps du calcul raisonnable ? Le problème va être bien défini afin des récupérer les maximum possible d'information après son résolution. D'autre part, la démarche doit être cohérente avec le modèle d'une manière qu'il rend la convergence plus rapide.

4.3.1 Définition du problème d'optimisation

Le problème à résoudre, comme il est montré à la fin du chapitre 3, est formé de plusieurs variables qui varient d'une manière parfois liées et parfois non. Sa nature nous pousse vers l'utilisation d'un algorithme stochastique. Nous avons choisis l'algorithme génétique qui cherche par tous dans le domaine des solutions sans avoir être coincé sur des minimums locaux. La figure 4.11 présente la position qui le modèle hydrodynamique occupe dans l'algorithme. Il est au cœur du problème.

Une conception optimale d'un brise-lames dans un port doit être soumise à toutes les contraintes précitées dans le chapitre 2. Les contraintes considérées comme des fonctions de performance du système sont prises comme des fonctions objectifs. Celles qui sont fonctionnelles sont considérées comme des contraintes à respecter durant la conception. Parfois, on peut éliminer une ou plusieurs de ces contraintes

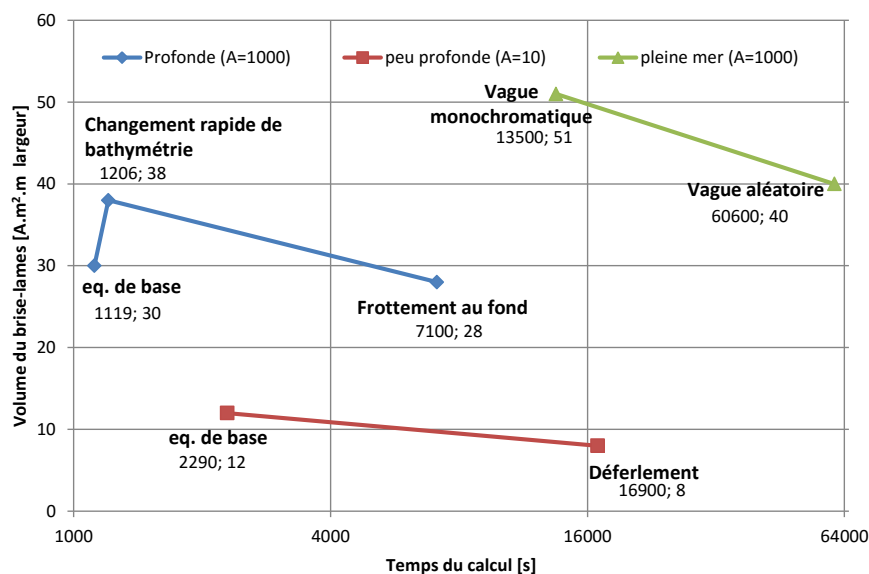


FIGURE 4.10 – Le coût des brise-lames proposée par rapport au temps du calcul consommé.

en fonction des considérations de cas. En plus, autres contraintes pourraient ne pas avoir d'influence dans certains cas, comme le problème de givrage de surface de la mer, qui n'existe pas dans la plupart des ports du monde. Beaucoup d'autres contraintes pourraient être éliminées si leurs influences sont considérés comme négligeables ou sans importance pour le concepteurs.

Un problème global doit être proposé au début de toute nouvelle étude et un processus d'élimination des contraintes doit être appliqué pour déterminer les contraintes indispensables pour formuler le problème d'optimisation.

Les contraintes prises en considération dans la définition du problème d'optimisation et le type de ces contraintes, auront un effet sur l'effort de calcul nécessaire pour trouver la solution optimale dans un temps raisonnable.

4.3.1.1 Les variables d'optimisation

Les brise-lames flottants sont définis dans le domaine des solutions $\mathcal{D}$. Ils sont représentés par quatre variables dans le plan horizontal (Figure 4.12a) ; où : les deux coordonnées du point central du brise-lames (x_G, y_G) , la longueur du brise-lames L et l'orientation du brise-lames représentée par l'angle ξ entre le brise-lames et le vecteur normal à la propagation des vagues. Ces brise-lames sont définis dans le plan vertical comme montre la figure 4.13 par cinq variables (l, h, e_1, e_2, V_l) où l et h sont respectivement la largeur du brise-lames et sa hauteur totale. Tandis que les autres variables sont relatifs à la forme de la section du brise-lames. Afin de réduire le nombre de variables et puisque la différence entre e_1 et e_2 n'affecte que

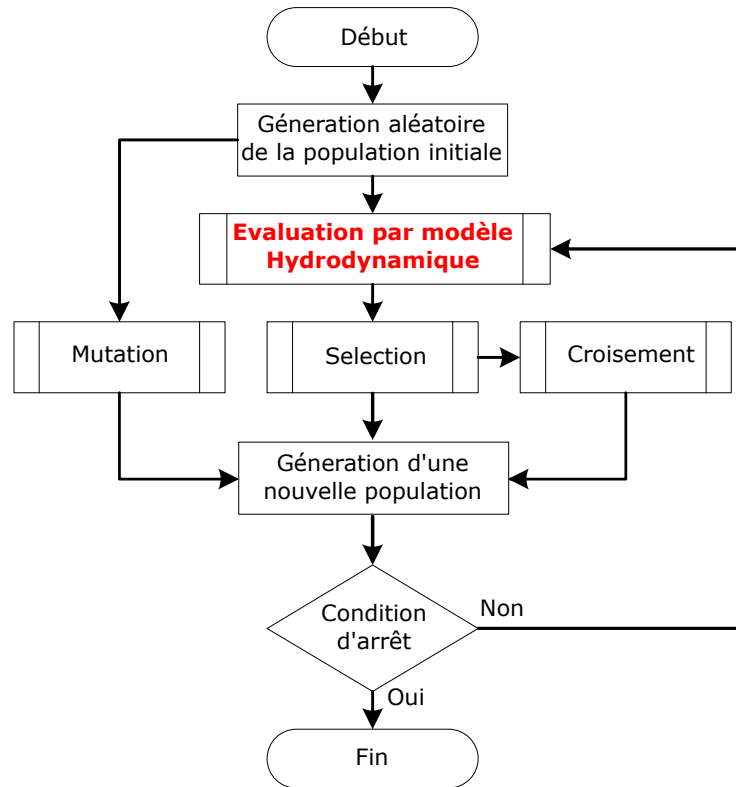


FIGURE 4.11 – L'algorithme génétique

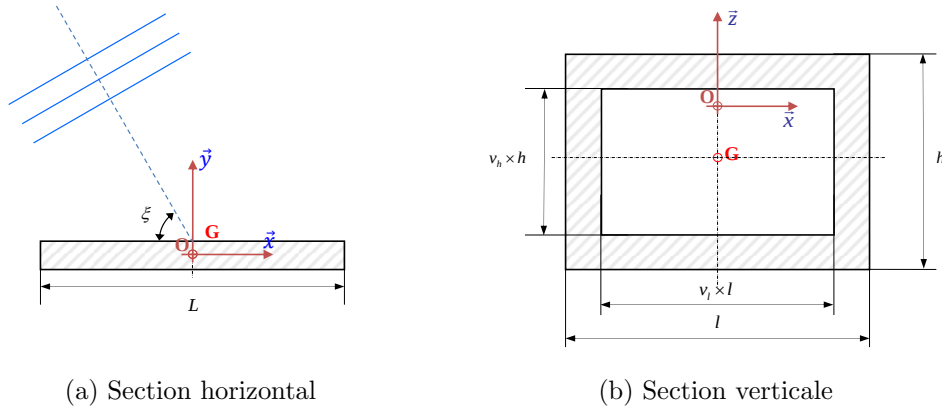


FIGURE 4.12 – Définitions du brise-lames flottant.

le moment d'inertie de la structure de manière quadratiquement proportionnelle au déplacement du centre de gravité, on a supposé que le brise-lames à concevoir est symétrique autour de son centre de gravité et que $e_1 = e_2$. Le brise-lames est alors défini maintenant dans le plan vertical par quatre variables. En outre, pour simplifier la génération aléatoire des individus et éviter la génération d'individus (un individu = une configuration de brise-lames) inapplicables où l'aire de vide serait

supérieure à la section du brise-lames lui-même, on a défini le brise-lames comme le montre la figure 4.12b en utilisant (l, h, v_h, v_l) où v_l et v_h sont respectivement la portion de vide par rapport à la largeur l et la hauteur h , où :

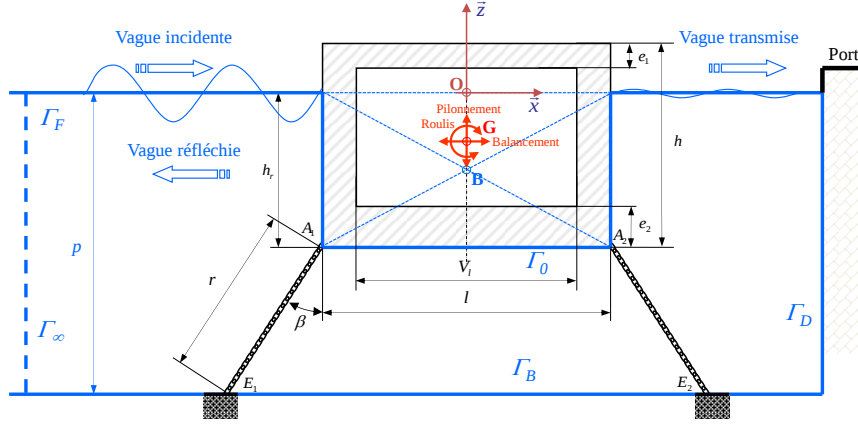


FIGURE 4.13 – Encienne définition du brise-lames flottant [50](Avec modifications)

$$\begin{aligned} e_1 = e_2 &= \frac{h(1 - v_h)}{2} \\ V_l &= lv_l \\ 0 &\leq v_h, v_l < 1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Le vecteur des variables à optimiser définissant un brise-lames flottant dans les deux plans est alors :

$$\mathbf{x} = (x_G, y_G, L, \xi, l, h, v_h, v_l). \quad (4.4)$$

4.3.1.2 Fonctions objectifs

Le principal critère utilisé pour le minimiser est le coût global de brise-lames [25, 49, 50, 51]. Ce coût est une fonction de nombreux variables tels que les matériaux, le processus de construction, la dimension du brise-lames, la distance du site de construction de la cote et la profondeur de l'eau là-bas. Cette fonction a été réduite au volume de la structure, alors que tous les autres variables sont considérés comme étant des constantes ou sans influence dans le contexte de notre étude [50].

En se référant aux variables du problème défini dans (4.4) la première fonction objectif s'écrit :

$$f_1(\mathbf{x}) = Llh(1 - v_h v_l) \quad (4.5)$$

La hauteur de vagues à l'intérieur du port, ou plus généralement dans la zone à protéger Z.P, a été considérée comme une contrainte prédéterminée selon le type de port et la nature des opérations menées à l'intérieur. Mais si le type de port n'est pas connu, ou s'il s'agit d'étudier de construction pour un nouveau port, il est plus intéressant de minimiser également la hauteur de vagues pour connaître

la capacité d'atténuation maximale des vagues. La hauteur des vagues à l'intérieur du port définira alors les opérations portuaires envisageable. Plus généralement le coefficient de transmission (3.66) dans la Z.P est la hauteur maximale des vagues divisée par la hauteur de vague incidente. Un problème multi-objectif se définit alors où le coût de l'installation et le coefficient de transmission des vagues à l'intérieur du port sont simultanément minimisés. Ce problème multi-objectif va nous permettre d'avoir plus d'informations à partir de ces résultats. La contrainte de perturbation à l'intérieur du port devient un objectif et le front de Pareto nous aide alors à choisir sur la courbe obtenue le brise-lames le plus petit pour un coefficient de transmission donné. Le problème mono-objectif devient alors juste un cas particulier du problème multi-objectif. La solution du problème mono-objectif n'étant qu'un point du front de Pareto du problème multi-objectif.

Du même cette deuxième fonction objectif peut être écrite en fonction des variables d'optimisation comme suit :

$$f_2(\mathbf{x}) = \max_{(x,y) \in \text{Z.P}} (C_t(x, y)) \quad (4.6)$$

4.3.1.3 Les contraintes

Tout problème de conception du port doit prendre en compte plusieurs contraintes indispensables. Tandis que la présence des autres contraintes dépend de la nature du problème.

La contrainte géométrique Elle est le résultat des contraintes de navigation qui déterminent le domaine des solutions possibles. Un algorithme d'optimisation va chercher à l'intérieur de ce domaine pour trouver la meilleure définition du brise-lames. Cette contrainte ne constitue pas une équation de contrainte. Elle est juste utilisée pour aider à définir le domaine des solutions $\mathcal{D}$. La distance entre le nouveau brise-lames et les installations déjà existantes est l'un de ces facteurs. La largeur d'une entrée ou canal de navigation joue le même rôle aussi.

Parfois, si un brise-lames en plusieurs tronçons est en cours de conception, le gap entre deux brise-lames consécutifs peut faire l'objet d'une équation de contrainte.

La flottabilité des brise-lames flottants La dimension du brise-lames flottant et sa section transversale permet de calculer sa masse. La relation entre la masse et la surface horizontale du brise-lames sera déterminée en se basant sur la théorie d'Archimède. Une inéquation qui relie les dimensions externes aux dimensions internes avec la masse volumique de matériaux est utilisée.

Pour que la structure flotte, il faut que la masse des eaux déplacées soit égale à la masse de la structure. Le brise-lames atteint alors une position d'équilibre où la hauteur submergée du brise-lames h_r respecte la relation

$$h_r = \frac{Llh(1 - v_h v_l) \rho_m}{Ll \rho_e} \quad (4.7)$$

La contrainte de flottabilité est alors en fonction des variables v_h et v_l , puisque $h_r < h$ toujours :

$$c_1(\mathbf{x}) = 1 - v_h v_l - \frac{\rho_e}{\rho_m} < 0 \quad (4.8)$$

La résistance mécanique La résistance mécanique de la structure va permettre de déterminer les dimensions de la structure requise. Cette résistance permet de définir la largeur du brise-lames et sa section transversale pour résister aux forces statiques et dynamiques de la mer. Une inégalité qui relie l'épaisseur des parois du brise-lames à la résistance du matériau utilisé et les forces de pression appliquées sur la structure est utilisée. Cette contrainte est également responsable de la sélection du matériau [51].

Soit e_c l'épaisseur critique incluant un facteur de sécurité convenable pour que la structure supporte les forces due à la pression sur les parois selon la force des vagues incidentes et la résistance de matériaux utilisés. Il faudra que l'épaisseur des parois du brise-lames soit toujours supérieure à e_c .

$$\begin{aligned} \frac{h(1 - v_h)}{2} &> e_c \\ \frac{l(1 - v_l)}{2} &> e_c \end{aligned} \quad (4.9)$$

Les équations de la contrainte peuvent alors se présenter sous la forme :

$$c_2(\mathbf{x}) = e_c - \frac{h(1 - v_h)}{2} < 0 \quad (4.10)$$

$$c_3(\mathbf{x}) = e_c - \frac{l(1 - v_l)}{2} < 0 \quad (4.11)$$

Les équations (4.8, 4.10 et 4.11) montrent que v_h et v_l sont bien bornés entre deux valeurs minimale et maximale qui varient aussi entre 0 et 1.

Par conséquent, le problème d'optimisation multi-objectif de brise-lames flottants peut être défini mathématiquement comme :

$$\mathcal{P}_{\text{MultiObj}} : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ f_1(\mathbf{x}) = Ll h(1 - v_h v_l) \\ f_2(\mathbf{x}) = \max_{(x,y) \in \text{Z.P}} (C_t(x, y)) \\ \text{Sous les contraintes} \\ c_1(\mathbf{x}) = 1 - v_h v_l - \frac{\rho_e}{\rho_m} < 0 \\ c_2(\mathbf{x}) = e_c - \frac{h(1 - v_h)}{2} < 0 \\ c_3(\mathbf{x}) = e_c - \frac{l(1 - v_l)}{2} < 0 \end{cases} \quad \text{avec } \mathbf{x} \in \mathcal{D} \quad (4.12)$$

4.3.2 Démarche de l'optimisation

Afin de réduire le temps de calcul, on a cherché à définir une démarche d'optimisation cohérent avec le type du problème et qui prend en compte le calcul le plus coûteux du problème qui est l'évaluation hydrodynamiques des individus.

Notre démarche est basée sur deux principes :

La premier est de décomposer le problème en deux sous problèmes afin de déterminer les variables les plus importants et effectuer l'optimisation des brise-lames flottants avec un nombre réduit de variables. Cela devrait permettre de réduire sensiblement le temps de convergence. Pour la première étape et initialiser les calculs et définir une première population d'individus, une optimisation dans le plan horizontal à l'aide du modèle de Berkhoff est faite pour trouver les variables optimaux du brise-lames dans ce plan. La deuxième étape traite le deuxième sous problème dans le plan verticale avec le modèle dynamique des brise-lames flottants. Enfin, dans la troisième étape sera une optimisation globale à l'aide du modèle 2.5D des brise-lames flottants en utilisant les variables les plus influents.

Le deuxième principe est de commencer l'optimisation avec une population initiale plus ou moins près de la solution finale. Ceci est fait pour la première étape à l'aide d'une approche qui utilise le principe de méta-modèle. Pour la troisième étape, la population initiale est combinée à partir des solutions optimales trouvées dans les étapes 1 et 2. Cette démarche est résumée par la figure 4.14.

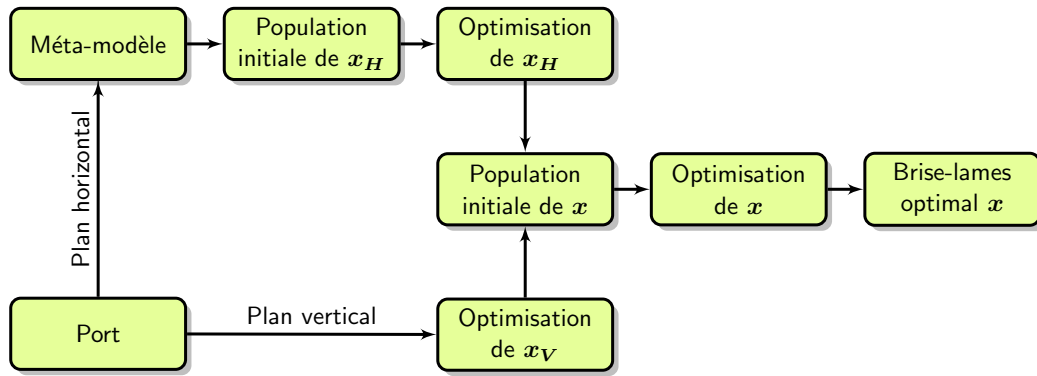


FIGURE 4.14 – Démarche d'optimisations.

Pour mieux comprendre cette démarche, on l'applique sur un cas d'un port en pleine mer défini sur la figure 4.15. Les vagues incidentes sont aléatoires, avec une hauteur significative $H_s = 1$ m et une période de pic $T_p = 12$ s. Elles entrent dans le domaine situé du côté nord faisant un angle $\theta_I = 270^\circ$ avec l'axe des x . Les autres bords sont des frontières de rayonnement libres vers la mer. Le coefficient de réflexion des parois solides du brise-lames est $R = 0.77$ avec un délai de déphasage $\alpha = 0^\circ$. Le coefficient de frottement au fond $f_w = 0.1$. Le béton armé qui a une masse volumique $\rho_m = 2500 \text{ kg m}^{-3}$ est utilisé. Les câbles d'ancrages font un angle $\beta = 30^\circ$ avec le vertical et sa raideur $k_r = 1 \times 10^6 \text{ N m}^{-1}$.

4.3.3 Optimisation pour le brise-lames fixe dans le plan horizontal

Les variables à optimiser font partie du vecteur $\mathbf{x}$, ils sont définis dans le vecteur $\mathbf{x}_H = (x_G, y_G, L, \xi)$. Puisque la bathymétrie varie linéairement suivant y seulement,

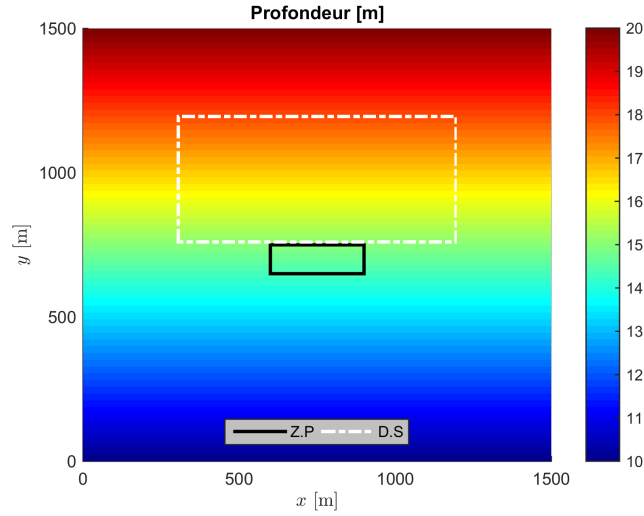


FIGURE 4.15 – Domaine de l'optimisation.

la première fonction objectif concernant le volume $[\text{m}^2 \cdot \text{m largeur}]$ du brise-lames est

$$f_{1_H}(\mathbf{x}_H) = Lp(x_G, y_G) \quad (4.13)$$

La deuxième fonction objectif est identique à celle décrite dans l'équation (4.6). Le problème n'est soumis à aucune contrainte. Il est alors défini comme suit :

$$\mathcal{P}_{\text{MultiObj}} : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}_H) = [f_{1_H}(\mathbf{x}_H), f_2(\mathbf{x}_H)] \end{cases} \quad \text{avec } \mathbf{x}_H \in \mathcal{D} \quad (4.14)$$

Avant de commencer l'optimisation des brise-lames fixes dans le plan horizontal, un méta-modèle a été créé pour le modèle hydrodynamique qui est le modèle de Berkhoff dans le domaine de travail. Le domaine a été discrétisé comme montre la figure 4.16. Puis, pour chaque nœud de cette discrétisation la longueur de la figure L a été échantillonnée entre 200 m et 600 m avec un pas de 100 m et l'angle ξ entre 40° et 140° avec un pas de 10° . La permutation nous permet de faire en total 6400 essais numériques du modèle. Ce méta-modèle est indépendant du domaine des solutions et de la zone à protéger. Il peut être utilisé pour plusieurs zones mais il est approprié au domaine, à la bathymétrie et aux caractéristiques de la houle incidente. L'importance de ce méta-modèle est qu'il doit permettre de créer la population initiale de l'optimisation. Il nous informe sur le positionnement approximatif et la longueur et l'inclination les plus capables d'avoir une grande influence sur la zone à protéger.

Une optimisation à l'aide de ce méta-modèle permet alors de trouver une solution approximative très rapidement. Nous avons utilisé la fonction de l'algorithme génétique « gamultiobj » dans l'outil de l'optimisation globale de MATLABTM. La population initiale a été formée des 50 individus et le nombre des générations maximale alloué au calcul a été 200.

Le front de Pareto (Figure 4.17) nous montre comment la hauteur maximale de

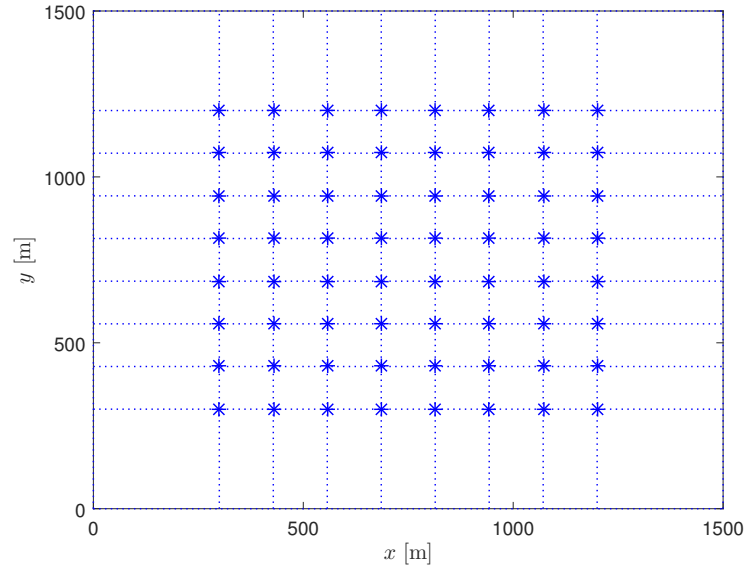


FIGURE 4.16 – La discrétisation du méta-modèle

vagues dans la zone à protéger varie en fonction du volume du brise-lames. La population finale de ce test est la population initiale de l'optimisation à l'aide du modèle hydrodynamique direct.

Ensuite l'optimisation du brise-lames fixe dans le plan horizontal en se basant sur

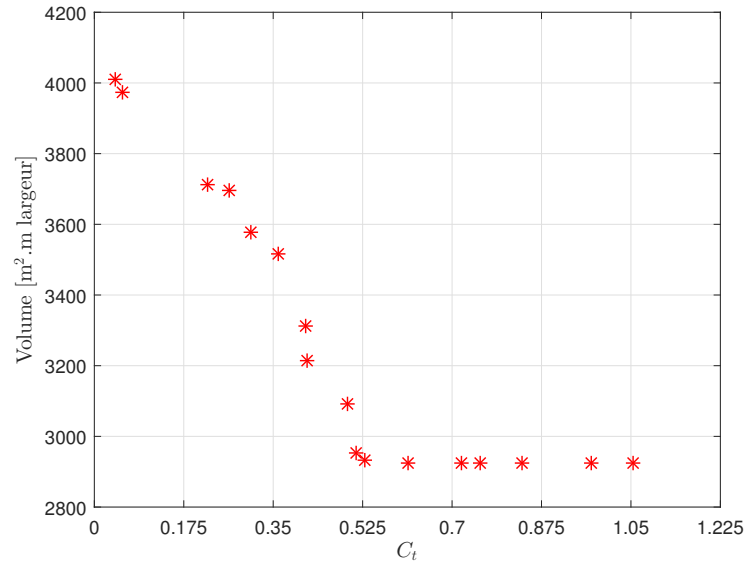


FIGURE 4.17 – Le front de Pareto obtenu de l'optimisation par du méta-modèle

la population initiale trouvée à l'aide du méta-modèle converge vers une solution optimale dans 26.2h du calcul. Pour mieux comprendre l'influence de chaque variable, la période de pic T_p de la vague incidente a été variée. Deux nouveaux test avec $T_p = 6$ s et 18 s ont été effectués. La figure 4.18a montre les fronts de Pareto

pour les trois cas. La figure 4.18b montre la solution optimale lorsque le coefficient de transmission des vagues à l'intérieur de la zone à protéger ne doit pas dépasser le $C_t = 0.4$.

Les résultats montrent que lorsque le brise-lames devient plus grand l'atténuation des vagues est plus importante. Le front de Pareto nous indique alors l'atténuation maximale qu'on peut atteindre dans la Z.P déterminée en cherchant dans le domaine des solutions défini. Dans notre cas $C_t = 0.31$ pour $T_p = 12$ s. On peut voir aussi qu'il y a un volume minimal en dessous duquel aucune atténuation de la Z.P n'a lieu. C'est le volume qui correspond au brise-lames le plus grand qui est plus court que la largeur de la zone à protéger qui est 200 m dans notre cas. Si on regarde les

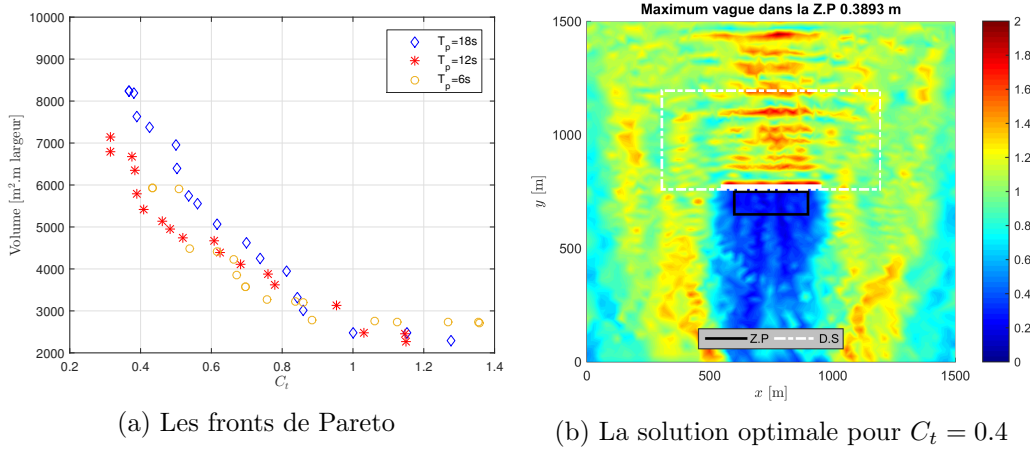


FIGURE 4.18 – Les résultats de l'optimisation des brise-lames fixes dans le plan horizontal.

variations des variables d'optimisation par rapport aux points de front de Pareto présentés sur la figure 4.19, on remarque que x_G est presque toujours constant, le brise-lames est centré au milieu de la Z.P soit $x_G = 750$ m. Du même l'angle ξ est presque constant car le brise-lames reste perpendiculaire à la direction de propagation des vagues. Par contre, il est très clair que la période de pic T_p joue un rôle très important en définissant y_G qui représente la distance entre le brise-lames et la Z.P. La relation entre la longueur L et la solution optimale est naturellement justifiée. Un brise-lames plus long a un volume plus grand et atténue plus les vagues. Ces résultats nous permettent de dire que seules la longueur L et la distance y_G devront faire partie des variables à optimiser dans le problème final. Leurs valeurs dans la population finale sont transmises dans la population initiale pour ce problème.

4.3.4 Optimisation sur le brise-lames flottant dans le plan vertical

Si on considère maintenant le plan vertical, l'autre partie des variables du vecteur $\mathbf{x}$ est concernée. Elles sont définies dans le vecteur $\mathbf{x}_V = (l, h, v_h, v_l)$. La première fonction objectif sur le volume $[\text{m}^2.\text{m longueur}]$ du brise-lames s'écrit :

$$f_{1V}(\mathbf{x}_V) = f_1(\mathbf{x})/L. \quad (4.15)$$

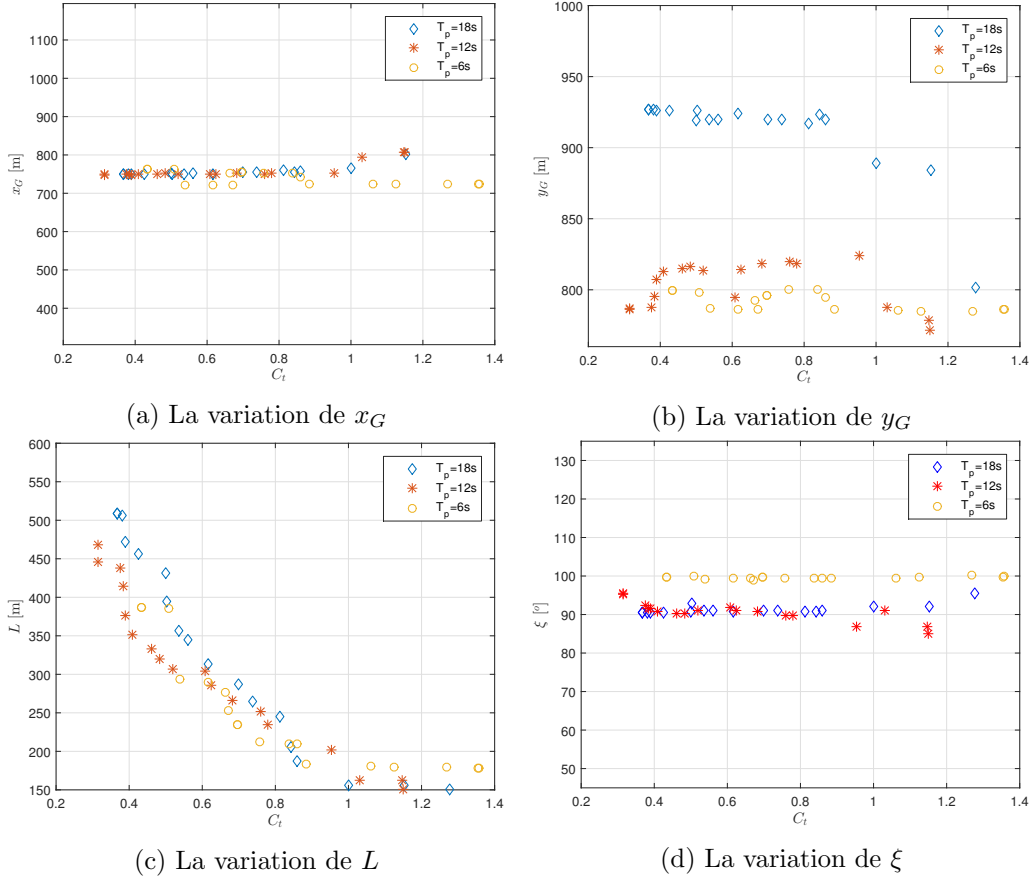


FIGURE 4.19 – Les variations des variables par rapport aux points de la solution optimale dans le plan horizontal.

La seconde fonction objectif représentant la hauteur maximale des vagues dans la zone après le brise-lames s'écrit :

$$f_{2V}(\mathbf{x}_V) = \max_{x>l/2, z=0} (C_t(x, z)) \quad (4.16)$$

Dans ce problème les trois fonctions contraintes c_1 (4.8), c_2 (4.10) et c_3 (4.11) sont considérées. Le problème d'optimisation est alors défini par :

$$\mathcal{P}_{\text{MultiObj}} : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}_V) = [f_{1V}(\mathbf{x}_V), f_{2V}(\mathbf{x}_V)] \\ \text{Sous les contraintes} \\ c_j(\mathbf{x}_V) \leq 0 \quad j = 1, 2, 3 \end{cases} \quad \text{avec } \mathbf{x}_V \in \mathcal{D} \quad (4.17)$$

Le calcul d'optimisation du brise-lames flottant dans le plan vertical a été fait avec le même outil et avec les mêmes caractéristiques que dans le cas du plan horizontal. Il converge vers une solution optimale au bout de 4.01 h de calculs. Les tests avec $T_p = 6$ s et 18 s ont aussi été effectués. La figure 4.20a montre les fronts de Pareto pour les trois cas, et la figure 4.20b montre la solution optimale lorsque la hauteur

des vagues après le brise-lames ne doit pas dépasser $C_t = 0.4$.

Les résultats montrent que lorsque le brise-lames devient plus grand l'atténuation des vagues est plus importante mais il montre aussi que la relation entre la dimension et l'atténuation est fortement liée à la période de vague. L'atténuation maximale qu'on peut atteindre après le brise-lames pour $T_p = 12$ s est déterminée dans notre cas par $C_t = 0.16$.

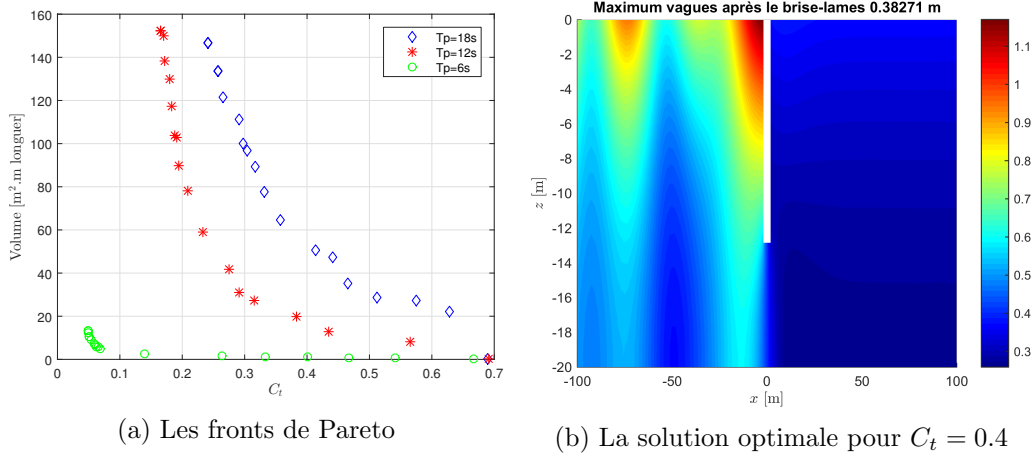


FIGURE 4.20 – Les résultats de l'optimisation de brise-lames flottant dans le plan vertical.

Les variations des variables dans la figure 4.21 montrent que les variables l et h sont essentiels dans l'optimisation des brise-lames flottants. Ils changent sensiblement avec le degré d'atténuation et avec la période T_p . Ces deux variables vont faire partie des variables à optimiser dans le problème final et leurs valeurs dans la population finale de cette étape vont participer à la création de la population initiale pour ce problème. Par contre, les variations de v_h et v_l montrent un intervalle très étroit limité par la contrainte de flottabilité et la contrainte de résistance des matériaux. On constate, de plus, que le brise-lames optimal a la tendance à être le brise-lames le plus lourd qui puisse flotter. Ceci est vérifié quand on multiplie les moyennes de ces deux variables $\overline{v_h} \times \overline{v_l} = 0.64$. Tandis que si on remplace ρ_m et ρ_e par ces valeurs dans l'équation (4.8) on trouve $v_h \times v_l > 0.59$. Ces résultats sont logiques parce qu'un brise-lames plus lourd a une inertie plus grande, et par conséquent il résiste plus au mouvement. Dans le problème final on a défini $v_h = v_l = 0.8$.

4.3.5 Optimisation sur le brise-lames flottant dans le 2.5D

Maintenant tout est prêt pour démarrer une optimisation complète des brise-lames flottants. Les variables à optimiser tirées des deux étapes précédentes forme un vecteur d'optimisation réduit $\mathbf{x}_R = (x_G, L, l, h)$. La fonction objectif de volume [m³] du brise-lames est :

$$f_{1_R}(\mathbf{x}_R) = Ll h (1 - 0.64) \quad (4.18)$$

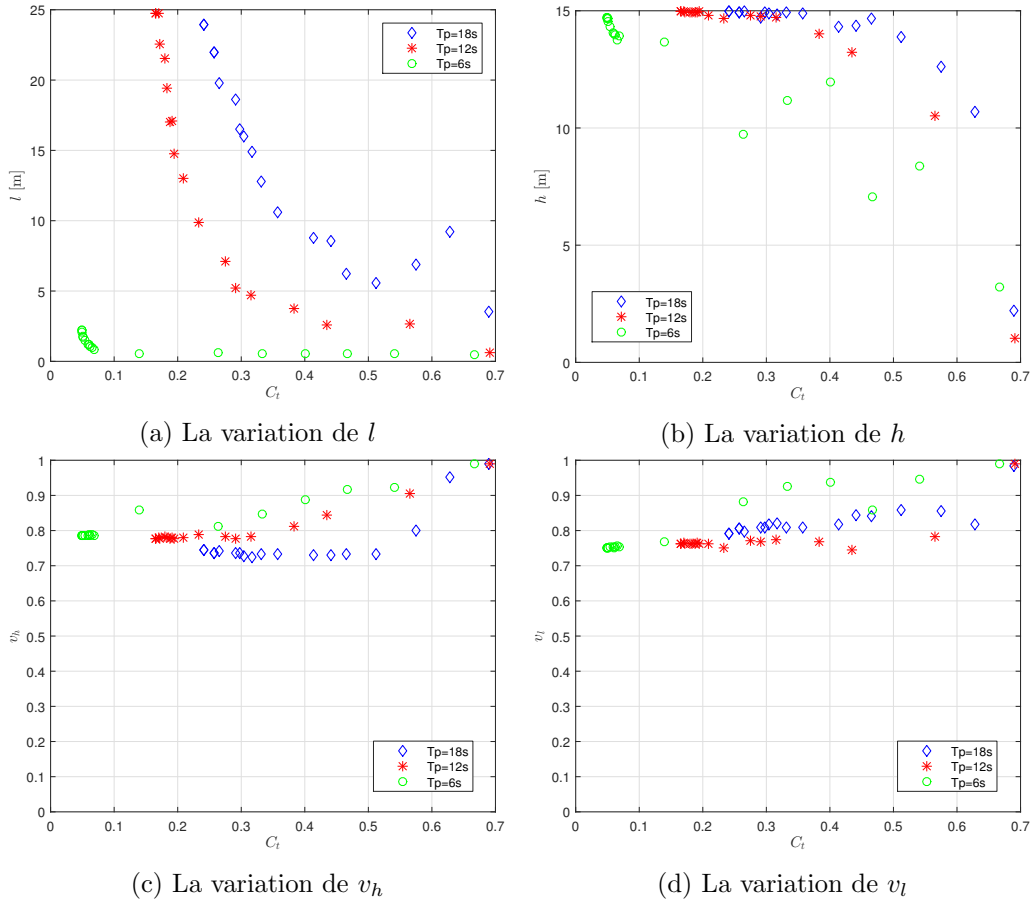


FIGURE 4.21 – Les variations des variables par rapport aux points de la solution optimale dans le plan vertical.

Tandis que la deuxième fonction objectif reste la même que celle décrite dans l'équation (4.6). La contrainte C_1 est toujours satisfaite, mais pour c_2 et c_3 , c'est les variables l et h qui seront limités à cause de la fixation de v_l et v_h . Le problème d'optimisation est alors défini par :

$$\mathcal{P}_{\text{MultiObj}} : \begin{cases} \text{Minimiser} \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}_R) = [f_{1_R}(\mathbf{x}_R), f_{2_R}(\mathbf{x}_R)] \\ \text{Sous les contraintes} \\ c_j(\mathbf{x}_R) \leq 0 \quad j = 2, 3 \end{cases} \quad \text{avec } \mathbf{x}_R \in \mathcal{D} \quad (4.19)$$

En suite l'optimisation globale du brise-lames flottant est initiée avec une population initiale formée à partir des populations finales des deux parties précédentes. Cette population est formée de 50 individus également. Ce nombre d'individus est toujours suffisant car la dimension de vecteur des variables d'optimisation est encore 4 comme dans les deux cas précédant. Le nombre maximal des générations est 200. La fonction de l'algorithme génétique « gamultiobj » dans l'outil de l'optimisation globale de MATLABTM a été utilisée. Elle converge vers une solution optimale dans 10.32 h

du calcul. La figure 4.22a montre le front de Pareto des solutions. La figure 4.22b montre la solution optimale lorsque la coefficient de transmission dans la Z.P ne doit pas dépasser $C_t = 0.4$.

Les résultats montrent que lorsque le brise-lames devient plus grand l'atténuation des vagues est plus importante. L'atténuation maximale qu'on peut atteindre dans la Z.P est $C_t = 0.30$. Cette valeur limite forme une asymptote verticale, quoi que le brise-lames devienne plus grand il ne pourra pas des performances d'atténuation plus importante que cette valeur. Cette conclusion est conforme avec les résultats de la section 3.8. Un brise-lames flottant plus long va générer plus des vagues induites, c'est pour cela qu'il existe un compromis entre la minimisation des vagues induites et la maximisation des vagues réfléchis et absorbés par le brise-lames.

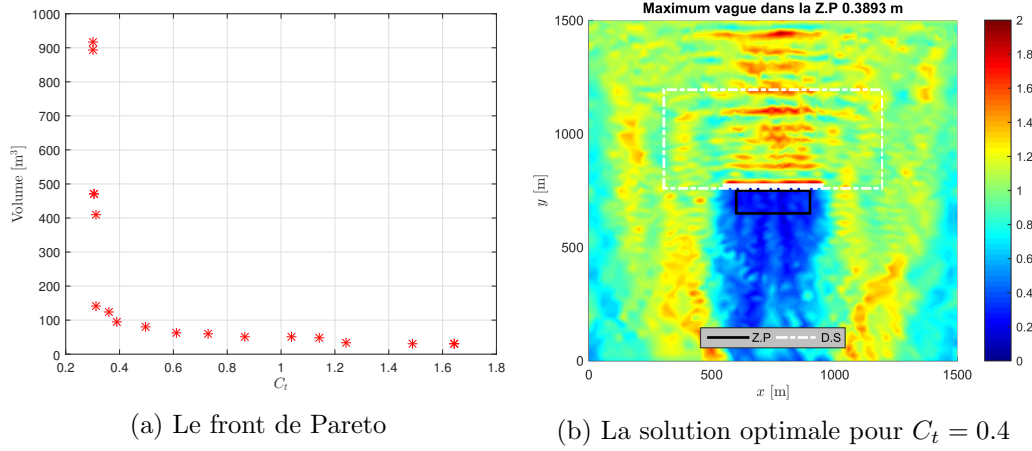


FIGURE 4.22 – Les résultats de l'optimisation de brise-lames flottant par le modèle 2.5D.

4.3.6 Justification de la démarche

Les sections précédentes ont bien montré la richesse des résultats obtenus par ce problème d'optimisation. Mais il reste à vérifier que la démarche proposée apporte vraiment une convergence plus rapide. Afin de vérifier cela, un problème d'optimisation complète à huit variables suivant l'équation (4.12) pour le même cas d'étude a été utilisé sans avoir une population initiale prédéfinie. L'optimisation complète à 8 variables a été résolue avec le même outil mais la population initiale a comptée 200 individus ce fois ci. Le nombre des générations maximale a resté 200 parce que on a constaté que la convergence a été atteint dans les problèmes précédents à l'entour de 110 - 140 générations.

L'idée de ce test était de voir si un problème général avec 8 variables trouvera une solution similaire à celle trouvée avec notre démarche. Le temps de calculs du problème général de 8 variables doit être beaucoup plus grand que le temps de calculs des trois étapes de notre démarche additionnées. Les solutions optimales peuvent ne pas avoir de grandes différences. Notre démarche a convergé vers la

solution optimale dans 40.53 h. Tandis que le modèle complet n'a pas convergé même après 77.95 h presque deux fois le temps du calcul dans notre démarche. On note que lorsque l'optimisation est arrêtée puisqu'elle a atteint le nombre maximal d'itérations (200 itérations), 40 201 individus ont été évalués.

Les résultats obtenus par le problème complet jusqu'à son arrêt sans convergence ont été comparé aux résultats obtenus par notre démarche dans la figure 4.23. On peut en déduire facilement, qu'à partir de ces résultats, l'importance de la démarche définie dans cette thèse pour optimiser les variables des dimensions externes et internes des brise-lames flottants. Les deux problèmes d'optimisations ont trouvé presque les mêmes résultats, mais beaucoup plus rapidement avec notre démarche.

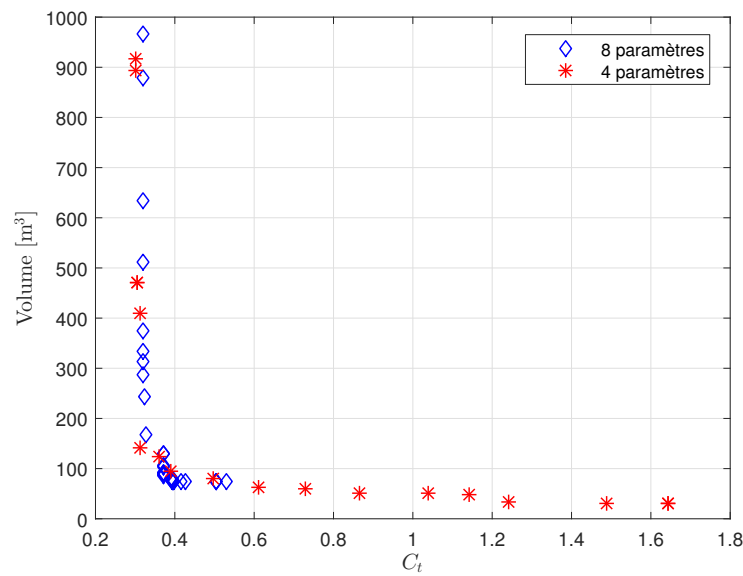


FIGURE 4.23 – La comparaison de la démarche réduite avec la démarche complète de l'optimisation

Par contre il faut toujours faire attention que la sensibilité sur des variables spécifiques peut changer en fonction du changement de la bathymétrie ou à cause de l'existence des installations portuaires. Les variables à négliger font l'objet d'une vérification appropriée à chaque cas.

4.4 Application : Port de Hanstholm au Danemark

Une application générale concernant un port de plaisance à Hanstholm au Danemark semi-fermé est traitée. Le brise-lames flottant va protéger l'entrée du port pour permettre aux petits bateaux d'entrer en toute sécurité. Le port est défini sur la figure 4.24 où la bathymétrie est précisée également.

La zone à protéger Z.P est définie à l'entrée du port, tandis que le domaine des solutions $\mathcal{D}$ est défini d'une manière à permettre aux bateaux d'entrer dans le port facilement. La distance entre ce domaine et les brise-lames détachés existants est

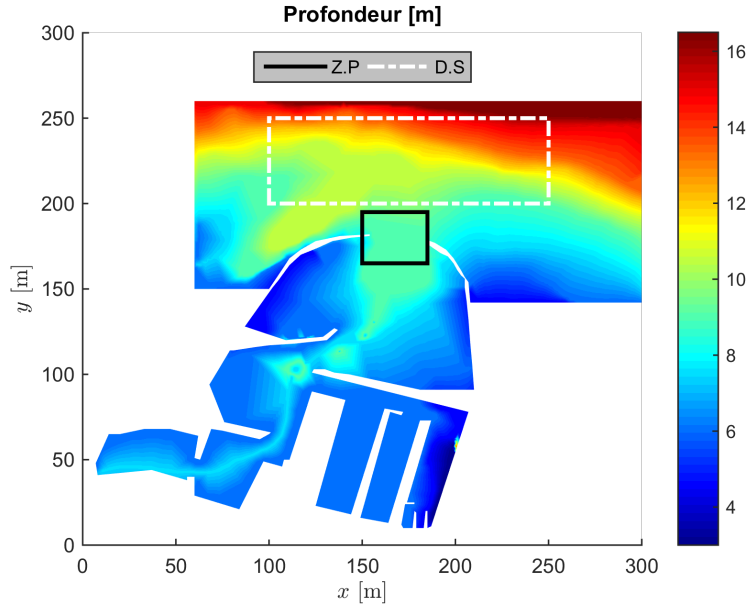


FIGURE 4.24 – Le domaine de définition du port de Hanstholm.

toujours plus grand que 20 m.

La vague incidente vient du côté du nord, avec une hauteur significative $H_s = 1$ m et une période de pic $T_p = 6$ s. Le coefficient de réflexion des parois solides est $R = 0.77$. Le coefficient de frottement au fond $fw = 0.1$. L'acier qui a une masse volumique $\rho_m = 7130 \text{ kg m}^{-3}$ est utilisé pour la construction de brise-lames. Une épaisseur critique minimale $e_c = 10$ cm doit être respectée pour répondre à la contrainte des sollicitations mécaniques. Les câbles d'ancrages font un angle $\beta = 30^\circ$ avec la verticale et leur raideur est $k_r = 1 \times 10^6 \text{ N m}^{-1}$.

On applique les deux premières étapes de la démarche d'optimisation sur le problème défini ci-dessus. Les figures 4.25 montrent les variations des variables d'optimisation pour les points optimaux dans le plan horizontal et vertical.

Les problèmes d'optimisation ont été résolus par la fonction de l'algorithme génétique « gamultiobj » dans l'outil de l'optimisation globale de MATLABTM. La population initiale a été formée des 50 individus et le nombre des générations maximale alloué au calcul a été 200.

Dans le plan horizontal, le brise-lames optimal a toujours la tendance de rester centré au milieu de la Z.P, x_G (Figure 4.25a) prend la valeur moyenne de 167.5 m qui peut être considérée invariable. C'est le premier variable à éliminer.

La figure 4.25b montre y_G constant, mais il ne faut pas oublié l'hypothèse qu'on a vérifié dans la section 4.3.3. La distance entre le brise-lames et la Z.P dépend fortement de la période des vagues incidentes. Pour un brise-lames fixe, elle est constante mais à une valeur spécifique pour chaque période. Pour le brise-lames flottant, l'influence de la période sur la performance dynamique du brise-lames est plus importante. Par conséquent, y_G peut affecter la performance des brise-lames d'une manière plus compliquées dans le cas du brise-lames flottant. Ainsi ce variable

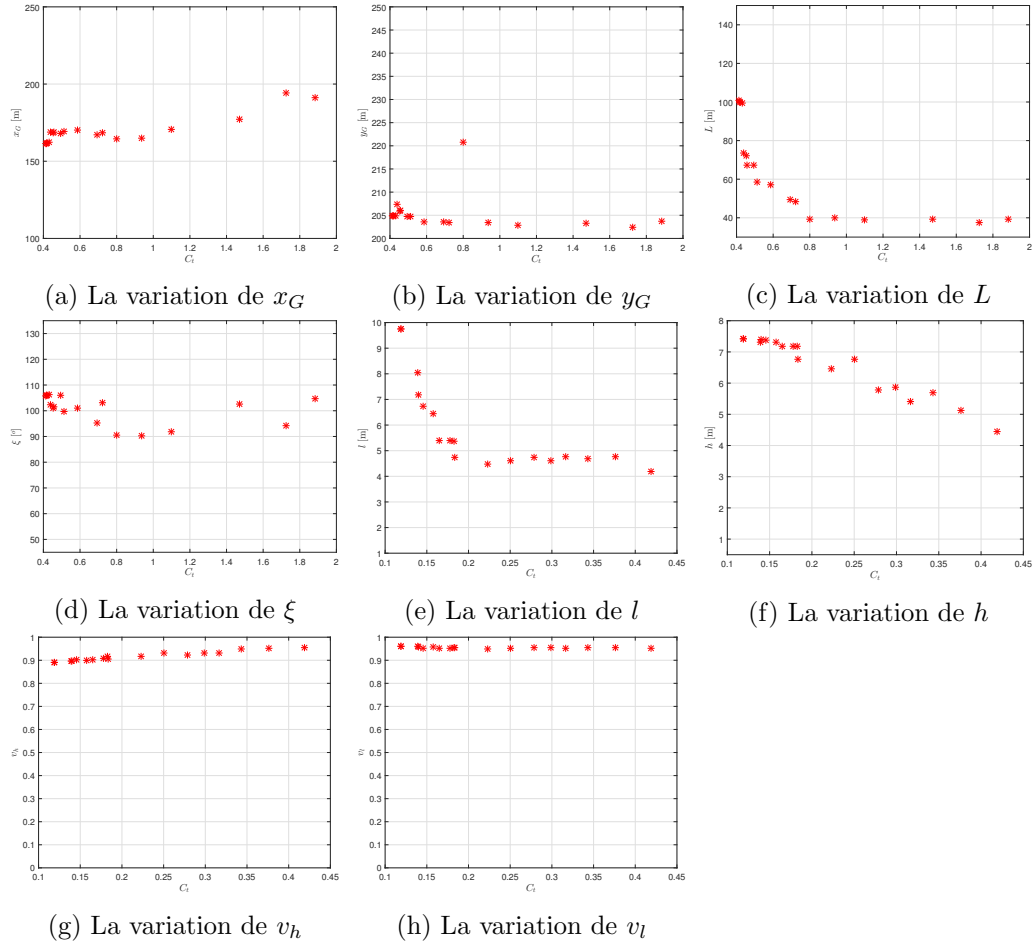


FIGURE 4.25 – Les variations des variables par rapport aux points de la solution optimale le port semi-fermé.

est gardé pour l'optimisation globale.

La longueur du brise-lames L (Figure 4.25c) est le variable le plus attaché aux solutions optimales. La variation de L prend la même forme comme le front de Pareto, ce qui indique que L a une grande influence sur les deux fonctions objectives (le volume de brise-lames et son coefficient de transmission). L est surtout gardée pour l'optimisation globale.

L'angle β a montré une variation un peu différente que celle trouvée dans le cas exemplaire en pleine mer. L'interaction avec les installations portuaires existantes a changé la performance du brise-lames. La réflexion des vagues sur l'entrée du port, formée par des arcs, vers le brise-lames rend la zone plus sensible à la résonance. Malgré tout ça, la figure 4.25d montre que l'angle β change dans un intervalle pas très large ($85^\circ - 110^\circ$). En plus, notre modèle ne peut pas pour l'instant prendre en compte l'obliquité des vagues incidentes dans l'étude de performance dynamique de brise-lames flottant dans le plan vertical. Par conséquent, le modèle 2.5D des brise-lames flottants ne peut pas simuler les brise-lames obliques d'une manière sûr.

On a testé l'influence de négliger le variable β et le fixer à $\beta = 90^\circ$ sur le coefficient de transmission. On a choisi la meilleur solution adapter à ce coefficient qui est l'extrémité haute de front de Pareto. La comparaison est présentée dans la figure 4.26. Malgré que la différence puisse être considérée remarquable, elle soit toujours acceptable car $C_t < 0.5$.

On fixe, alors, β à 90° . Quant au plan vertical, la largeur l (Figure 4.25e), a

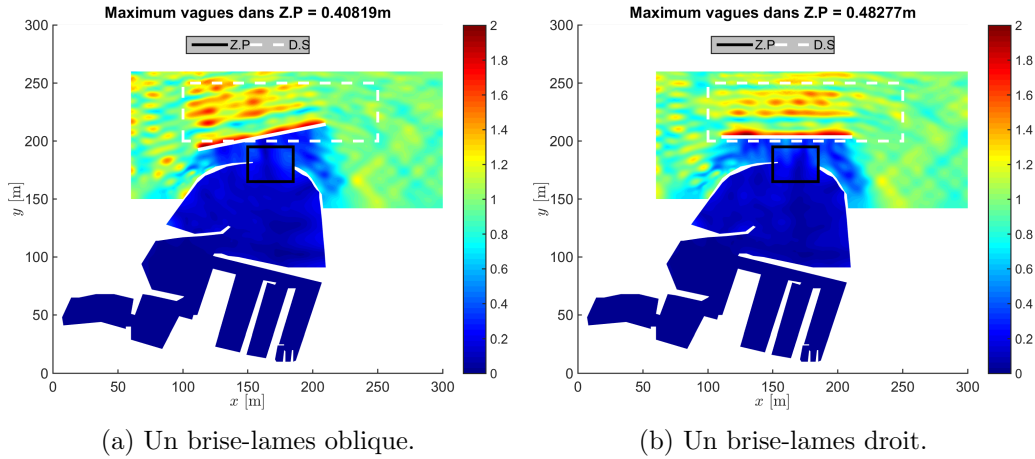


FIGURE 4.26 – L'influence de l'angle de brise-lames dans le port semi-fermé.

une influence plus ou moins similaire à celle de L . On ne peut pas la négliger. La variation de h (Figure 4.25f) montre aussi qu'on ne peut pas la négliger non plus. Tandis que, pour la partie efficace de front de Pareto ($C_t < 1$) on peut constaté que v_l et v_h sont presque constants, et limités par les contraintes de flottabilité et de sollicitations mécaniques. On fixe alors, $v_l = 0.95$ et $v_h = 0.9$.

Les variables d'optimisations se réduisent jusqu'au quatre (y_G, L, l, h). La population initiale a été construite à partir des populations finales de deux étapes précédentes. Le problème d'optimisation global est, ensuite, résolu. La figure 4.27 montre comment les points de front de Pareto ont évolué avec les générations. Le front de Pareto à la convergence est montré dans la figure 4.28a. Il nous permet de dire qu'il existe une asymptote verticale sur l'atténuation des vagues dans ce Z.P qu'on peut avoir si on cherche un brise-lames dans ce D.S. Le brise-lames le moins volumineux qui correspond à ce degré d'atténuation est la meilleur solution qui assure le maximum d'atténuation possible avec un volume minimal. Au delà, il est inutile de prendre des brise-lames plus grands. Il reste toujours possible de prendre la solution qui correspond au valeur choisi de C_t . La figure (4.28b) montre la solution optimale pour $C_t = 0.5$ qui a le vecteur des variables $\mathbf{x} = (167.5 \text{ m}, 207.79 \text{ m}, 55.68 \text{ m}, 90^\circ, 4.32 \text{ m}, 2.22 \text{ m}, 0.9, 0.95)$.

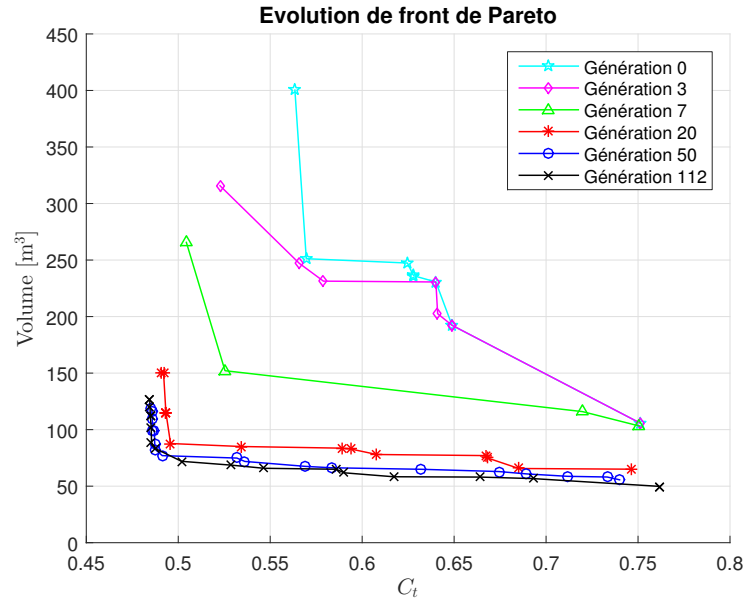


FIGURE 4.27 – L'évolution de front de Pareto par rapport aux générations.

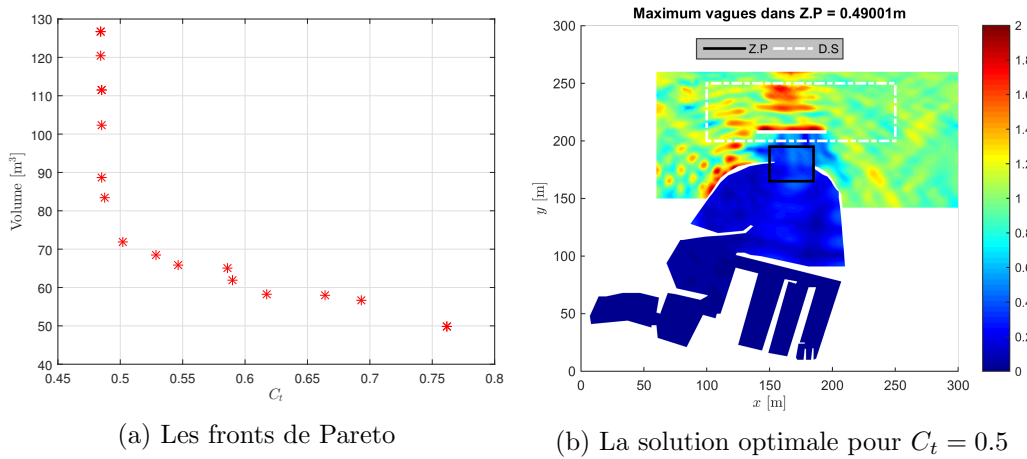


FIGURE 4.28 – Les résultats de l'optimisation de brise-lames flottant dans le port semi-fermé.

4.5 Résumé du chapitre

Dans ce chapitre le problème d'optimisation pour les brise-lames flottants dans le domaine portuaire et la démarche d'optimisation ont été définis.

- Le problème est multi-objectif. Le volume du brise-lames et le coefficient de transmission sont à minimiser.
- Les contraintes principales sont la flottabilité et la résistance des matériaux plus les considérations de navigations dans la définition du domaine des solutions.

- Une démarche spécifique d'optimisation cohérente avec le type du problème et convenable au modèle hydrodynamique accélère la convergence.

Conclusions et perspectives

Sommaire

5.1 Conclusion	127
5.2 Perspectives	129

A la fin de ce travail, on va, dans ce chapitre, souligner l'apport de cette thèse. On présente brièvement une conclusion puis on évoque les perspectives permettant de poursuivre ces travaux.

5.1 Conclusion

L'objectif de cette thèse était de proposer une contribution dans le domaine de la modélisation du comportement de brise-lames flottants permettant d'optimiser le positionnement et le dimensionnement de ces structures. La finalité étant de participer à la définition d'outils d'aide à la décision pour l'aménagement portuaire destiné à la protection des installations. Dans ce travail, on a introduit une démarche d'optimisation spécifique adaptée au problème d'optimisation qu'on a défini. Afin d'étudier l'adaptation des solutions proposées nous avons amélioré un modèle hydrodynamique pour calculer l'agitation des vagues dans le port due à la présence du brise-lames flottant. Les différentes contraintes du problème d'optimisation agissant sur cette conception ont été tirées à partir d'une étude bibliographique qu'on a préparée.

Démarche d'optimisation On a suggéré une démarche d'optimisation pour déterminer le positionnement et les dimensions externes et internes des brise-lames flottants dans les plans horizontal et de la section transversale. Il s'agit d'une démarche qui s'appuie sur les solutions des problèmes d'optimisations indépendants dans chaque plan pour réduire les nombres de variables et pour construire une population initiale pour initialiser l'optimisation générale. Cette démarche a montré son efficacité en réduisant le temps de calculs de moitié et en assurant la convergence. Un problème non-découplé pour optimiser la totalité des variables en même temps dans le 3D sans avoir une population initiale, ni éliminer les variables non dominantes a pris le double du temps sans convergence pour donner finalement les mêmes résultats que ceux obtenus avec notre démarche spécifique.

Problème d'optimisation On a défini un problème d'optimisation multi-objectif, pour minimiser simultanément le volume du brise-lames et la hauteur des vagues dans la zone à protéger. Le front de Pareto obtenu donne l'ensemble des brise-lames de volume minimal et de coefficient de transmission C_t maximal acceptable dans la zone à protéger. Le problème mono-objectif de minimisation du volume soumis sous la contrainte d'une hauteur de vague maximale acceptable dans la zone à protéger, qui représente un problème d'ingénierie côtière très intéressante, peut être vu comme un cas particulier et est représenté par un point de ce front de Pareto.

Modèle hydrodynamique On a établi un modèle hydrodynamique 2.5D des brise-lames flottants pour évaluer la performance des brise-lames flottants afin de calculer la valeur de la fonction objectif donnant la hauteur de vague dans la zone à protéger. Le modèle est basé sur la combinaison entre le modèle de Berkhoff étendu et amélioré dans le plan horizontal et un modèle dynamique des brise-lames flottants dans le plan de la section transversale de celui-ci.

Tous les modèles sont tirés de la théorie du potentiel linéaire. Ils sont résolus avec le même outil numérique. Une étude paramétrique a permis de valider globalement ce modèle après avoir validé ses composantes par comparaison avec des travaux de recherches antérieurs. Malgré la combinaison des hypothèses de deux modèles différents, ce modèle nous permet d'introduire la dynamique des brise-lames flottants dans le domaine portuaire tout en considérant de nombreux phénomènes maritimes comme la diffraction, la réfraction et la réflexion des vagues, le changement rapide de bathymétrie, la dissipation de l'énergie des vagues due au frottement au fond ou au déferlement, la nature aléatoire des vagues incidentes, et enfin la radiation des vagues induites par l'oscillation de brise-lames flottant à la surface de la mer.

Contraintes d'optimisation On a résumé tous les contraintes fonctionnelles dans le domaine portuaire et côtier. Cette étude bibliographique nous a permis de déterminer quelles sont les contraintes indispensables à prendre en compte dans la définition d'un problème d'aménagement portuaire. Parmi les nombreuses contraintes liées à l'environnement, à la mécanique de fluides, aux structures et aux besoins de manœuvrabilité finalement trois contraintes ont été prises en compte dans notre travail. La contrainte de sécurité de navigation a été respectée implicitement dans la définition du domaine des solutions admissibles tandis que la contrainte sur flottabilité et sur la résistance des matériaux ont été ajoutées explicitement comme des inéquations dépendant des variables du problème. Ce travail nous a permis de définir les objectifs et les variables de conception pour le problème d'aménagement portuaire.

5.2 Perspectives

Ce travail n'est qu'une étape supplémentaire dans la définition d'un outil d'aide à la décision pour l'aménagement portuaire. Les améliorations que nous envisageons concernent les aspects suivants :

Les contraintes du problème d'optimisation :

- Ajouter la contrainte de tension maximale supportée par les câbles d'ancrage.
- Ajouter la contrainte de hauteur de brise-lames minimale nécessaire au-dessus de la surface de mer pour éviter la submersion.

Le modèle hydrodynamique :

- Valider le modèle 2.5D à l'aide d'un solveur 3D performant (COMSOL Multiphysics[®] est envisagé)
- Coder le modèle et le résoudre dans un outil numérique ouvert plus performant pour le maillage et permettant de paralléliser massivement les calculs sans être limité par les problèmes de licences d'utilisation (Freefem++ est envisagé).
- Évoluer vers la modélisation 3D.
- Ajouter l'aspect multi-directionnel aux vagues incidentes.
- Traiter une vague oblique dans l'étude de comportement dynamique dans le plan vertical.
- Introduire la tension des câbles au repos dans la définition du brise-lames.
- Généraliser le modèle pour des brise-lames en plusieurs tronçons en introduisant la modélisation des connections mécaniques entre les tronçons.

Bibliographie

- [1] Aelbrecht, D., Sauvaget, P., and Lang, P. (1997). Logiciel artemis-version 3.0. *Dossier de validation. Rapport EDF-LNH HE-42/97/003*. (Cité pages [51](#), [55](#) et [72](#).)
- [2] Airoidi, L., Abbiati, M., Beck, M., Hawkins, S., Jonsson, P., Martin, D., Mossella, P., Sundelöf, A., Thompson, R., and Åberg, P. (2005). An ecological perspective on the deployment and design of low-crested and other hard coastal defence structures. *Coastal Engineering*, 52(10-11) :1073–1087. (Cité pages [36](#) et [37](#).)
- [3] Airy, G. (1845). Tides and wave. (Cité page [35](#).)
- [4] Akoz, M. S., Cobaner, M., Kirkgoz, M. S., and Oner, A. A. (2011). Prediction of geometrical properties of perfect breaking waves on composite breakwaters. *Applied Ocean Research*, 33(3) :178–185. (Cité page [39](#).)
- [5] Alises, A., Molina, R., Gómez, R., Pery, P., and Castillo, C. (2014). Overtopping hazards to port activities : Application of a new methodology to risk management (POrt Risk MAnagement Tool). *Reliability Engineering & System Safety*, 123 :8–20. (Cité page [36](#).)
- [6] Alves, J.-H. G. (2006). Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling*, 11(1) :98–122. (Cité page [34](#).)
- [7] Barichard, V. (2003). *Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs*. Thèse doctorat, Laboratoire d’Etudes et de Recherche en Informatique d’Angers, France. (Cité page [97](#).)
- [8] Bates, P. D., Dawson, R. J., Hall, J. W., Horritt, M. S., Nicholls, R. J., Wicks, J., and Mohamed Ahmed Ali Mohamed Hassan (2005). Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. *Coastal Engineering*, 52(9) :793–810. (Cité page [37](#).)
- [9] Battjes, J. A. (2006). Developments in coastal engineering research. *Coastal Engineering*, 53(2-3) :121–132. (Cité page [32](#).)
- [10] Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking random waves. Hamburg, Germany. ASCE. (Cité page [54](#).)
- [11] Belibassakis, K. A. and Athanassoulis, G. A. (2002). Extension of second-order Stokes theory to variable bathymetry. *Journal of Fluid Mechanics*, 464 :35–80. (Cité page [35](#).)

- [12] Benoit, M. (1999). Extension de l'équation de réfraction-diffraction de berkhoff pour traiter des bathymetries rapidement variables. Technical Report HE-42/99/049/A, Département Laboratoire National d'Hydraulique, Electricité de France. (Cité pages 34 et 51.)
- [13] Berkhoff, J. (1972). Computation of combined refraction-diffraction. (Cité pages 48 et 50.)
- [14] Berkhoff, J. C. W. (1976). *Mathematical models for simple harmonic linear water waves : Wave diffraction and refraction*. PhD thesis. (Cité page 35.)
- [15] Bosworth, G. F. (1915). *Ships, shipping and fishing : with some account of our seaports and their industries*. Cambridge : University Press. (Cité page 30.)
- [16] Bouma, J. J., François, D., Schram, A., and Verbeke, T. (2009). Assessing socio-economic impacts of wave overtopping : An institutional perspective. *Coastal Engineering*, 56(2) :203–209. (Cité page 36.)
- [17] Boussinesq, J. (1872). Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 17(2) :55–108. (Cité page 35.)
- [18] Bowman, D. and Pranzini, E. (2003). Reversed responses within a segmented detached breakwater, the Tuscany coast Italy—a case study. *Coastal Engineering*, 49(4) :263–274. (Cité pages 32, 36 et 37.)
- [19] Briganti, R. and Dodd, N. (2009). On the role of shoreline boundary conditions in wave overtopping modelling with non-linear shallow water equations. *Coastal Engineering*, 56(10) :1061–1067. (Cité page 36.)
- [20] Bruce, T., van der Meer, J., Franco, L., and Pearson, J. (2009). Overtopping performance of different armour units for rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 56(2) :166–179. (Cité page 36.)
- [21] Bruun, P. and Kjelstrup, S. (1981). Practical views on the design and construction of mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 5 :171–192. (Cité page 38.)
- [22] Burt, J., Bartholomew, A., Bauman, A., Saif, A., and Sale, P. F. (2009). Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 373(1) :72–78. (Cité page 33.)
- [23] Burt, J. A., Feary, D. A., Cavalcante, G., Bauman, A. G., and Usseglio, P. (2013). Urban breakwaters as reef fish habitat in the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 72(2) :342–350. (Cité page 32.)

- [24] Cai, F., Su, X., Liu, J., Li, B., and Lei, G. (2009). Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science*, 19(4) :415–426. (Cité page 37.)
- [25] Castillo, C., Mínguez, R., Castillo, E., and Losada, M. (2006). An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(1) :1–25. (Cité pages 37, 38 et 110.)
- [26] Cavaleri, L., Alves, J. H. G. M., Ardhuin, F., Babanin, A., Banner, M., Belibassakis, K., Benoit, M., Donelan, M., Groeneweg, J., Herbers, T. H. C., Hwang, P., Janssen, P. A. E. M., Janssen, T., Lavrenov, I. V., Magne, R., Monbaliu, J., Onorato, M., Polnikov, V., Resio, D., Rogers, W. E., Sheremet, A., McKee Smith, J., Tolman, H. L., van Vledder, G., Wolf, J., and Young, I. (2007). Wave modelling – The state of the art. *Progress in Oceanography*, 75(4) :603–674. (Cité pages 35 et 48.)
- [27] Chamberlain, P. G. and Porter, D. (1995). The modified mild-slope equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 291 :393–407. (Cité pages 48 et 51.)
- [28] Chandrasekera, C. N. and Cheung, K. F. (1997). Extended Linear Refraction-Diffraction Model. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 123(5) :280–286. (Cité page 51.)
- [29] Charland, J. (2014). *Modélisation de la propagation de la houle en présence d'un courant inhomogène et au-dessus d'une topographie variable*. PhD thesis, Université de Toulon et du Var. (Cité page 51.)
- [30] Chaves, L. P. and Cunha, J. (2014). Design of carbon fiber reinforcement of concrete slabs using topology optimization. *Construction and Building Materials*, 73 :688–698. (Cité page 38.)
- [31] Chin, H. C. and Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47(10) :1410–1416. (Cité page 41.)
- [32] Chini, N., Stansby, P., Leake, J., Wolf, J., Roberts-Jones, J., and Lowe, J. (2010). The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate : A case study for East Anglia (UK). *Coastal Engineering*, 57(11-12) :973–984. (Cité page 32.)
- [33] Cihan, K. and Yuksel, Y. (2011). Deformation of rubble-mound breakwaters under cyclic loads. *Coastal Engineering*, 58(6) :528–539. (Cité page 41.)
- [34] Cihan, K., Yuksel, Y., Berilgen, M., and Cevik, E. O. (2012). Behavior of homogenous rubble mound breakwaters materials under cyclic loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1) :1–10. (Cité page 41.)

- [35] Construction Industry Research and Information Association, Civielttechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (Netherlands), and Centre d'études maritimes et fluviales (France) (2007). *The Rock Manual : The use of rock in hydraulic engineering*, volume 683. Ciria, London. (Cité page 24.)
- [36] Cooper, J. A. G. and McKenna, J. (2008). Social justice in coastal erosion management : The temporal and spatial dimensions. *Geoforum*, 39(1) :294–306. (Cité page 37.)
- [37] Craik, A. D. (2004). The origins of water wave theory. *Annual review of fluid mechanics*, 36(1) :1. (Cité page 48.)
- [38] Darrigol, O. (2003). The spirited horse, the engineer, and the mathematician : water waves in nineteenth-century hydrodynamics. *Archive for history of exact sciences*, 58(1) :21–95. (Cité page 48.)
- [39] Das, I. and Dennis, J. (1996). Normal-boundary intersection : An alternate method for generating pareto optimal points in multicriteria optimization problems. Technical report, DTIC Document. (Cité page 96.)
- [40] Davies, A. and Heathershaw, A. (1984). Surface-wave propagation over sinusoidally varying topography. *Journal of Fluid Mechanics*, 144 :419–443. (Cité pages 73 et 74.)
- [41] De Girolamo, P. (1996). An experiment on harbour resonance induced by incident regular waves and irregular short waves. *Coastal engineering*, 27(1) :47–66. (Cité page 35.)
- [42] De Graauw, A. (1986). Wave statistics based on ship's observations. *Coastal engineering*, 10(2) :105–118. (Cité page 34.)
- [43] de Haan, W. (1991). Deterministic computer-aided optimum design of rock rubble-mound breakwater cross-sections. *Coastal engineering*, 15(1) :3–19. (Cité page 35.)
- [44] Dean, R. G., Chen, R., and Browder, A. E. (1997). Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA. *Coastal Engineering*, 29(3) :291–315. (Cité page 37.)
- [45] Delft Hydraulics Laboratory (1981). *Wave Penetration Into Harbours : Comparison of Computation and Model Measurement*. (Cité page 72.)
- [46] Dong, G., Gao, J., Ma, X., Wang, G., and Ma, Y. (2013). Numerical study of low-frequency waves during harbor resonance. *Ocean Engineering*, 68 :38–46. (Cité page 36.)
- [47] Du, Y., Pan, S., and Chen, Y. (2010). Modelling the effect of wave overtopping on nearshore hydrodynamics and morphodynamics around shore-parallel breakwaters. *Coastal Engineering*, 57(9) :812–826. (Cité page 36.)

- [48] El Chahal, G. (2007). *Optimisation pour les problèmes d'interaction fluide - structure : application à la modélisation d'un brise-lame flottant*. PhD thesis. Thèse de doctorat dirigée par Lafon, Pascal et Younes, Rafic Systèmes mécaniques et matériaux Troyes 2007. (Cité pages 20 et 55.)
- [49] Elchahal, G., Lafon, P., and Younes, R. (2008a). Comparing Various Methods for Topology and Shape Optimization of Floating Breakwaters. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 3(2) :186–199. (Cité pages 38, 39, 40 et 110.)
- [50] Elchahal, G., Lafon, P., and Younes, R. (2009a). Design optimization of floating breakwaters with an interdisciplinary fluid–solid structural problem. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(11) :1732–1743. (Cité pages 23, 25, 26, 33, 38, 39, 40, 48, 55, 63, 79 et 110.)
- [51] Elchahal, G., Younes, R., and Lafon, P. (2006). SHAPE AND MATERIAL OPTIMIZATION OF A 2d VERTICAL ... *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 1(5) :355–62. (Cité pages 38, 39, 40, 110 et 112.)
- [52] Elchahal, G., Younes, R., and Lafon, P. (2008b). The effects of reflection coefficient of the harbour sidewall on the performance of floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 35(11–12) :1102–1112. (Cité page 40.)
- [53] Elchahal, G., Younes, R., and Lafon, P. (2009b). Parametrical and motion analysis of a moored rectangular floating breakwater. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 131(3) :1–11. (Cité page 40.)
- [54] Elchahal, G., Younes, R., and Lafon, P. (2013). Optimization of coastal structures : Application on detached breakwaters in ports. *Ocean Engineering*, 63 :35–43. (Cité pages 25, 26, 36, 40, 42, 50, 100 et 102.)
- [55] Elsharnouby, B., Soliman, A., Elnaggar, M., and Elshahat, M. (2012). Study of environment friendly porous suspended breakwater for the Egyptian North-western Coast. *Ocean Engineering*, 48 :47–58. (Cité page 40.)
- [56] Farmer, A. L. (1999). Investigation into snap loading of cables used in moored breakwaters. Master's thesis, Virginia Tech, Virginia. (Cité page 22.)
- [57] Filianoti, P. (2000). Diffraction of random wind-generated waves by detached breakwater or breakwater gap. *Ocean Engineering*, 27(11) :1249–1263. (Cité page 33.)
- [58] Franco, L. (1994). Vertical breakwaters : the Italian experience. *Coastal Engineering*, 22(1) :31–55. (Cité pages 36, 37 et 39.)
- [59] Franco, L., Lamberti, A., Noli, A., and Tomasicchio, U. (1986). Evaluation of risk applied to the designed breakwater of Punta Riso at Brindisi, Italy. *Coastal engineering*, 10(2) :169–191. (Cité pages 33, 35, 36, 38 et 39.)

- [60] Galor, W. (2007). The effect of ship's impact on sea bed in shallow water. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 7(3) :105–114. (Cité page 37.)
- [61] Gesraha, M. R. (2006). Analysis of shaped floating breakwater in oblique waves : I. Impervious rigid wave boards. *Applied Ocean Research*, 28(5) :327–338. (Cité page 39.)
- [62] Gill, P. E., Murray, W., and Wright, M. H. (1981). *Practical optimization*. Academic Press, London ; New York. (Cité page 93.)
- [63] Girolamo, P., Kostense, D., K, J., and Dingemans, M. W. (1988). INCLUSION OF WAVE BREAKING IN A MILD-SLOPE MODEL. Venise. (Cité pages 48 et 53.)
- [64] Günaydın, K. and Kabdaşlı, M. (2004). Performance of solid and perforated U-type breakwaters under regular and irregular waves. *Ocean Engineering*, 31(11-12) :1377–1405. (Cité page 40.)
- [65] Günaydın, K. and Kabdaşlı, M. (2007). Investigation of II-type breakwaters performance under regular and irregular waves. *Ocean Engineering*, 34(7) :1028–1043. (Cité page 40.)
- [66] Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. World Scientific. (Cité pages 48 et 53.)
- [67] Hardaway, C. S. and Gunn, J. R. (2010). Design and performance of headland bays in Chesapeake Bay, USA. *Coastal Engineering*, 57(2) :203–212. (Cité pages 35, 37, 39 et 40.)
- [68] Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). (Cité pages 34 et 52.)
- [69] Hattori, M., Arami, A., and Yui, T. (1994). Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types. *Coastal Engineering*, 22(1) :79–114. (Cité page 39.)
- [70] Hereman, W. (2012). Shallow water waves and solitary waves. In *Mathematics of Complexity and Dynamical Systems*, pages 1520–1532. Springer. (Cité page 33.)
- [71] Hong, K.-S. and Ngo, Q. H. (2012). Dynamics of the container crane on a mobile harbor. *Ocean Engineering*, 53 :16–24. (Cité page 33.)
- [72] Hornby, A. S., Cowie, A. P., and Hornby, A. S. (1989). *Oxford advanced learner's dictionary of current English*. Oxford University Press, Oxford. (Cité page 30.)

- [73] Hsu, W.-K. K. (2012). Ports' service attributes for ship navigation safety. *Safety Science*, 50(2) :244–252. (Cité page [41](#).)
- [74] HU, J.-p., YU, Y.-x., and ZHU, L.-s. (2006). Research on wave forces acting on the unit length of a vertical breakwater by tests and a numerical model. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 18(5) :512–519. (Cité page [37](#).)
- [75] Huband, S., Hingston, P., Barone, L., and While, L. (2006). A review of multiobjective test problems and a scalable test problem toolkit. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 10(5) :477–506. (Cité page [97](#).)
- [76] Hughes, S. A. and Schwichtenberg, B. R. (1998). Current-induced scour along a breakwater at Ventura Harbor, CA—Experimental study. *Coastal engineering*, 34(1) :1–22. (Cité page [42](#).)
- [77] Hur, D.-S., Kim, C.-H., and Yoon, J.-S. (2010). Numerical study on the interaction among a nonlinear wave, composite breakwater and sandy seabed. *Coastal Engineering*, 57(10) :917–930. (Cité pages [33](#) et [36](#).)
- [78] Inman, D. L. and Bowen, A. J. (1962). Flume experiments on sand transport by waves and currents. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(8) :11. (Cité page [75](#).)
- [79] Isebe, D., Azerad, P., Mohammadi, B., and Bouchette, F. (2008). Optimal shape design of defense structures for minimizing short wave impact. *Coastal Engineering*, 55(1) :35–46. (Cité page [36](#).)
- [80] Isobe, M. (2013). Impact of global warming on coastal structures in shallow water. *Ocean Engineering*, 71 :51–57. (Cité page [36](#).)
- [81] Jordi, A., Basterretxea, G., Casas, B., Anglès, S., and Garcés, E. (2008). Seiche-forced resuspension events in a Mediterranean harbour. *Continental Shelf Research*, 28(4-5) :505–515. (Cité page [37](#).)
- [82] Juul Jensen, O. and Sorensen, T. (1979). Overspilling/overtopping of rubble-mound breakwaters. Results of studies, useful in design procedures. *Coastal Engineering*, 3 :51–65. (Cité page [36](#).)
- [83] Kamphuis, J. (2006). Coastal engineering—quo vadis? *Coastal Engineering*, 53(2-3) :133–140. (Cité pages [31](#), [32](#), [33](#), [35](#) et [36](#).)
- [84] Kantardgi, I., Mairanovsky, F., and Sapova, N. (1995). Water exchange and water quality in the coastal zone in the presence of structures. *Coastal engineering*, 26(3) :207–223. (Cité pages [32](#) et [38](#).)
- [85] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In , *IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. Proceedings*, volume 4, pages 1942–1948 vol.4. (Cité page [95](#).)

- [86] Kim, H., Do, K. D., and Suh, K.-D. (2011). Scattering of obliquely incident water waves by partially reflecting non-transmitting breakwaters. *Ocean Engineering*, 38(1) :148–158. (Cité pages 36 et 42.)
- [87] Kim, I. and de Weck, O. (2005). Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization : Pareto front generation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29(2) :149–158. (Cité page 95.)
- [88] Kirkgöz, M. S. (1992). Influence of water depth on the breaking wave impact on vertical and sloping walls. *Coastal engineering*, 18(3) :297–314. (Cité page 37.)
- [89] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598) :671–680. (Cité page 94.)
- [90] Knowles, J. (2004). A Hybrid Algorithm with On-line Landscape Approximation for Expensive Multiobjective Optimization Problems. Technical Report Technical Report TR-COMPSYSBIO-2004-01, University of Manchester, Manchester, UK. (Cité page 99.)
- [91] Koutandos, E., Prinos, P., and Gironella, X. (2005). Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing : reflection and transmission characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 43(2) :174–188. (Cité pages 22, 23, 79 et 80.)
- [92] Kuhn, H. W. and Tucker, A. W. (1951). Nonlinear Programming. The Regents of the University of California. (Cité page 92.)
- [93] Latham, J.-P., Van Meulen, J., and Dupray, S. (2006). Prediction of in-situ block size distributions with reference to armourstone for breakwaters. *Engineering Geology*, 86(1) :18–36. (Cité page 38.)
- [94] Laurent, L. (2013). *Stratégie multiparamétrique et métamodèles pour l'optimisation multiniveaux de structures*. phdthesis, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan. (Cité page 99.)
- [95] Lebey, M. and Rivoalen, E. (2002). Experimental study of the working principal and efficiency of a superposed inclined planes wave absorber. *Ocean engineering*, 29(11) :1427–1440. (Cité page 43.)
- [96] Lee, H. S., Kim, S. D., Wang, K.-H., and Eom, S. (2009). Boundary element modeling of multidirectional random waves in a harbor with a rectangular navigation channel. *Ocean Engineering*, 36(17-18) :1287–1294. (Cité page 42.)
- [97] Ligteringen, H. and Velsink, H. (2012). *Ports and terminals*. Delft : VSSD, 1st edition. (Cité page 24.)
- [98] Ling, H. I. (2001). Recent applications of sliding block theory to geotechnical design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(3) :189–197. (Cité page 41.)

- [99] Liu, Y. and Li, Y.-c. (2011). Wave interaction with a wave absorbing double curtain-wall breakwater. *Ocean Engineering*, 38(10) :1237–1245. (Cité pages 40 et 43.)
- [100] Massel, S. R. (1993). Extended refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Engineering*, 19(1) :97–126. (Cité pages 35 et 51.)
- [101] McCabe, M., Stansby, P., and Apsley, D. (2013). Random wave runup and overtopping a steep sea wall : Shallow-water and Boussinesq modelling with generalised breaking and wall impact algorithms validated against laboratory and field measurements. *Coastal Engineering*, 74 :33–49. (Cité pages 36 et 37.)
- [102] Mei, C. C. (1989). *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific. (Cité page 54.)
- [103] Merlevede, K. (2012). Study of the functional design of a floating offshore. Master’s thesis, Ghent University, Belgium. (Cité pages 21 et 22.)
- [104] Messac, A. (2015). *Optimization in practice with MATLAB for engineering students and professionals*. Cambridge University Press. (Cité page 97.)
- [105] Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., and Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6) :1087. (Cité page 94.)
- [106] Michailides, C. and Angelides, D. C. (2012). Modeling of energy extraction and behavior of a Flexible Floating Breakwater. *Applied Ocean Research*, 35 :77–94. (Cité page 39.)
- [107] Morgan Young, D. and Testik, F. Y. (2011). Wave reflection by submerged vertical and semicircular breakwaters. *Ocean Engineering*, 38(10) :1269–1276. (Cité page 40.)
- [108] Neelamani, S. and Rajendran, R. (2002a). Wave interaction with ‘ $\perp$ ’-type breakwaters. *Ocean engineering*, 29(5) :561–589. (Cité pages 32, 35, 36 et 40.)
- [109] Neelamani, S. and Rajendran, R. (2002b). Wave interaction with T-type breakwaters. *Ocean Engineering*, 29(2) :151–175. (Cité page 40.)
- [110] Nguyen, V. D. (2015). *Validation and robust optimization of deep drawing process by simulation in the presence of uncertainty*. Thèse de doctorat, Université de technologie, Troyes, France. (Cité page 99.)
- [111] Ohtsu, K., Shoji, K., and Okazaki, T. (1996). Minimum-time maneuvering of a ship, with wind disturbances. *Control Engineering Practice*, 4(3) :385–392. (Cité page 41.)
- [112] Oliver, J., Aristaghes, P., Cederwall, K., Davidson, D., De Graaf, F., Thackery, M., and Torum, A. (1994). *Floating breakwaters : A practical guide for design and construction*, volume 13. PIANC Rep. (Cité pages 21 et 22.)

- [113] Ondiviela, B., Gómez, A. G., Puente, A., and Juanes, J. A. (2013). A pragmatic approach to define the ecological potential of water bodies heavily modified by the presence of ports. *Environmental Science & Policy*, 33 :320–331. (Cité page 33.)
- [114] Oumeraci, H. (1994). Review and analysis of vertical breakwater failures—lessons learned. *Coastal Engineering*, 22(1) :3–29. (Cité pages 36 et 39.)
- [115] Ozeren, Y., Wren, D., Altinakar, M., and Work, P. (2011). Experimental investigation of cylindrical floating breakwater performance with various mooring configurations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(6) :300–309. (Cité page 21.)
- [116] Ozgur KIRCA, V. and Sedat KABDAŞLI, M. (2009). Reduction of non-breaking wave loads on caisson type breakwaters using a modified perforated configuration. *Ocean Engineering*, 36(17-18) :1316–1331. (Cité page 40.)
- [117] Patil, S., Mandal, S., and Hegde, A. (2012). Genetic algorithm based support vector machine regression in predicting wave transmission of horizontally interlaced multi-layer moored floating pipe breakwater. *Advances in Engineering Software*, 45(1) :203–212. (Cité page 39.)
- [118] Peña, E., Ferreras, J., and Sanchez-Tembleque, F. (2011). Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters. *Ocean Engineering*, 38(10) :1150–1160. (Cité page 40.)
- [119] Piccoli, C. (2014). *Economic optimization of breakwaters-Case study : Maintenance of Port of Constantza's Northern Breakwater*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology. (Cité pages 24 et 25.)
- [120] Pierson, W., Neumann, G., and James, R. (1955). *Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves By Means of Wave Spectra and Statistics*. Us Navy Hydrographic Office Pub. No. 603. (Cité page 35.)
- [121] Pos, J. D. and Kilner, F. A. (1987). Breakwater gap wave diffraction : an experimental and numerical study. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 113(1) :1–21. (Cité page 50.)
- [122] Puertos del Estado (España) (2007). *ROM 3.1-99 : recommendations for the design of the maritime configuration of ports, approach channels and harbour basins*. Puertos del Estado, [Madrid. (Cité pages 41, 42, 43 et 44.)
- [123] Putnam, J. A. and Johson, J. W. (1949). The dissipation of wave energy by bottom friction. *Transactions, American Geophysical Union*, 30(1) :67. (Cité pages 35, 48 et 53.)
- [124] Rakha, K. A. and Kamphuis, J. W. (1997). Wave-induced currents in the vicinity of a seawall. *Coastal engineering*, 30(1) :23–52. (Cité page 35.)

- [125] Roddier, D. and Weinstein, J. (2010). Floating wind turbines. *Mechanical Engineering*, 132(4) :28. (Cité page 17.)
- [126] Rojanakamthorn, S., Isobe, M., and Watanabe, A. (1993). Modeling of wave transformation on submerged breakwater. In *COASTAL ENGINEERING CONFERENCE*, volume 1, pages 1060–1060. ASCE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. (Cité page 50.)
- [127] Rusu, E. and Guedes Soares, C. (2011). Wave modelling at the entrance of ports. *Ocean Engineering*, 38(17-18) :2089–2109. (Cité page 42.)
- [128] Sannasiraj, S., Sundar, V., and Sundaravadivelu, R. (1995). The hydrodynamic behaviour of long floating structures in directional seas. *Applied Ocean Research*, 17(4) :233–243. (Cité page 80.)
- [129] Sasa, K. and Incecik, A. (2012a). Numerical simulation of anchored ship motions due to wave and wind forces for enhanced safety in offshore harbor refuge. *Ocean Engineering*, 44 :68–78. (Cité page 20.)
- [130] Sasa, K. and Incecik, A. (2012b). Numerical simulation of anchored ship motions due to wave and wind forces for enhanced safety in offshore harbor refuge. *Ocean Engineering*, 44 :68–78. (Cité page 43.)
- [131] Schelfn, T. E. and Østergaard, C. (1995). The vessel in port : Mooring problems. *Marine structures*, 8(5) :451–479. (Cité page 41.)
- [132] Schüttrumpf, H. and Oumeraci, H. (2005). Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at seadikes. *Coastal Engineering*, 52(6) :473–495. (Cité page 36.)
- [133] Seo, M.-G. and Kim, Y. (2011). Numerical analysis on ship maneuvering coupled with ship motion in waves. *Ocean Engineering*, 38(17-18) :1934–1945. (Cité page 41.)
- [134] Shankar, N. J. and Jayaratne, M. P. R. (2003). Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes of coastal structures. *Ocean Engineering*, 30(2) :221–238. (Cité page 36.)
- [135] Silvester, R. (1978). What direction coastal engineering ? *Coastal Engineering*, 2 :327–349. (Cité pages 36, 37, 39 et 40.)
- [136] Simpson, T., Poplinski, J., Koch, N. P., and Allen, J. (2001). Metamodels for Computer-based Engineering Design : Survey and recommendations. *Engineering with Computers*, 17(2) :129–150. (Cité page 98.)
- [137] Spătaru, A. N. (1990). Breakwaters for the protection of Romanian beaches. *Coastal Engineering*, 14(2) :129–146. (Cité page 39.)

- [138] Stansberg, C., Torum, A., and Naess, S. (1990). On a model study of a box type floating breakwater. In *Proceedings of the PIANC Conference*, Osaka, Japan. (Cité page 23.)
- [139] Stive, M. (1984). Energy dissipation in waves breaking on gentle slopes. *Coastal Engineering*, 8(2) :99–127. (Cité pages 76 et 77.)
- [140] Stokes, G. G. (1847). On the theory of oscillatory waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8 :441–455. (Cité page 35.)
- [141] Suh, K.-D., Kim, S.-W., Kim, S., and Cheon, S. (2013). Effects of climate change on stability of caisson breakwaters in different water depths. *Ocean Engineering*, 71 :103–112. (Cité page 32.)
- [142] Suh, K. D., Lee, C., and Park, W. S. (1997). Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography. *Coastal Engineering*, 32(2–3) :91–117. (Cité page 51.)
- [143] Tanimoto, K. and Takahashi, S. (1994). Design and construction of caisson breakwaters—the Japanese experience. *Coastal engineering*, 22(1) :57–77. (Cité pages 30, 33 et 35.)
- [144] Tomasicchio, G. R., D'Alessandro, F., Barbaro, G., and Malara, G. (2013). General longshore transport model. *Coastal Engineering*, 71 :28–36. (Cité pages 31, 32, 33, 35 et 36.)
- [145] US Army Engineer Waterways Experiment Station (1984). Manual, shore protection. *US Government Printing Office, Washington, DC*, 1. (Cité page 72.)
- [146] Van de Kreeke, J. and Paape, A. (1964). On optimum breakwater design. In *Proceedings of 9th Conference on Coastal Engineering*, pages 532–552, Lisbon, Portugal. New York, NY : American Society of Civil Engineers. (Cité page 24.)
- [147] van der Meer, J. W., Verhaeghe, H., and Steendam, G. J. (2009). The new wave overtopping database for coastal structures. *Coastal Engineering*, 56(2) :108–120. (Cité page 36.)
- [148] Vidal, C., Medina, R., and Lomónaco, P. (2006). Wave height parameter for damage description of rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(9) :711–722. (Cité pages 32, 33, 35 et 36.)
- [149] Watanabe, E., Utsunomiya, T., and Wang, C. (2004). Hydroelastic analysis of pontoon-type vlfs : a literature survey. *Engineering structures*, 26(2) :245–256. (Cité pages 15 et 19.)
- [150] Weng, W.-k., Kuo, Y.-y., and Chou, C.-R. (1996). Analysis of forces due to irregular waves exerted on a ship near a harbor entrance. *Marine structures*, 9(6) :609–629. (Cité page 43.)

- [151] Williams, A. and Abul-Azm, A. (1997). Dual pontoon floating breakwater. *Ocean Engineering*, 24(5) :465–478. (Cité page 21.)
- [152] World Resources Institute, United Nations Environment Programme, and United Nations Development Programme (1992). *World resources 1992-93 : a report*. Oxford University Press, New York. (Cité page 29.)
- [153] Xie, M.-x. and Zhang, W. (2010). Numerical study on the three-dimensional characteristics of the tidal current around harbor entrance. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(6) :847–855. (Cité pages 38 et 42.)
- [154] Yang, C., Lu, H.-d., and Löhner, R. (2010). On the simulation of highly nonlinear wave-breakwater interactions. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5) :975–981. (Cité page 36.)
- [155] Yavin, Y., Frangos, C., Zilman, G., and Miloh, T. (1995). Computation of feasible command strategies for the navigation of a ship in a narrow zigzag channel. *Computers & mathematics with applications*, 30(10) :79–101. (Cité page 41.)
- [156] Yeganeh-Bakhtiary, A., Hajivalie, F., and Hashemi-Javan, A. (2010). Steady streaming and flow turbulence in front of vertical breakwater with wave overtopping. *Applied Ocean Research*, 32(1) :91–102. (Cité page 36.)
- [157] Yu, Y.-X., Liu, S.-X., Li, Y. S., and Wai, O. W. (2000). Refraction and diffraction of random waves through breakwater. *Ocean Engineering*, 27(5) :489–509. (Cité page 42.)
- [158] Zidan, A., Rageh, O., Sarhan, T., and El-Sharabasy, M. (2012). Wave interaction with single and twin pontoons. In *Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC*, volume 16, Istanbul, Turkey. (Cité page 23.)
- [159] Zuo, S.-h. and Li, B. (2010). Study on hydrodynamic and sedimentation problems in development of harbors located at offshore area with many islands and tidal channels. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(5) :587–592. (Cité page 37.)
- [160] Zuo, S.-H., Zhang, N.-C., Li, B., Zhang, Z., and Zhu, Z.-X. (2009). Numerical simulation of tidal current and erosion and sedimentation in the Yangshan deep-water harbor of Shanghai. *International Journal of Sediment Research*, 24(3) :287–298. (Cité page 38.)
- [161] Zyserman, J. A., Johnson, H. K., Zanuttigh, B., and Martinelli, L. (2005). Analysis of far-field erosion induced by low-crested rubble-mound structures. *Coastal Engineering*, 52(10-11) :977–994. (Cité page 37.)

Hassan DIAB

Doctorat : Matériaux, Mécanique, Optique et Nanotechnologie

Année 2016

Modélisation et optimisation de structures flottantes pour l'aide à la décision d'aménagement portuaire

L'objectif de cette thèse était de proposer une contribution dans le domaine de la modélisation du comportement de digues flottantes permettant d'optimiser le positionnement et le dimensionnement de ces structures. La finalité étant de participer à la définition d'outils d'aide à la décision pour l'aménagement portuaire destiné à la protection des installations. Nous avons proposé un nouveau modèle de comportement de digues flottantes. Ce modèle de comportement simple et efficace combine deux modèles. Le premier est un modèle de Berkhoff étendu et amélioré qui prend en compte les effets de frottement au fond, de bathymétrie fortement variable et de déferlement. Il permet d'évaluer dans le plan horizontal du port la propagation de la houle. Le second est un modèle décrivant le comportement hydrodynamique d'une digue flottante dans le plan vertical de sa section transversale. Une étude paramétrique a permis de valider globalement ce nouveau modèle. Nous avons proposé ensuite une démarche d'optimisation spécifique basée sur une formulation multicritère du problème d'optimisation et utilisant des techniques de méta modélisation et un algorithme stochastique pour accélérer les calculs. Le front de Pareto obtenu permet pour un port donné, de déterminer la capacité maximale d'absorption de la houle et les dimensions de la plus petite digue.

Mots clés : hydrodynamique - simulation par ordinateur - ports, conception et construction - algorithmes génétiques - prise de décision.

Modeling and Optimization of Floating Structures for Decision Making in Harbor Development

The objective of this thesis is to add a contribution in the field of modeling of the behavior of floating breakwaters, in order to optimize the positioning and sizing of these structures. It is aimed to participate in the definition of the decision making techniques in harbor development intended to the protection of installations. A new model for the behavior of floating breakwaters is proposed. This simple and efficient behavior model combines two models: The first is an extended and improved Berkhoff model that takes into account the effects of bed friction, highly variable bathymetry and wave breaking so that the propagation of waves in the horizontal plane of harbor is evaluated. The second model describes the hydrodynamic behavior of a floating breakwater in the vertical plane of its cross section. A parametric study is used to globally validate the new model, after which a specific optimization approach based on a multi criteria formulation of the optimization problem is proposed. Meta-modeling techniques and stochastic algorithm are together employed to speed up the calculations. The obtained Pareto front allows, for a given harbor, to determine the maximum absorption capacity of waves and the dimensions of the smallest breakwater.

Keywords: hydrodynamics - computer simulation - harbors, design and construction - genetic algorithms - decision making.

Thèse réalisée en partenariat entre :

