

Optimisation des engins de pêche en terme d'économie de carburant

Ramez Khaled

▶ **To cite this version:**

Ramez Khaled. Optimisation des engins de pêche en terme d'économie de carburant. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2012. Français. NNT : 2012BRES0011 . tel-00788335

HAL Id: tel-00788335
https://theses.hal.science/tel-00788335

Submitted on 14 Feb 2013

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.

université de bretagne occidentale

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Sous le sceau de l'Institut Universitaire Européen de la Mer

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Génie mécanique, mécanique des fluides et énergétiques

Spécialité : Mathématiques appliquées et Informatique

École Doctorale Sciences de la Mer

présentée par

Ramez KHALED

Préparée à l'IFREMER Brest,
dpt. Sciences et Technologies Halieutiques

Optimisation des engins de pêche en terme d'économie de carburant

Thèse soutenue le 30 avril 2012
devant le jury composé de :

M. Frédéric MUTTIN
Enseignant-Chercheur, EIGSI, La Rochelle / *rapporteur*

M. Adnan YASSINE
Professeur, ISEL, Le Havre / *rapporteur*

M. Jean-Yves BILLARD
Professeur, École Navale, Brest / *directeur de thèse*

Mme Mariko DUNSEATH-TERAO
Professeur, Institut de Physique de Rennes / *examinateur*

Mme Claude GUENNOU
Maître de conférences, UBO, Brest / *examinateur*

M. Daniel PRIOUR
Ingénieur de Recherche, IFREMER, Brest / *co-directeur*

M. Benoît VINCENT
Ingénieur de Recherche, IFREMER, Lorient / *examinateur*

Remerciements

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet HYDROPECHE reliant plusieurs laboratoires universitaires et de recherches. Le travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire LTH (Technologies Halieutiques) et du service HO (Hydrodynamique Océano-Météo) de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) du Centre de Bretagne en partenariat avec l'École Navale de Brest. Ce projet a été financé par la DPMA (Direction des Pêches Maritimes et de l'Aquaculture) et le FEP (Fonds Européen pour la Pêche) à qui j'exprime mes sincères reconnaissances.

Je souhaite remercier, en premier lieu, mes encadrants M. Daniel PRIOUR, ingénieur chercheur à l'IFREMER (Brest) et M. Jean-Yves BILLARD professeur à l'École Navale de Brest, pour m'avoir accueilli au sein de leurs instituts et m'avoir constamment encouragé. Je leur suis également reconnaissant pour leurs qualités pédagogiques, scientifiques et professionnelles. De ce fait, je leur adresse toute ma gratitude pour la confiance qu'ils m'ont accordée, leur soutien constant et leur disponibilité tout au long de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du projet HYDROPECHE sous la direction de M. Grégory GERMAIN, pour tous les précieux conseils qu'ils m'ont prodigués ainsi que la confiance qu'ils m'ont témoignée.

Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse : M. Frédéric MUTTIN, enseignant chercheur à l'EIGSI (Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels) de La Rochelle, ainsi que M. Adnan YASSINE, professeur à l'ISEL (Institut Supérieur d'Études Logistiques) et directeur du LMAH (Laboratoire des Mathématiques Appliquées à l'Université du Havre), pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

J'associe à ces remerciements Mme Mariko DUNSEATH-TERAO, professeur à l'Institut de Physique de Rennes, Mme Claude GUENNOU, maître de conférences à l'Université de Bretagne Occidentale (Brest) et M. Benoît VINCENT, ingénieur chercheur à l'IFREMER de Lorient, pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier tout le personnel du laboratoire LTH sous la direction de M. Pascal LARNAUD et du service HO sous la direction de M. Gilbert DAMY et plus particulièrement ceux qui se reconnaîtront, pour leur soutien et leur bonne humeur.

Enfin je remercie mes parents pour leur encouragement et leur soutien pendant ces années de thèse.

Table des matières

Remerciements i

I Introduction **1**

I.1 Industrie de la pêche 1

I.2 Les études sur les économies d'énergie à la pêche 3

I.3 Types de chalut 4

I.4 Capturabilité et sélectivité 5

I.5 Contexte du projet Hydropêche 6

I.6 L'objectif de la thèse 7

II Modélisation mécanique du filet **9**

II.1 L'approche discrète 10

II.2 Approche de globalisation des mailles 11

II.3 Méthode des éléments finis 14

II.3.1 Génération du maillage numérique 14

II.3.2 Éléments finis 15

II.3.3 Élément triangulaire et formulation directe 17

II.3.4 Champ de forces 19

II.3.4.1 Tension des fils 19

II.3.4.2 Traînée hydrodynamique 20

II.3.4.3 Pression d'une prise de poisson 22

II.3.4.4 Flottabilité et poids 23

II.3.4.5 Traînée sur le fond 23

II.3.5 Calcul de l'équilibre 24

II.3.5.1 Par le principe fondamental de la dynamique 24

III Méthodes d'optimisation **25**

III.1 Types de méthodes d'optimisation 26

III.1.1 Les méthodes déterministes 26

III.1.2 Les méthodes stochastiques 27

III.2 Méthodes adaptées au cas de chalut 27

III.2.1 Exemple académique 27

III.2.2 Recherche aléatoire 29

III.2.2.1 Principe 29

III.2.2.2 Application au filet triangulaire 29

III.2.3 Recherche par coordonnées 32

III.2.3.1 Principe 32

III.2.3.2 Application au filet triangulaire 33

III.2.4 Hooke & Jeeves 34

III.2.4.1 Principe 34

III.2.4.2 Application au filet triangulaire 36

III.2.5 Simplex 39

III.2.5.1 Principe 39

III.2.5.2 Application au filet triangulaire 40

III.2.6 Recuit simulé 42

III.2.6.1 Principe 42

III.2.6.2 Application au filet triangulaire 43

III.2.7 Combinaison Recuit simulé avec Simplex 45

III.2.7.1 Principe 45

III.2.7.2 Application au filet triangulaire 46

III.3 Étude comparative entre ces méthodes 49

IV Méthodes d'optimisation appliquée au cas des chaluts **53**

IV.1 Description des chaluts 54

IV.1.1 Chalut pélagique 54

IV.1.2 Chalut de fond 54

IV.2 Paramètres d'optimisation 55

IV.2.1 Fonction objectif 55

IV.2.1.1 Traînée du chalut 58
IV.2.1.2 Surface d'ouverture de la gueule du chalut 59
IV.2.2 Paramètres numériques 59
IV.2.2.1 Taille de discrétisation 59
IV.2.2.2 Taille de modification 60
IV.2.2.3 Paramètre de Newton-Raphson 61
IV.2.3 Contraintes 61
IV.2.3.1 Procédure d'exclusion de certaines pièces du filet (cas d'optimisation par pièces du filet d'un chalut) 62
IV.2.3.2 Corde de dos couvrant le bourrelet (cas d'un chalut de fond) 62
IV.2.3.3 Contact avec le fond de la mer (cas d'un chalut de fond) . 63
IV.3 Méthodes adaptées 63
IV.3.1 RS (Random Search) 63
IV.3.2 SOT (Successive Optimisation Tool) appliquée aux pièces du filet . 66
IV.3.2.1 Description de la méthode d'optimisation 66
IV.3.2.2 Exemple détaillé illustrant le processus d'optimisation . . 67
IV.3.3 SRT (Sequential Refinement Technique) 69
IV.3.3.1 Description de la méthode d'optimisation 69
IV.3.3.2 Différence de méthodologie entre les deux méthodes SOT et SRT 69
IV.3.4 SOT appliquée aux câbles d'un chalut 70
IV.3.4.1 Procédure d'optimisation 71
IV.4 Principe d'homothétie 73
IV.5 Économie potentielle en énergie et/ou en temps 74

V Résultats **75**
V.1 Application de SOT aux chaluts pélagiques 76
V.1.1 Comparaison entre les deux méthodes SOT et RS 77
V.1.2 Application du principe de l'homothétie 80
V.2 Application de SOT sur les pièces de filet du chalut de fond 83
V.2.1 Sans prise en compte la distribution de poisson 83
V.2.1.1 Fonction objectif 83

V.2.1.2 Résultats 83
V.2.1.3 Économie financière de carburant et économie de temps . 86
V.2.2 Avec prise en compte de la distribution de poisson 89
V.2.2.1 Résultats 90
V.2.2.2 Vitesse d'exécution 95
V.2.2.3 Économie financière de carburant et économie de temps . 95
V.2.2.4 Prise de poisson 96
V.3 Application de SRT pour optimiser les pièces de filet du chalut de fond . . 98
V.3.1 Processus d'optimisation 98
V.4 Application de SOT sur les câbles du chalut de fond 101
V.4.1 Résultats de l'optimisation 103
V.4.2 Temps d'exécution de la procédure 106
V.4.3 Économie financière de carburant et économie de temps 106

VI Validation de l'optimisation et de la simulation 109
VI.1 Essai en bassin d'une maquette de chalut pélagique 109
VI.2 Manipulation en bassin sur des maquettes de filet rectangulaires 111
VI.2.1 Présentation des maquettes 111
VI.2.2 Dispositif expérimental 112
VI.2.3 Protocole expérimental 114
VI.2.4 Maquette témoin 1242 115
VI.2.5 Maquettes 1232 référence et optimisée 115
VI.3 Discussion et conclusions sur les essais en bassin 118

VII Discussion et conclusion 121
VII.1 Discussion 121
VII.1.1 Application de SOT aux chaluts pélagiques 121
VII.1.1.1 Comparaison avec la méthode RS 122
VII.1.1.2 Application du principe d'homothétie 122
VII.1.2 Application de SOT sur les pièces de filet d'un chalut de fond sans tenir compte de la distribution de poisson 123

VII.1.3 Application de SOT sur les pièces de filet d'un chalut de fond en tenant compte de la distribution de poisson 124
VII.1.4 Influence d'une prise de poisson sur l'efficacité du chalut 124
VII.1.5 Application de SRT sur les pièces de filet d'un chalut de fond en tenant compte de la distribution de poisson 125
VII.1.6 Application de SOT sur les câbles d'un chalut de fond 125
VII.2 Conclusion générale 126
VII.3 Perspectives 128

Publications **131**

Annexes **133**

A Méthode de Newton-Raphson **135**

Bibliographie **137**

Chapitre I

Introduction

Les hydrocarbures fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) ne sont pas des ressources renouvelables. Au niveau mondial, le pétrole fournit environ 37% de l'énergie consommée. Viennent ensuite le gaz et le charbon. Ces énergies font l'objet d'un épuisement prévisible vu l'augmentation de la population mondiale et de la demande des pays émergents (Inde, Chine, Afrique). L'exploitation des ressources fossiles se fait en fonction des caractéristiques du gisement, de la teneur en substance utile, des possibilités technologiques et du contexte économique.

Les réserves sur Terre de ces matières organiques combustibles (les énergies fossiles) sont limitées, et leur combustion libère du CO_2 qui provoque de la pollution et contribue à l'effet de serre et au réchauffement climatique. Par conséquent, cela amène à se tourner soit vers une production d'énergie nucléaire, qui peut entraîner d'autres formes de pollution, soit vers des énergies renouvelables comme le vent et le soleil mais qui fournissent une énergie diffuse et parfois difficile à capter.

Faut-il continuer à utiliser ces énergies fossiles au même rythme, jusqu'à leur épuisement total ou bien essayer de trouver des solutions en économisant ces énergies ?

I.1 Industrie de la pêche

La pêche est une méthode de production alimentaire, grand consommateur d'énergie et qui dépend presque exclusivement des moteurs à combustion consommant des produits pétroliers.

L'industrie de la pêche en France est régie par le ministère des Pêches. Cet organisme gouvernemental établit et met en œuvre des normes pour le développement et la durabilité de l'industrie de la pêche en fournissant des réglementations pour la sauvegarde des stocks et la conservation des espèces de poisson et en soutenant la recherche.

L'industrie de la pêche comprend des emplois directement impliqués dans la pêche et des emplois indirects. Des emplois indirects dans l'industrie de la pêche concernent par exemple, la vente ou la fabrication de matériel de pêche et accessoires, la distribution de biens ou de services destinés à desservir le secteur de la pêche.

L'industrie de la pêche est directement tributaire du coût de l'énergie et son efficacité commerciale sera donc directement fonction du prix du carburant. La rentabilité économique des entreprises de pêche est compromise lorsque le prix du carburant augmente brutalement. Par conséquent, toute augmentation du prix de brut influence directement l'industrie de la pêche. En 2008, le prix du carburant a subi une augmentation de l'ordre de 100% et certains analystes prédisent une augmentation très significative du coût de l'énergie dans les prochaines années [Iea].

L'énergie fossile (fuel) consommée pour la capture des poissons est généralement considérée comme une mesure de cette dépendance énergétique. La moyenne de consommation de carburant s'élève à 0,6 l par kg de poisson pêché [Tye], mais peut varier entre 0,1 à 3 l/kg selon les espèces pêchées et les techniques de pêche utilisées.

Les ressources exploitées par les pêcheries françaises peuvent présenter des stocks faibles [Ifr]. Lorsque ceux-ci s'appauvrissent, la densité de poissons diminue poussant le pêcheur à poursuivre son action de pêche sur une distance plus importante et de ce fait à consommer plus d'énergie.

Vu l'augmentation du prix des carburants fossiles et son impact sur les entreprises de pêche, il semble indispensable d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de pêche.

Dans le paragraphe suivant nous allons citer quelques travaux réalisés concernant les économies d'énergie dans le domaine de la pêche et nous intéresser aux recherches réalisées dans ce domaine puis positionner notre travail.

I.2 Les études sur les économies d'énergie à la pêche

Le chalut est l'un des principaux engins de pêche utilisés en Europe et un grand nombre d'études ont été consacrées à son utilisation. La consommation de carburant liée au train de pêche d'un chalutier de fond (câbles, panneaux, filet) représente environ les deux tiers de sa consommation totale (l'autre tiers est consommé par la résistance à l'avancement du navire en transit et en action de pêche). La diminution de la consommation de carburant peut être obtenue par des modifications dans le plan du chalut.

Une étude norvégienne, Schau *et al.* [Sch], basée sur l'évolution des stratégies opérationnelles, les formes de la coque et l'introduction de sources d'énergie alternatives, suggère des moyens possibles pour réduire la consommation et les émissions de gaz à effet de serre. Une autre étude, danoise cette fois, (Bastardie *et al.* [Bas]) concerne l'adaptation de l'effort de pêche due à l'augmentation du coût de l'énergie. Cette étude montre que les pêcheurs sont sensés de :

i) réduire la distance entre le port et les zones de pêche,

ii) rechercher l'accès aux pêcheries les plus proches,

iii) réduire la longueur totale de l'excursion de pêche.

Une étude expérimentale décrite par Sala *et al.* [Sal] évalue la performance énergétique des navires de pêche sous différentes conditions de fonctionnement. Elle montre que les économies de carburant pourraient atteindre un niveau de 15% en réduisant la vitesse de navigation d'un demi-nœud.

Un chalut peut être tracté par un seul ou par deux navires, dans ce dernier cas on parle de *chalutage en bœuf*. Macdonald *et al.* [Mac] ont considéré la pêche à l'hameçon ("jigging") comme une alternative au chalut de pêche. Thomsen [Tho] a montré que le passage du chalutage à un bateau avec panneaux, au chalutage en bœuf (deux bateaux sans panneaux) permet une économie comprise entre 40 et 45% en carburant. D'autres techniques de pêche existent comme celle des chaluts jumeaux (deux chaluts traînés par un seul bateau). Dans ce cas Rihan [Rih] suggère de retourner à la technique traditionnelle d'un seul chalut au lieu des chaluts jumeaux afin de diminuer la consommation de carburant.

Kim *et al.* [Kim] ont développé une nouvelle analyse de performance des engins de pêche à l'aide des simulations numériques. Ils suggèrent la diminution du diamètre des

fils ou une augmentation de la taille de maillage. Ces modifications ont un impact positif sur la consommation de carburant. Dans le même sens, Ward *et al.* [War] ont testé en mer l'effet de ces deux modifications sur la consommation. Parente *et al.* [Par] ont réalisé des expériences similaires intéressant la pêche Portugaise. Ils ont modifié la vitesse des bateaux autour d'une vitesse critique et ont légèrement modifié certaines pièces de filet du chalut.

I.3 Types de chalut

Les chaluts sont des engins de pêche tractés par des bateaux. Ce sont des cônes de filet, filtrant l'eau et capturant les poissons. Ces cônes sont constitués de pièces de filet cousues les unes aux autres. L'ouverture verticale de la gueule (entrée du cône) est réalisée par des flotteurs sur la bordure supérieure (corde de dos) et des lests sur la bordure inférieure (bourrelet). L'ouverture horizontale est obtenue par deux panneaux, qui soumis à des efforts hydrodynamiques s'écartent l'un de l'autre. Cet ensemble est tracté par le bateau à l'aide de câbles, qui sont appelés funes entre le bateau et les panneaux, et bras (ou entremises) entre les panneaux et le filet.

Il existe différents types de chalutiers (fig. I.1) comme :

- Les chalutiers de petite pêche de 6 à 12 mètres qui disposent d'une puissance de l'ordre de 40 kW
- Les chalutiers de pêche côtière de 12 à 19 mètres (80 kW)
- Les chalutiers hauturiers de 20 à 33 mètres (120 kW)
- Les chalutiers industriels de 33 à 55 mètres (500 kW)
- Les chalutiers-congélateurs de plus de 50 mètres qui sont propulsés par de puissants moteurs de l'odre de 3 MW et qui emploient plusieurs dizaines de marins.

Le chalut (fig. I.2) est traîné par des câbles appelés *"funes"* et est fermé à son extrémité (*cul du chalut*) par un cordage dit *"Raban de cul"*. Un système combiné de panneaux, de chaînes (lest) et de flotteurs permet de maintenir béante son ouverture et d'en régler la forme et la profondeur. La dimension des mailles évolue des ailes jusqu'au *"cul de chalut"*.

Afin d'ajuster le niveau du chalut par rapport à celui du banc de poissons, la longueur filée de funes est ajustée. Dans le même but, la vitesse du navire est adaptée.



Figure I.1 : Un chalutier industriel.

Il existe deux types principaux de chalut sur lesquels porte notre étude : le chalut pélagique et le chalut de fond. La forme des mailles de filet du chalut peut être losange, hexagonale ou bien carré. Le filet à mailles en losange reste le type le plus utilisé par les pêcheurs, et les deux autres types de mailles sont parfois utilisés pour des raisons de sélectivité (cf. § I.4).

Le chalut pélagique permet de pêcher les poissons de pleine eau. Il est surtout employé pour la capture de poissons de type sardines, anchois, maquereaux.

Le chalut de fond, positionné par la longueur des funes à proximité du fond, sert à capturer les poissons du type cabillaud, lieu noir, merlan, aiglefin.

I.4 Capturabilité et sélectivité

La production mondiale de la pêche est de 100-120 millions de tonnes par an. Cette production au cours des cinq dernières années se réduit [Cle], ce qui tendrait à prouver que le niveau de capturabilité maximum a été atteint. Etant donné que les technologies de capture s'améliorent, la diminution des ressources halieutiques indique que la mer est surexploitée [Cle].

Afin de procéder à la reconstitution des stocks de poisson (en particulier les espèces

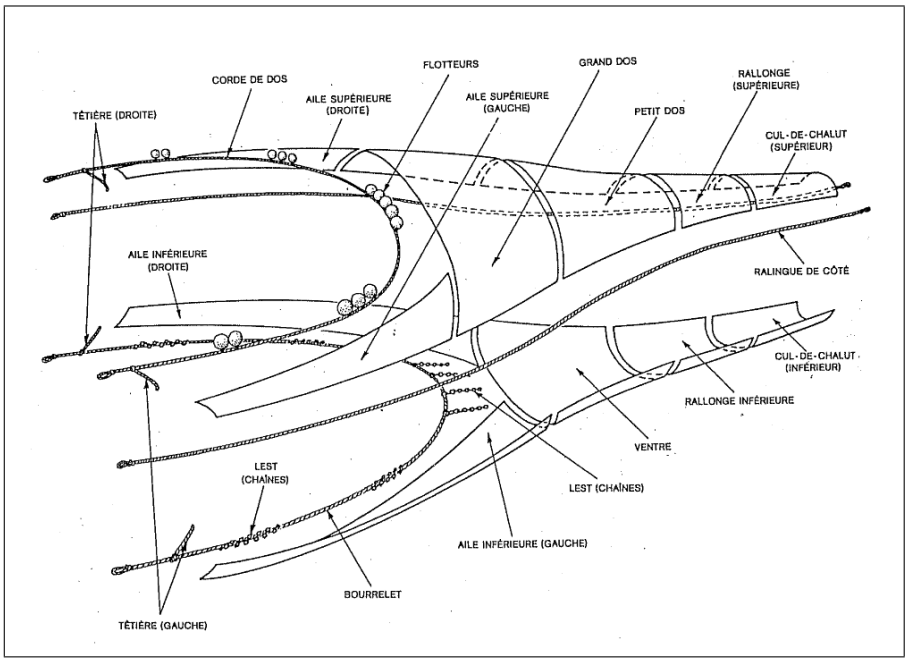


FIGURE I.2 : Pièces constitutives d'un chalut de fond à deux faces.

menacées d'épuisement), des contraintes ont été imposées par certains pays pour réformer leur secteur halieutique et diminuer leur capacité de pêche. Les quotas de capture font partie de ces mesures réglementaires destinées à permettre la reconstruction des stocks.

D'autre part, des recherches sont concentrées sur le problème de sélectivité, c'est-à-dire la capacité des engins de pêche à capturer seulement les individus commercialisables (par exemple ceux de grande taille) et d'éviter la capture des juvéniles de taille plus petite, en maintenant les mailles du filet ouvertes, afin de garantir le renouvellement et la pérennité des ressources halieutiques.

Donc, le développement durable des activités maritimes, y compris la pêche, exige des activités spécifiques de recherche ciblées afin que la rentabilité de l'industrie de la pêche s'améliore et que les stocks se reconstituent durablement.

I.5 Contexte du projet Hydropêche

Le présent travail de thèse est effectué dans le cadre du projet HydroPêche. Ce projet est conduit par l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) en partenariat avec l'école navale, l'école centrale de Nantes, l'université de Paris

6 et l'université de Rennes 1. A ce jour, trois thésards travaillent sur différentes tâches.

Le but de ce projet est de développer un outil d'optimisation automatique pour la conception du chalut en étudiant le comportement hydrodynamique des filets de pêche. Ceci afin d'améliorer l'efficacité énergétique durant l'opération de pêche en minimisant la traînée de l'engin, et par conséquence, réduire la consommation de carburant.

I.6 L'objectif de la thèse

L'objectif de la thèse est d'étudier les méthodes d'optimisation adaptées à l'efficacité énergétique des chaluts. L'efficacité énergétique est ici le ratio entre le volume de carburant nécessaire à la capture du poisson et la masse de poisson capturé. Nous verrons plus loin que la quantité de carburant consommée par un chalut en pêche est proportionnelle à sa traînée et que la quantité de poisson pêché est proportionnelle, de façon générale, à la surface de la gueule du chalut. De façon plus précise, l'optimisation visera à minimiser le ratio traînée sur surface de la gueule. Les paramètres variables seront les constituants du chalut : d'une part les formes des pièces du filet et d'autre part la longueur des câbles. Les premiers (pièces du filet) ont été choisis car nous verrons qu'ils sont responsables de la majeure partie de la traînée hydrodynamique et les seconds (câbles) car ils conditionnent la surface de la gueule du chalut.

Chapitre II

Modélisation mécanique du filet

Avant de décrire les méthodes d'optimisation pouvant être appliquées aux chaluts, ainsi que celles que nous avons adaptées, cette partie débutera par la modélisation mécanique du filet et la présentation des modèles élastiques associés. Ces modèles sont nécessaires au calcul des efforts dans le chalut pour en estimer la forme d'équilibre et ainsi permettre d'évaluer la fonction objectif qui sera minimisée lors du processus d'optimisation.

Un chalut entier peut contenir plusieurs milliers de mailles, ce nombre de mailles étant variable suivant les pêcheries. Par exemple, un chalut utilisé en Mer du Nord possède une poche ayant environ 4000 mailles alors qu'une poche utilisée en Mer Adriatique en possède environ 40000. Dans notre étude le chalut est modélisé par une méthode d'éléments finis, adaptée au filet de pêche [Pria].

L'étude bibliographique permet de mettre en évidence trois méthodes :

1. La première consiste à considérer les forces qui s'exercent aux nœuds de chaque maille puis à faire le bilan de ces efforts pour calculer leurs positions à l'équilibre. Il s'agit de l'approche la plus naturelle mais également la plus coûteuse en temps de calcul en raison du grand nombre de variables.

2. Ensuite nous décrivons la méthode de granularisation (coarse graining en Anglais). L'idée consiste à prendre en compte plusieurs mailles et à les remplacer par une seule maille numérique dont les caractéristiques représentent l'ensemble des caractéristiques des mailles réelles. Cette méthode permet de réduire de façon significative le nombre d'inconnues.

3. Enfin nous aborderons la méthode des éléments finis qui est, à notre sens, celle la

plus efficace et qui sera mise en œuvre dans le travail d'optimisation.

Décrivons rapidement les deux premières méthodes que nous ne développerons pas au delà de ce chapitre.

II.1 L'approche discrète

Le concept de filet peut s'écrire mathématiquement comme suit :

Définition II.1. [1] *Un filet de N nœuds est défini en donnant :*

- *un ensemble de N points* $\mathcal{N} = \{P_1, ..., P_N\} \in (\mathbb{R}^3)^N$,
- *une courbe* Γ, *à laquelle appartiennent les* q_0 *premiers points* P_i $(1 \leq i \leq q_0 < N)$,
- *une matrice de connectivité (booléenne) A qui définit les jonctions du filet (la composante (i,j) dans la matrice vaut 0 s'il n'y a pas de fil entre les nœuds i et j et 1 dans le cas contraire).*

  On parle de poche de chalut à mailles losanges si, de plus,
- *(2 connections pour les nœuds frontières) pour tous* $1 \leq i, j \leq q_0$, $a_{ij} = 0$ *et pour tous* $1 \leq i \leq q_0$, *il existe exactement deux indices* $k_i \neq q_i$ *tels que* $a_{ik_i} = a_{iq_i} = 1$,
- *(4 connections pour les nœuds intérieurs) pour tous* $q_0 < i < N$, *il existe exactement 4 indices* k_i, q_i, r_i *et* s_i *tels que* $a_{ik_i} = a_{iq_i} = a_{ir_i} = a_{is_i} = 1$, *à l'exception peut-être pour un des indices,*
- *(condition de losange) soit i, j tels que* $a_{ij} = 1$, *sans être l'indice exceptionnel du point 5. Si* $i, j > q_0$, *il existe exactement deux couples d'indices* (k_i^+, k_j^+) *et* (k_i^-, k_j^-) *tels que :*

  $a_{ik_i^\pm} = a_{jk_j^\pm} = a_{k_i^\pm k_j^\pm} = 1$ *et* $a_{jk_i^\pm} = a_{ik_j^\pm} = 0$.

  Si $i \leq q_0$ *ou* $j \leq q_0$, *idem avec exactement un couple d'indices.*

Il découle de cette définition, une formulation mathématique d'un fil physique.

Définition II.2. *(Fil) Un vecteur* $u_{ij} \in \mathbb{R}^3$ *commençant en* P_i *et terminant en* P_j *est considéré comme un fil du filet si le coefficient (i,j) de la matrice A, noté* a_{ij}, *est égal à 1. Alors la longueur tendue d'un fil (i,j) est donnée par la norme du vecteur* $\mathbf{u_{ij}}$.

1. Dans ce chapitre les passages en italique ont été tirés du travail de Ledret *et al.* [Led].

Cette écriture mathématique possède l'avantage de nommer les éléments constitutifs d'un filet et permet donc de mieux formaliser mathématiquement la notion de déformations. En effet, prenons un filet $(\mathcal{N}, \mathcal{A})$ de base Γ comme configuration de référence, on définit les déformations du filet comme suit :

Définition II.3. *(Déformations du filet) Soit $H(\mathcal{N})$ un ensemble de fonctions β de $\mathcal{N}$ dans $\mathbb{R}^3$. Il est fini car le filet a un nombre fini de nœuds et peut être identifié avec $(\mathbb{R}^3)^N$. Seul le sous-ensemble de $H(\mathcal{N})$ qui respecte les conditions aux limites est pris en considération. Il est noté $V(H(\mathcal{N}))$ et est formé de toutes les déformations admissibles, i.e. des fonctions β pour lesquelles $\beta(P_i) = P_i$ pour tous $1 \leq i \leq q_0$.*

Ces trois définitions reliées respectivement à la structure géométrique des nœuds du filet, à la connectivité entre les nœuds et les déformations du filet nous permettent d'écrire aisément les équations des forces appliquées sur le filet.

II.2 Approche de globalisation des mailles

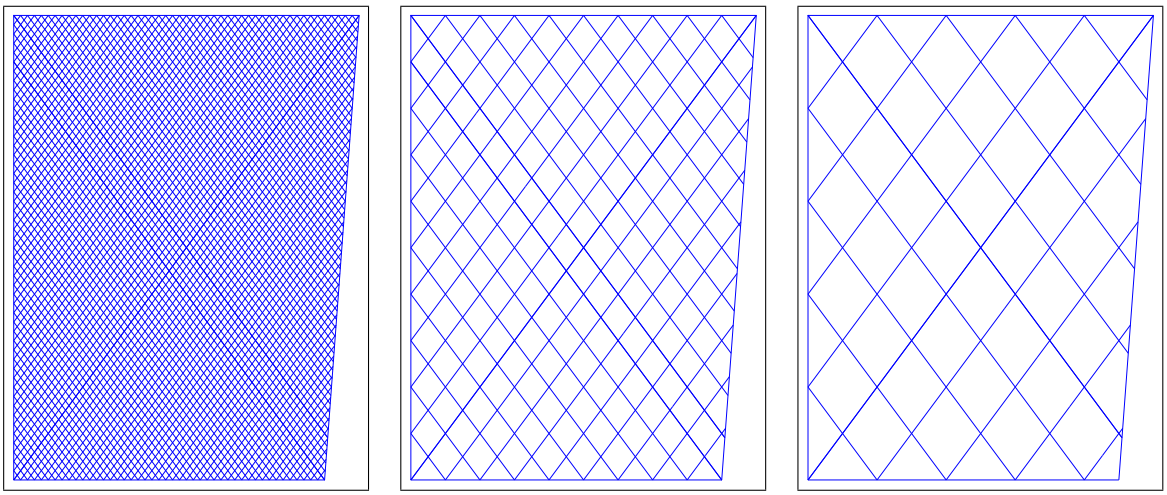
Pour économiser du temps de calcul et de la mémoire, plusieurs auteurs ont eu recours à une modélisation différente pour réduire le nombre de nœuds.

Compte tenu du grand nombre de fils dans certaines structures (jusqu'au million) une barre numérique ne représente plus un fil réel mais un ensemble de fils, on parle parfois de globalisation (fig. II.1).

Les équipes qui ont développé cette méthode sont principalement : l'ECN et l'Ifremer (Marichal et Théret [Bes, The]), l'Université de Rostock (Pashen et Niedzwiedz [Nie]), l'Université de Busan (Lee [Lee]) et, plus récemment l'Université du New Hampshire (Tsukrov [Tsu]) et l'Université d'Hokkaido (Shimizu et Takagi [Tak]).

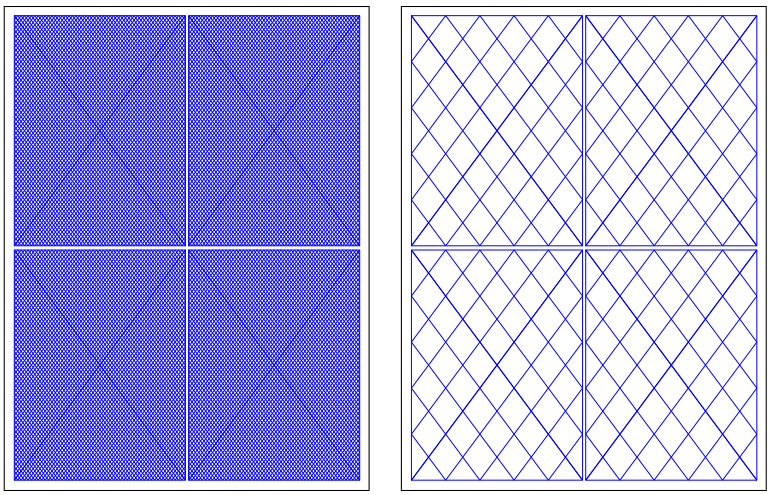
La difficulté majeure de cette méthode de globalisation réside dans la description du filet par les fils numériques globalisés. En effet, une structure est très souvent l'assemblage de plusieurs pièces de filets. Par conséquent, la génération de fils numériques dans une pièce va générer sur son contour des nœuds numériques. Ces nœuds servent de base pour la génération des fils numériques de la pièce voisine (figs. II.2 et II.3).

La figure II.2 représente quatre pièces de filet (50 par 50 mailles) dont les fils numériques se connectent parfaitement (fig. II.2(b)) : les nœuds sur les contours sont parfaite-



(a) (b) (c)

Figure II.1 : Pièce de filet de 50 mailles de haut par 50 et 45 de large (a), globalisé avec un rapport de 5 (b) et de 10 (c).



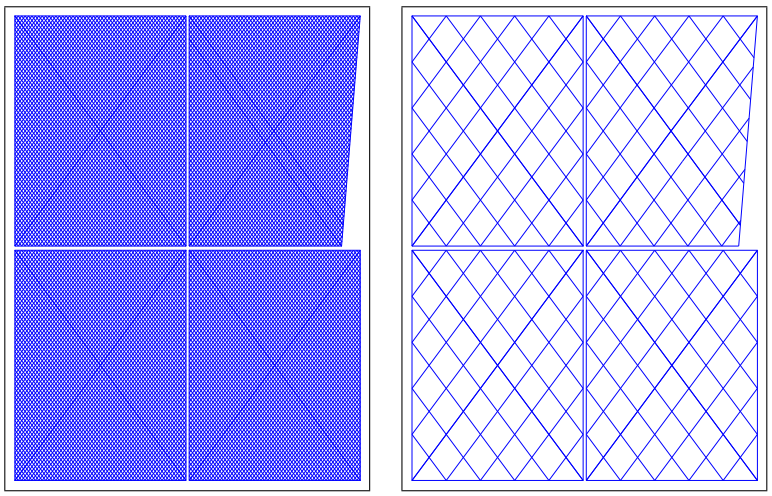
(a) (b)

Figure II.2 : Structure de 4 pièces de filet de 50×50 mailles (a) discrétisée en fils numériques ((b), rapport de globalisation de 10) : La connexion des fils numériques entre pièces se fait parfaitement (b).

ment alignés avec les nœuds numériques des pièces voisines.

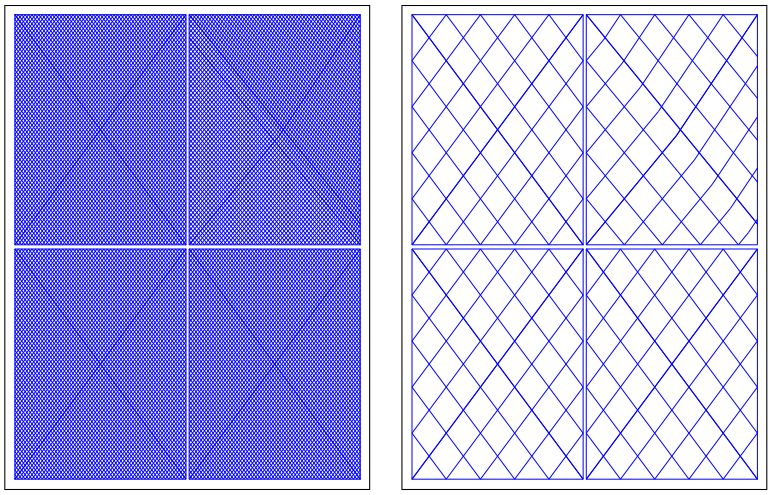
Le même exemple que précédemment (fig. II.2) est représenté sur les figures II.3 et II.4, à ceci près que la pièce de filet en haut à droite n'a que 45 mailles sur sa bordure basse. La couture de la frontière basse de cette pièce se fixe sur toute la frontière haute de la pièce en bas à droite. Par conséquent, les pièces n'ont pas la même ouverture de mailles, comme représenté sur la figure II.4. Dans ce cas les nœuds numériques ne se connectent pas parfaitement entre les 2 pièces de droite, alors que les connexions sont parfaites sur les

3 autres coutures. Cette méthode nécessite donc des aménagements, comme par exemple la retaille des pièces. Ces aménagements ne sont pas décrits dans la littérature dédiée à cette méthode [The, Fer, Nie].



(a) (b)

FIGURE II.3 : La pièce de filet en haut à droite n'a que 45 mailles sur sa bordure basse (a). La couture des deux pièces de droite est telle que les coins des pièces coïncident. L'ouverture des mailles est identique pour les quatre pièces. Les fils numériques ne se connectent pas parfaitement entre ces deux pièces (b).



(a) (b)

FIGURE II.4 : Même cas que la figure II.3 à ceci près que la pièce de filet en haut à droite a la même largeur que les autres. Dans ce cas l'ouverture des mailles n'est pas constante (a). La largeur des quatre pièces est identique. Les fils numériques ne se connectent pas parfaitement entre les 2 pièces de droite (b).

II.3 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode qui, dans un premier temps, approxime les caractéristiques d'une structure globale en la divisant en petites sous structures appelées éléments finis (dorénavant appelés éléments tout court).

Il existe quelques tentatives de modélisation du filet par cette méthode. Les travaux de Ferro [Fer] sont proches de la modélisation par fils numériques. Dans ce modèle, les éléments sont des barres, qui sont des éléments à une dimension.

Tronstad *et al.* [Troa, Trob] ont tenté un développement d'un élément surfacique à 4 côtés, dédié à la mécanique des filets de pêche. Malheureusement, ces travaux n'ont pas été poursuivis.

Priour [Prib] propose une méthode très efficace basée sur des éléments triangulaires dont la taille s'adapte localement aux détails à représenter. Cette technique utilisée majoritairement dans des cas statiques a également été appliquée en dynamique. Dans son modèle, les approximations des caractéristiques sont réalisées pour permettre d'estimer les efforts sur les sommets des éléments. Ces efforts dépendent de la position des sommets de chaque élément, et ces sommets ne coïncident pas nécessairement avec les nœuds de connections physiques des fils.

Dans un premier temps, ces éléments sont assemblés pour reconstruire la structure globale et obtenir ainsi les efforts dans cette structure. Ces efforts globaux dépendent de la position des sommets des éléments.

Dans un deuxième temps, la position des sommets qui donnent un effort global nul est calculée. Cette position correspond à la position d'équilibre et donc à la forme recherchée de la structure globale.

II.3.1 Génération du maillage numérique

Un champ de points est tout d'abord créé sur l'ensemble du chalut. Ce champ de points numériques est créé de telle sorte qu'il y ait de nombreux points dans les zones à fort gradient de déformation. Ces points serviront de base pour la création des éléments finis.

L'utilisateur se trouve souvent dans la situation où il ne sait pas a priori où sont les

zones à forts gradients. Les positions d'équilibre sont donc calculées successivement en raffinant, par ajout de points, dans les zones à forts gradients et en enlevant des points dans les zones à faibles gradients.

II.3.2 Éléments finis

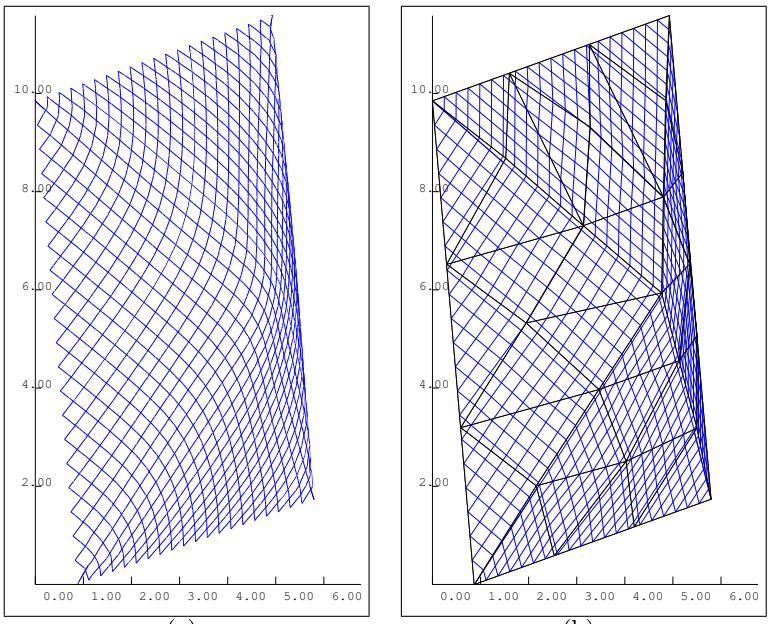
Les éléments finis sont créés sur ce champ de points. Ces éléments, dans le cas de notre modèle, sont de plusieurs types selon qu'ils sont dédiés aux câbles, aux barres ou aux filets.

Des éléments barres sont utilisés pour les câbles et les barres. Bien évidemment, un câble a très généralement une courbure fonction des différents efforts agissant sur lui. La représentation de cette courbure est suffisamment précise si le nombre d'éléments barres est grand. La description de ces éléments n'est pas poussée plus à fond ici, dans la mesure où de nombreux travaux leur ont été dédiés (Desai *et al.* [Des], Zienkiewicz *et al.* [Zie]).

Lorsqu'on utilise des éléments triangulaires pour représenter le filet (fig. II.5) les déformations géométriques à fort gradient peuvent être facilement décrites en utilisant de nombreux éléments triangulaires.

Un certain nombre d'approximations sont réalisées dans ces éléments, avec l'objectif de calculer les efforts de leurs sommets. L'hypothèse de base retenue dans la modélisation des filets par élément triangulaire est que chacun des deux réseaux des fils restent parallèles à l'intérieur de chaque élément (fig. II.7). Dans ces conditions les fils d'un même réseau dans un élément fini subissent la même déformation. La seconde hypothèse est que les fils sont modélisés comme des barres élastiques.

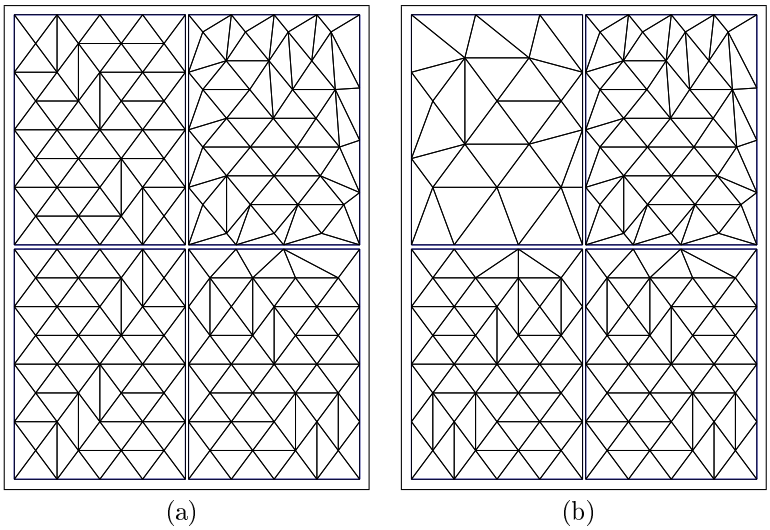
Le problème rencontré dans la méthode des fils numériques globalisés, décrite dans le paragraphe II.2 où les nœuds numériques sur les bordures des pièces ne coïncident pas toujours parfaitement, disparaît avec les éléments triangulaires puisque la discrétisation d'une pièce de filet en éléments triangulaires est indépendante de la discrétisation des pièces voisines, exceptée sur la bordure. Les pièces de la figure II.4 sont discrétisées sur la figure II.6 avec des éléments triangulaires. En II.6(a) la pièce en haut à gauche est discrétisée avec de petits éléments triangulaires et en II.6(b) avec de plus grands éléments. Il est clair que la discrétisation en éléments triangulaires se fait très aisément contrairement aux fils numériques globalisés. Cette souplesse dans la création des éléments triangulaires



(a) (b)

Figure II.5 : Le filet à maille losange (a) est décomposé en éléments triangulaires (b). Dans chaque triangle les fils sont parallèles et ont la même déformation.

permet de s'affranchir de la lourdeur de l'outil de création des fils globalisés. Cette lourdeur résulte des nombreux cas différents à traiter et par conséquent des ajustements qui rendent parfois impossible la description de la structure à étudier avec la méthode des fils numériques globalisés.



(a) (b)

Figure II.6 : Cas identique à la figure II.4. Bien que la pièce de filet en haut à droite n'ait que 45 mailles sur sa bordure basse, la discrétisation en éléments triangulaires se fait aisément. Le pas de discrétisation de la pièce en haut à gauche est plus grand en (b) qu'en (a).

II.3.3 Élément triangulaire et formulation directe

L'élément fini triangulaire dédié aux filets à mailles losange est décrit ci-dessous.

Cet élément est défini par ses 3 sommets qui sont liés au filet. Les coordonnées des sommets en nombre de mailles sont alors constantes quelle que soit la déformation du triangle. Un exemple est donné en figure II.7.

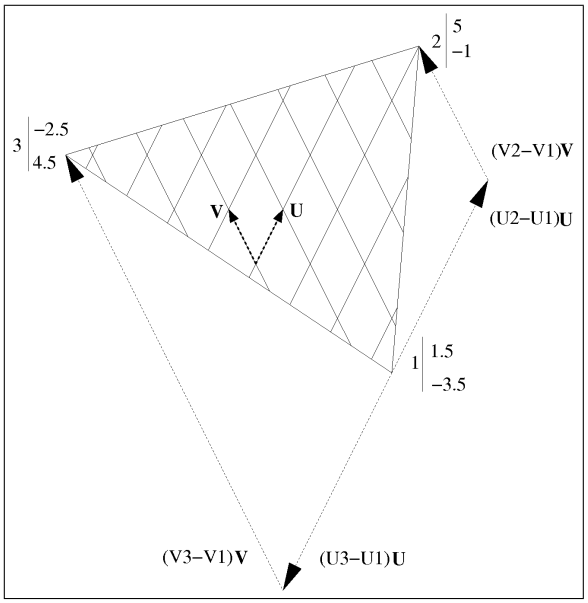


FIGURE II.7 : Un élément triangulaire : Les côtés du triangle sont des combinaisons linéaires des vecteurs côtés de mailles (U et V).

Un côté du triangle est une combinaison linéaire des vecteurs (les côtés) de mailles (U et V, cf. fig. II.7) puisque les fils sont parallèles à l'intérieur du triangle. Il en découle :

$$\begin{aligned} \mathbf{12} &= (U_2 - U_1)\mathbf{U} + (V_2 - V_1)\mathbf{V} \\ \mathbf{13} &= (U_3 - U_1)\mathbf{U} + (V_3 - V_1)\mathbf{V} \end{aligned} \tag{II.1}$$

12 (**13**) : vecteur du sommet 1 (1) au sommet 2 (3).

Les 2 équations précédentes à 2 inconnues (**U** et **V**) donnent alors :

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \frac{V_3 - V_1}{d}\mathbf{12} - \frac{V_2 - V_1}{d}\mathbf{13} \\ \mathbf{V} &= \frac{U_2 - U_1}{d}\mathbf{13} - \frac{U_3 - U_1}{d}\mathbf{12} \end{aligned} \tag{II.2}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{12} &= \begin{vmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{vmatrix} \\ \mathbf{13} &= \begin{vmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{vmatrix} \end{aligned} \tag{II.3}$$

et

$$d = (U_2 - U_1)(V_3 - V_1) - (U_3 - U_1)(V_2 - V_1). \tag{II.4}$$

x_i, y_i, z_i : coordonnées cartésiennes du sommet i,
U_i, V_i sont les coordonnées du sommet i en nombre de mailles.

Les côtés de mailles (U, V) ont donc été calculés à partir des coordonnées cartésiennes (x_i, y_i, z_i) des sommets de l'élément triangulaire.

En fait, le nombre de mailles dans un élément triangulaire est égal à $d/4$, le nombre total de fils est d, le nombre de côtés de maille U ou V est $d/2$, et le nombre de nœuds est $d/2$. Dans la figure II.7, $d = 38$, le nombre de mailles = 9,5, le nombre de fils $U = 19$, le nombre de fils $V = 19$ (le nombre total de fils = 38) et le nombre de nœud = 19.

Il apparaît que rien n'implique que les coordonnées en nombre de mailles des sommets du triangle soient des entiers. Les sommets du triangle ne sont pas obligatoirement situés sur des nœuds du filet (fig. II.5). De même, rien n'empêche que le triangle soit plus petit qu'une maille. Il peut apparaître alors que le triangle ne contienne aucun morceau de fils du filet. Même dans ces conditions, ce petit triangle permet de définir des côtés de mailles, donc des élongations et par conséquent une énergie de déformation des fils. Autrement dit, cet élément fini triangulaire permet une homogénéisation des caractéristiques mécaniques du filet.

Il apparaît en outre, que tout point du filet n'appartient qu'à un seul élément triangulaire et toujours le même, quelle que soit la déformation du filet. Seuls les points situés sur le contour d'un élément, appartiennent aussi aux voisins.

II.3.4 Champ de forces

Il est possible de calculer les efforts aux extrémités de l'élément, à partir des hypothèses retenues et pour chacun des éléments. Ces efforts sont issus des sollicitations telles que la flottabilité, le poids, la tension des fils, etc. Dans cette partie nous allons décrire ces forces.

II.3.4.1 Tension des fils

Il est nécessaire de calculer les tensions dans les fils pour estimer les efforts aux sommets des éléments issus de ces tensions. Il est aisé de calculer ces tensions puisque **U** et **V** ont été précédemment calculés :

$$\begin{aligned} T_u &= EA\frac{|\mathbf{U}| - l_0}{l_0} \\ T_v &= EA\frac{|\mathbf{V}| - l_0}{l_0} \end{aligned} \tag{II.5}$$

où

E : Module de Young du matériau (N/m^2),

A : Section des fils (m^2),

l_0 : Longueur au repos des fils (m).

Le calcul des efforts aux sommets [Pria, Pric] se base sur le "principe des travaux virtuels" :

La composante selon x de l'effort sur le sommet 1 de l'élément triangulaire est estimée en considérant un déplacement virtuel ($\partial x1$) selon l'axe x du sommet 1. Ce déplacement conduit à un travail externe :

$$W_e = F_{x1}\partial x1 \tag{II.6}$$

Ce déplacement induit aussi une variation de la longueur des côtés de maille ($\partial|\mathbf{U}|$ et $\partial|\mathbf{V}|$) à l'intérieur de l'élément triangulaire et par conséquent un travail interne à l'élément qui dépend du nombre de fils $d/2$:

$$W_i = (\partial|\mathbf{U}|T_u + \partial|\mathbf{V}|T_v)\frac{d}{2} \tag{II.7}$$

Le principe des travaux virtuels implique que le travail interne soit égal au travail

externe, ce qui donne les trois composantes de force pour chacun des trois sommets :

$$\begin{aligned}
F_{x1} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial x1} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial x1}) \frac{d}{2} \\
F_{y1} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial y1} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial y1}) \frac{d}{2} \\
F_{z1} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial z1} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial z1}) \frac{d}{2} \\
F_{x2} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial x2} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial x2}) \frac{d}{2} \\
F_{y2} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial y2} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial y2}) \frac{d}{2} \\
F_{z2} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial z2} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial z2}) \frac{d}{2} \\
F_{x3} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial x3} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial x3}) \frac{d}{2} \\
F_{y3} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial y3} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial y3}) \frac{d}{2} \\
F_{z3} &= (T_u \frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial z3} + T_v \frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial z3}) \frac{d}{2}
\end{aligned} \tag{II.8}$$

Les dérivées $(\frac{\partial|\mathbf{U}|}{\partial x1})$ ... $(\frac{\partial|\mathbf{V}|}{\partial z3})$ peuvent être calculées puisque les équations reliant U, V X_i, Y_i, Z_i ont été décrites précédemment. Ce qui donne les efforts suivants pour les 3 sommets :

$$\begin{aligned}
\mathbf{F_1} &= (V_3 - V_2) T_u \frac{\mathbf{U}}{2|\mathbf{U}|} + (U_2 - U_3) T_v \frac{\mathbf{V}}{2|\mathbf{V}|} \\
\mathbf{F_2} &= (V_1 - V_3) T_u \frac{\mathbf{U}}{2|\mathbf{U}|} + (U_3 - U_1) T_v \frac{\mathbf{V}}{2|\mathbf{V}|} \\
\mathbf{F_3} &= (V_2 - V_1) T_u \frac{\mathbf{U}}{2|\mathbf{U}|} + (U_1 - U_2) T_v \frac{\mathbf{V}}{2|\mathbf{V}|}
\end{aligned} \tag{II.9}$$

II.3.4.2 Traînée hydrodynamique

La force de traînée sur le filet est calculée dans ce modèle comme la somme de la force de traînée sur chaque vecteur de fil ($\mathbf{U}$ et $\mathbf{V}$). Cette hypothèse est sans doute discutable, car la traînée d'un fil isolé est différente de celle exercée sur ce même fil placé dans des conditions d'interaction avec d'autres fils (effet de consolidation ou d'écran). Quoi qu'il en soit, cette hypothèse conduit au calcul de la traînée de chaque élément triangulaire parce que chaque vecteur fil est connu, comme cela a été décrit précédemment. La valeur de la traînée sur les fils est déterminée à partir des hypothèses de Morrison et adaptée par Landweber et Richtmeyer.

Les amplitudes de force sur les fils U pour un élément triangulaire sont :

$$\begin{aligned}
|\mathbf{F}| &= \frac{1}{2} \rho C_d D l_0 \left[|\mathbf{c}| sin(\alpha)\right]^2 \frac{d}{2} \\
|\mathbf{T}| &= f \frac{1}{2} \rho C_d D l_0 \left[|\mathbf{c}| cos(\alpha)\right]^2 \frac{d}{2}
\end{aligned} \tag{II.10}$$

Les directions de la traînée sur les vecteurs de fils U sont :

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{F}}{|\mathbf{F}|} &= \frac{\mathbf{U} \wedge (\mathbf{c} \wedge \mathbf{U})}{|\mathbf{U} \wedge (\mathbf{c} \wedge \mathbf{U})|} \\ \frac{\mathbf{T}}{|\mathbf{T}|} &= \frac{\mathbf{F} \wedge (\mathbf{c} \wedge \mathbf{F})}{|\mathbf{F} \wedge (\mathbf{c} \wedge \mathbf{F})|} \end{aligned} \tag{II.11}$$

$\mathbf{F}$: Force normale (N) aux fils U, issue des hypothèses de Landweber,

$\mathbf{T}$: Force tangentielle (N) aux fils U, hypothèse de Richtmeyer,

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3),

C_d : Coefficient de traînée normale,

f : Coefficient de traînée tangentiel,

D : Diamètre du fil (m),

l_0 : Longueur du vecteur des fils (m),

$\mathbf{c}$: Vecteur vitesse de l'eau relativement au fil (m/s),

α : Angle entre le fil et la vitesse de l'eau $(radian)$,

$d/2$: Nombre de fils U dans l'élément triangulaire.

En fait, dans les équations de l'amplitude de force les expressions $|\mathbf{c}|sin(\alpha)$ et $|\mathbf{c}|cos(\alpha)$ sont les projections normales et tangentielles de $\mathbf{c}$ sur le vecteur de fil U.

Les amplitudes de force sur les fils V pour un élément triangulaire se calculent de la même façon en remplaçant $\mathbf{U}$ par $\mathbf{V}$ et α par β (angle entre un fil V et le courant).

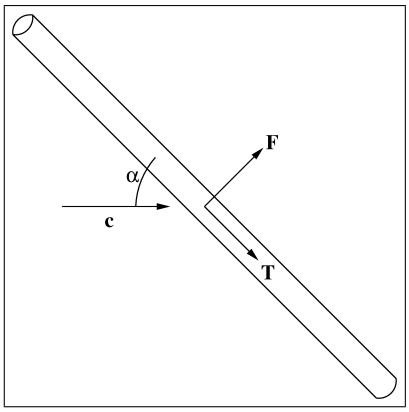


FIGURE II.8 : Efforts normal ($\mathbf{F}$) et tangentiel ($\mathbf{T}$) sur un fil dus à la vitesse relative de l'eau ($\mathbf{c}$).

La longueur des fils utilisée dans la formulation de l'amplitude des efforts pourrait être évaluée par $|\mathbf{U}|$ pour les fils U et par $|\mathbf{V}|$ pour les fils V. Cela voudrait dire qu'elle

prend en compte l'allongement d'un fil. En général un allongement d'un fil est associé à une réduction de diamètre D par le coefficient de Poisson donné par $\nu = \frac{\Delta D/D}{\Delta l/l_0}$ avec D le diamètre des fils et l_0 la longueur non étirée des fils. Lorsque le coefficient de Poisson n'est pas pris en compte comme dans la présente modélisation, la surface de la section droite du fil est approximée par Dl_0. Par contre si ν est pris en compte, la variation du diamètre donnée par : $\Delta D = \nu D \Delta l/l_0$ pourrait induire un changement de surface de section droite qui pourrait modifier la traînée hydrodynamique. Ceci est improbable du fait que le coefficient de Poisson est en général très petit.

Tous les paramètres, notamment les angles α et β sont constants et connus pour chaque élément triangulaire. Par conséquent, la traînée peut être calculée pour chaque élément triangulaire. Ces efforts sont également répartis sur les 3 sommets de l'élément : 1/3 par sommet.

II.3.4.3 Pression d'une prise de poisson

L'effet mécanique d'une prise de poisson dans un filet est estimé par une pression. Cette pression s'exerce directement sur les éléments triangulaires en contact avec le poisson de la façon suivante :

$$p = \frac{1}{2}\rho C_d v^2 \tag{II.12}$$

p : Pression de la prise sur le filet (Pa),
ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3),
C_d : Cœfficient de traînée de la prise,
v : Amplitude du courant (m/s).

Cette pression est ensuite appliquée sur la surface de l'élément triangulaire ($\frac{\mathbf{12} \wedge \mathbf{13}}{2}$). Cette force résultante est normale à l'élément triangulaire. L'effort de pression sur chaque sommet de l'élément triangulaire est le tiers de l'effort. Ce qui donne pour le sommet 1 :

$$\mathbf{F}_1 = \frac{\mathbf{12} \wedge \mathbf{13}}{2}\frac{p}{3} \tag{II.13}$$

Avec les vecteurs côtés de l'élément triangulaire :

$$\begin{aligned} \mathbf{12} &= \begin{vmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{vmatrix} \\ \mathbf{13} &= \begin{vmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{vmatrix} \end{aligned} \tag{II.14}$$

II.3.4.4 Flottabilité et poids

La flottabilité et le poids sont des efforts verticaux. L'expression de leur résultante, par élément triangulaire, est :

$$F_z = d\pi \frac{D^2}{4} l_0 (\rho_{filet} - \rho) g \tag{II.15}$$

F_z : Poids du filet immergé (N),

d : Nombre des fils U et V par élément triangulaire,

ρ : Masse volumique de l'eau (kg/m^3),

ρ_{filet} : Masse volumique du filet (kg/m^3),

D : Diamètre des fils (m),

l_0 : Longueur d'un fil (m),

g : Accélération gravitationnelle (g=9,81 m/s^2).

II.3.4.5 Traînée sur le fond

Dans le cas de contact avec le fond, ce contact génère un effort de traînée sur le chalut proportionnel à la force de contact.

$$F_c = Coef F_v \tag{II.16}$$

F_c : Traînée sur le fond (N),

F_v : Force verticale sur le fond (N),

$Coef$: Coefficient de frottement (en général le frottement doit être grand, c'est-à-dire $\sim$

0,5).

II.3.5 Calcul de l'équilibre

L'équilibre du chalut immergé peut s'obtenir par deux méthodes différentes : à l'aide du principe fondamental de la dynamique ou par la minimisation de l'énergie totale du filet. La première méthode est utilisée dans notre modèle [Pria].

II.3.5.1 Par le principe fondamental de la dynamique

Les efforts (F) sur les extrémités des éléments pour l'ensemble de la structure sont calculés en sommant la contribution de chaque élément. Les dérivées (F') sont sommées de la même façon. Ces dérivées sont nécessaires à la méthode "Newton-Raphson" de résolution de système, utilisée par le principe fondamental de la dynamique.

L'équation d'équilibre en chaque point de connection est obtenue en écrivant que la somme des forces est égale à zéro.
Notons $\mathbf{F}_i$ la force totale qui s'exerce sur un nœud i. La position à l'équilibre du nœud i est gouvernée par le système suivant :

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{0} \tag{II.17}$$

La relation entre les efforts aux nœuds numériques (extrémités des éléments) et leur position a été établie lors de l'étape précédente (§ II.3.4). Ce système doit être satisfait par tout nœud du filet, conduisant à un système de la forme $\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$, avec $\mathbf{F}$ le vecteur qui contient les efforts globaux sur chaque nœud et $\mathbf{X}$ le vecteur positions de ces nœuds.

Dans notre modèle de simulation, nous avons utilisé la méthode de Newton-Raphson (adaptée par D. Priour) pour résoudre le système $\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}$ (voir l'annexe A pour la description détaillée).

Chapitre III

Méthodes d'optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum d'une fonction donnée de n variables. Cette fonction est appelée **fonction objectif** (ou **fonction coût**). Il existe des problèmes d'optimisation dans lesquels les variables de la fonction objectif à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

On peut classer les problèmes d'optimisation suivant la nature des variables qu'ils manipulent. On dit ainsi qu'un problème est continu si ses variables sont définies sur $\mathbb{R}$, discret quand elles sont définies sur $\mathbb{N}$ et mixte si les définitions sont mélangées. Dans notre cas le problème est continu. Ces variables sont reliées entre elles par un modèle mathématique.

Mathématiquement, un problème de minimisation se présente sous la forme suivante :

$$(\mathscr{P}) \begin{cases} \min\limits_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \\ g(x) \leq 0 \quad \text{(m contraintes d'inégalités)} \\ h(x) = 0 \quad \text{(p contraintes d'égalités)} \end{cases} \tag{III.1}$$

où les fonctions $f : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}$, $g : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m$ et $h : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^p$.

Dans ce cas, on dit qu'il s'agit d'un problème d'optimisation à n variables de décision $(x_1, x_2, ..., x_n$ *où* $x = (x_1\ x_2\ ...\ x_n)^T)$, m contraintes d'inégalités et p contraintes d'égalités.

Résoudre le problème $(\mathscr{P})$ revient à chercher le vecteur de $\mathbb{R}^n$ qui satisfait le sys-

tème III.1. Dans le cas d'un problème difficile (le nombre de variables est grand, ce qui est notre cas comme montré en chapitre IV.3.1), les méthodes de résolution énumératives exactes qui fournissent évidement la solution optimale peuvent avoir un temps de calcul déraisonnable, et on a alors recours aux méthodes approchées.

III.1 Types de méthodes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation peuvent être divisées en deux grandes familles selon le mode de recherche de l'optimum : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques (voir fig. III.1).

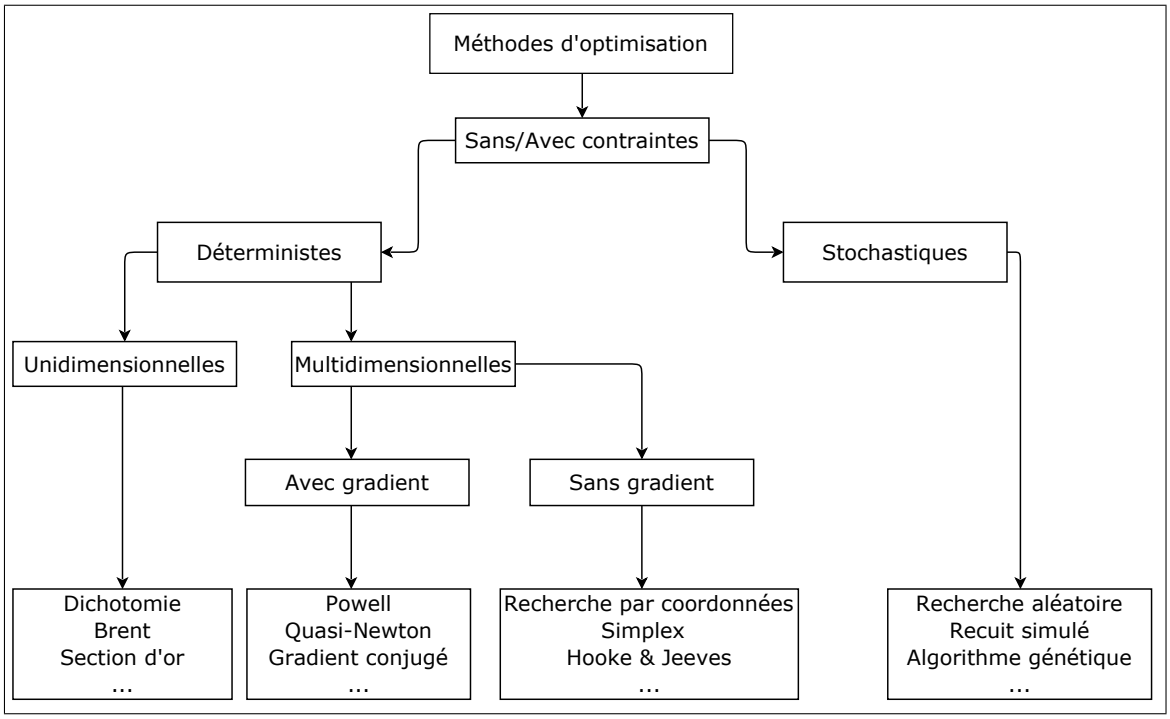


Figure III.1 : Les méthodes d'optimisation approchées. Dans notre cas les méthodes adaptées sont de type déterministe sans gradient et de type stochastique.

III.1.1 Les méthodes déterministes

Dans ce type de méthodes, pour un problème donné, pour des conditions initiales définies et des paramètres de configuration identiques, chaque méthode converge toujours vers le même optimum à chaque calcul, en parcourant de la même manière l'espace des solutions. Cette famille peut être, à son tour, scindée en deux sous-familles : les méthodes de gradient et les méthodes géométriques ou heuristiques.

III.1.2 Les méthodes stochastiques

Ce sont des méthodes de résolution approchée, elles sont basées sur une prospection aléatoire de l'espace des solutions à l'aide de règles de transition probabilistes. Ainsi, pour des optimisations distinctes avec les mêmes configurations de départ, le trajet vers l'optimum peut être différent. Elles sont souvent plus simples à mettre en œuvre que les méthodes déterministes.

III.2 Méthodes adaptées au cas de chalut

Dans cette partie nous testons les méthodes stochastiques et déterministes sans gradient.

III.2.1 Exemple académique

Un cas académique permettant d'illustrer les méthodes est donné par une pièce de filet triangulaire tendu par deux câbles. Dans la figure III.2 nous représentons deux exemples de filets ayant un nombre différent de mailles tout en étant tendus par les mêmes câbles.

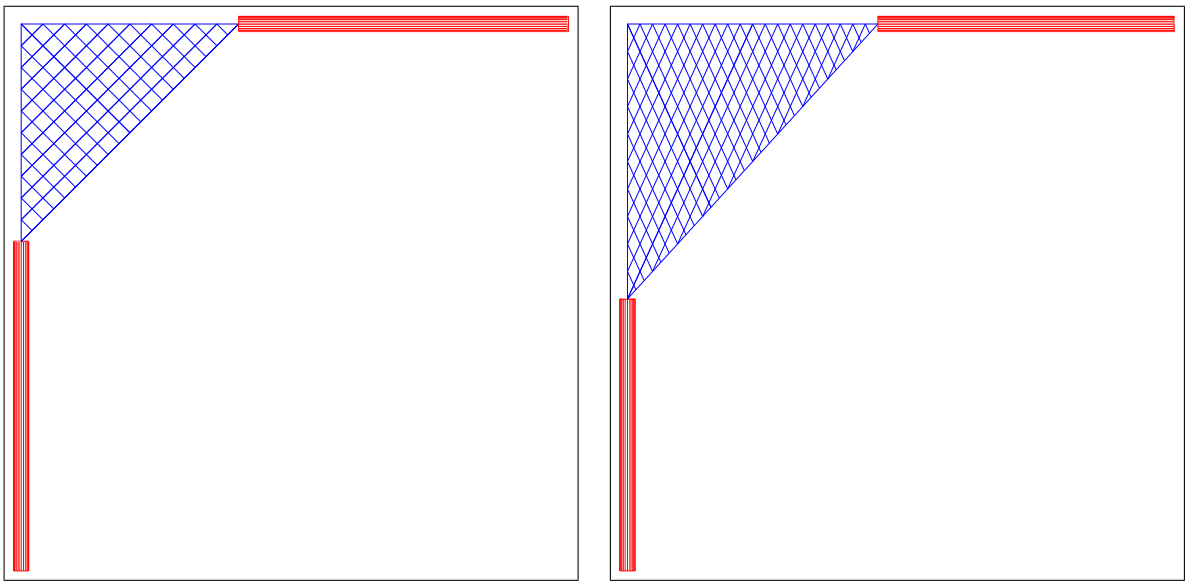
L'ensemble filet et câbles reste dans le plan normal au courant, la bordure supérieure (fig. III.2) reste horizontale et la bordure latérale reste verticale. Cet ensemble a une traînée (filet + câbles) et une surface balayée (filet). L'objectif est de déterminer le nombre de mailles horizontales et le nombre de mailles verticales pour que le ratio traînée sur surface balayée soit minimal.

Dans la figure III.2(a) le filet possède 10 mailles à l'horizontale et à la verticale. En ajoutant dix mailles (voir fig. III.2(b)) au filet à l'horizontale uniquement, nous constatons un effet de double rétrécissement du câble horizontal et simultanément du câble vertical.

Les variables, au nombre de 2, sont le nombre de mailles horizontales et verticales. Dans ce filet qui reste triangulaire chaque maille a la forme d'un losange, et tous les fils qui sont de même direction sont alors parallèles.

Notre objectif est d'optimiser le plan du filet (nombre de mailles horizontales et verticales) de manière à réduire la traînée tout en augmentant la surface balayée.

Cet exemple simple à deux variables a été choisi car d'une part il est proche du cas du chalut (les composants sont des câbles et un filet) et d'autre part il est possible de



(a) (b)

Figure III.2 : Exemple d'un filet triangulaire fixé en un nœud (coin en haut à gauche) et tendu par deux câbles suivant les deux directions horizontale et verticale. Les longueurs totales à partir du nœud et jusqu'à l'extrémité opposée de chaque câble est maintenue constante. Fig. (a) a 10 mailles horizontales et verticales. Tandis que fig. (b) a 20 mailles horizontales et 10 mailles verticales.

visualiser le chemin parcouru par l'optimisation dans l'espace des deux variables.

Les caractéristiques du filet et des câbles sont détaillées dans le tableau III.1.

Mesure	**Valeur**	**Description**
V (m/s)	1	Vitesse du courant d'eau
cd	1,2	Coefficient de traînée des fils et des câbles
cc (m)	3	Longueurs des deux bordures
lgrepos (m)	1	Longueur au repos des câbles
diamc (m)	0,05	Diamètre des câbles
EAc (N)	10	Rigidité des câbles
n0 (m)	0,05	Longueur du côté de maille du filet
diamf (m)	0,002	Diamètre des fils
EA (N)	10	Rigidité des fils du filet

Tableau III.1 : Les caractéristiques du filet et des câbles.

Dans les paragraphes suivants on teste différentes méthodes d'optimisation approchées, en débutant par la méthode la plus simple "Recherche aléatoire".

Nous considérons ici le cas sans contraintes, le problème $\mathscr{P}$ de l'équation III.1 se réduit à $\min_{x\in\mathbb{R}^n} f(x)$ où $n = 2$.

La solution minimale trouvée par la méthode énumérative en nombres entiers (100×100) est 28 mailles horizontalement et 28 mailles verticalement. La fonction objectif prend alors la valeur de 80,4 N/m^2. Nous verrons par la suite que la fonction objectif peut être

légèrement plus faible (79,95 N/m^2 pour $(28,3; 28,3)$). L'idée d'appliquer certaines méthodes d'optimisation dans les paragraphes suivants est d'explorer les méthodes efficaces qui se rapprochent de la solution optimale avec une vitesse de convergence raisonnable et de retenir au final une méthode adaptable au chalut.

III.2.2 Recherche aléatoire

III.2.2.1 Principe

Cette méthode d'optimisation de recherche aléatoire (Random Search (RS)) est la méthode stochastique la plus simple. Elle est considérée comme base de tous les algorithmes de recherche stochastique. Elle consiste à chaque évaluation à déplacer au hasard [Bro] un point A où la fonction objectif $f(A)$ est évaluée. Si la valeur est inférieure à la précédente, elle est retenue (valeurs de A et $f(A)$) et le processus continue. Dans ce cas on parle alors d'itération. Sinon on repart du point précédent jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient satisfaites. L'algorithme 1 illustre cette méthode dans le cas d'un problème d'optimisation de minimisation.

Algorithme 1 Pseudo-code de l'algorithme de recherche aléatoire (RS).

$s_0 \leftarrow$ solution aléatoire
$x_{min} \leftarrow s_0$
$f_{min} \leftarrow f(s_0)$
répéter
  $s \leftarrow$ solution aléatoire
  si $f(s) < f_{min}$ **alors**
    $f_{min} \leftarrow f(s)$
    $x_{min} \leftarrow s$
  finsi
jusqu'à conditions d'arrêt satisfaites.
retourner x_{min}

Cet algorithme peut être amélioré par l'introduction d'un pas de déplacement maximum.

III.2.2.2 Application au filet triangulaire

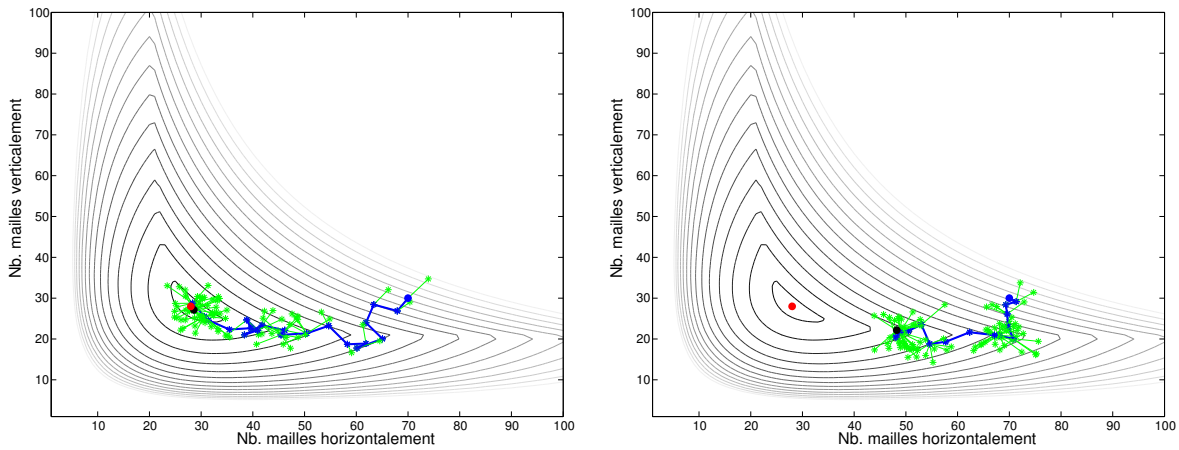
L'application de la méthode de recherche aléatoire (RS) citée ci-dessus sur le filet triangulaire ayant deux variables nécessite la configuration suivante :
i) Un point de départ. Dans cet exemple nous avons pris le point $x_{init} = (70; 30)$ formé

de 70 mailles horizontalement et 30 mailles verticalement ;

ii) Un critère d'arrêt $iter_{max}$ qui est le nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif. Ici nous avons pris $iter_{max} = 100$;

iii) Un pas de modification maximal pour chacun des deux variables. Dans notre exemple ce pas de modification se traduit par ajout ou suppression un certain nombre de mailles choisi aléatoirement entre -5 et +5 mailles.

Une première optimisation est réalisée avec cette méthode. Elle aboutit dans 100 évaluations de la fonction objectif à la solution $(28,6; 27,1)$ (point noir de fig. III.3(a)) qui est formée par des coordonnées en nombres réels et par lesquels la fonction objectif est 80,8 N/m^2. Dans ce cas nous admettons que l'optimum a été obtenu. Une seconde optimisation avec le même nombre d'évaluations (100), aboutit à la solution $(48,2; 22,2)$ pour une valeur de la fonction objectif de 96,5 N/m^2 (fig III.3(b)). Dans ce cas l'optimum n'est pas atteint.

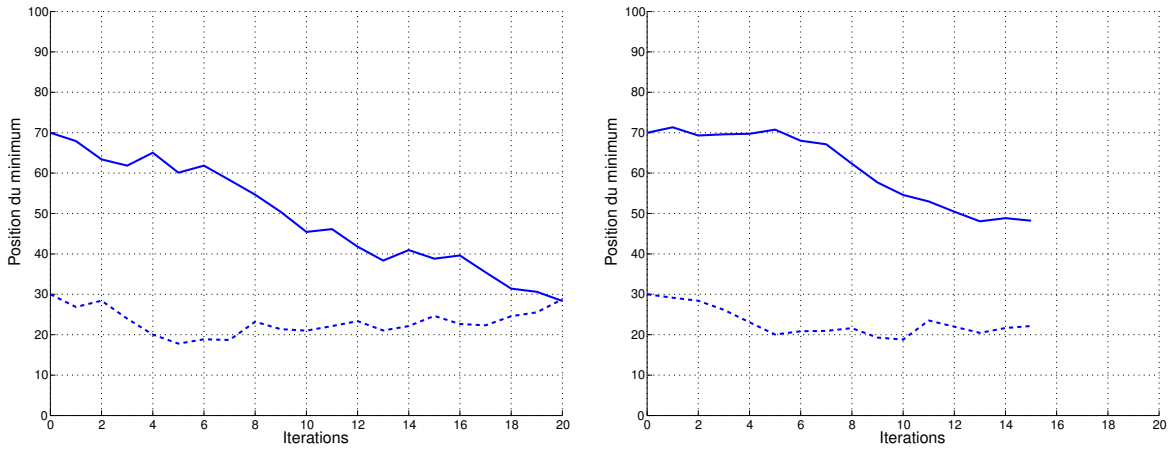


(a) (b)

Figure III.3 : (a) et (b) représentent les solutions successives obtenues par deux lancements différents de la méthode d'optimisation RS. Le point rond bleu (rouge) représente le point de départ (le point optimal en nombres entiers). Le point rond noir représente la valeur minimale en nombres réels trouvée par RS. Une étoile bleue (verte) représente une évaluation réussie (échouée) de la fonction objectif. Le trajet bleu représente le parcours du point de départ jusqu'à qu'il arrive à la valeur minimale trouvée (point noir). Une itération comme l'étoile bleue correspond à une évaluation réussie de la fonction objectif.

La figure III.4 montre les étapes de convergence des deux coordonnées en fonction du nombre d'itérations selon les deux cas de calcul. Il apparait clairement, dans le premier cas, (fig. III.4(a)) que la solution obtenue $(28,6; 27,1)$ est proche de la solution entière optimale $(28; 28)$ au bout de 20 itérations et 100 évaluations de la fonction objectif.

Par contre dans le deuxième cas, la solution obtenue $(48,2; 22,2)$ est loin de la solution optimale (fig. III.4(b)) après 15 itérations et avec le même nombre d'évaluations de la fonction objectif.

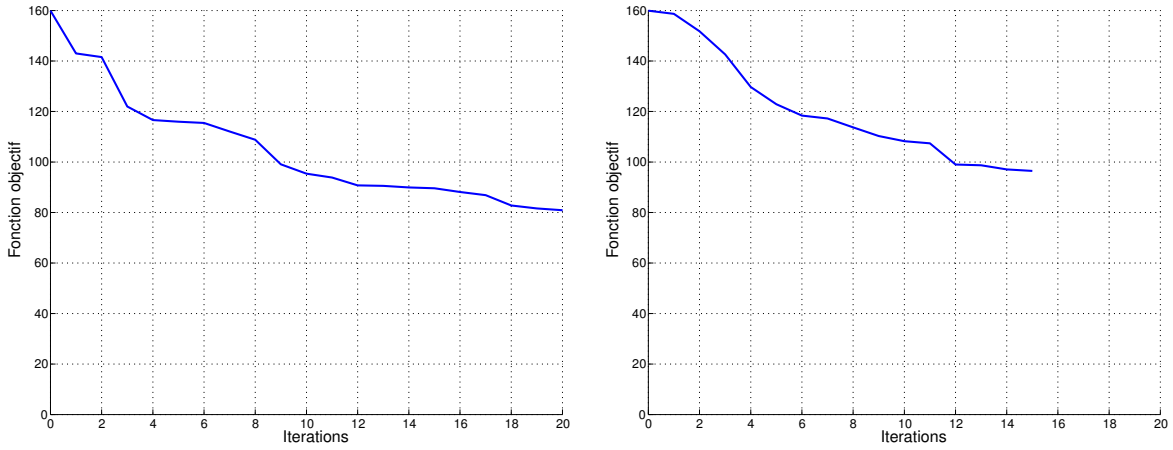


(a) (b)

FIGURE III.4 : (a) et (b) représentent la variation des paramètres en fonction du nombre d'itérations. (a) correspond au premier lancement de calcul, par contre (b) correspond au second.

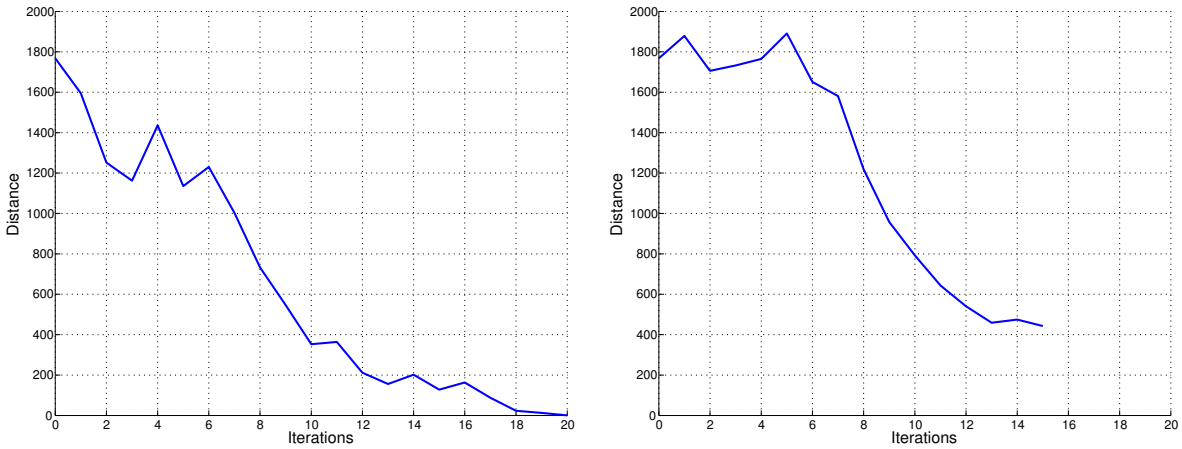
La figure III.5 montre les courbes de variation de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. Il parait bien dans le premier cas (fig. III.5(a)) que la valeur de la fonction objectif en fin de calcul (80,8 N/m^2) beaucoup plus proche de la valeur sur la solution optimale en nombres entiers (80,4 N/m^2). Lors du deuxième calcul cette valeur n'est que de 96,5 N/m^2 (fig. III.5(b)), beaucoup plus éloignée de l'optimum. On conclut que la méthode n'est pas fiable si le nombre d'évaluations et le pas de modification sont trop faibles.

La figure III.6 représente la vitesse de convergence de la méthode d'optimisation RS pour ces deux cas de calcul. La première exécution (fig. III.6(a)) converge en 20 itérations après 100 évaluations de la fonction objectif. Alors que la deuxième (fig. III.6(b)) ne converge pas vers le minimum (l'extrémité de la courbe est loin de zéro). Dans cette seconde exécution 15 itérations ont étés réalisées lors des 100 évaluations de la fonction objectif.



(a) (b)

Figure III.5 : (a) et (b) représente la variation de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations pour les deux lancements de RS. Il est clair que le premier lancement (a) aboutit à un meilleur résultat.



(a) (b)

Figure III.6 : (a) et (b) montrent le carré de la distance au minimum pour la méthode RS pour les deux cas différents d'exécution.

III.2.3 Recherche par coordonnées

III.2.3.1 Principe

L'idée de base de la méthode de recherche par coordonnées (Coordinate Search(CS)) est de mener la recherche dans l'espace des paramètres de manière séquentielle, c'est à dire paramètre par paramètre.

Cette méthode d'optimisation [Huy] débute par un point x_0 de l'espace des paramètres $\mathbb{R}^n$, par lequel la fonction objectif est évaluée. Dans la première étape, l'algorithme effectue une recherche en ligne selon la direction e_1 (vecteur unitaire du 1^{er} axe correspondant à

la $1^{ère}$ variable) et trouve x_1 qui est le premier minimum dans la direction e_1, avec un pas de modification de base (Δ). Dans la seconde étape il effectue une recherche en ligne selon la direction e_2 et trouve x_2 comme second minimum, et ainsi de suite (jusqu'au dernier vecteur unitaire e_n). Dans cette première itération l'algorithme aurait fait $2n$ évaluations de la fonction objectif correspondants aux points $x_i \in \{x_0 \pm \Delta e_i : i \in [1, n]\}$. Si la valeur la plus basse est inférieure à la valeur de la fonction objectif du point initial x_0 alors le point correspondant devient le nouveau point de départ de la deuxième itération, sinon Δ est réduit. Le processus recommence jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. Plusieurs conditions d'arrêt sont possibles, les deux plus courantes étant une taille minimale de Δ et un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif. L'algorithme converge toujours vers une solution qui est le dernier point central obtenu. Cette méthode est illustrée par l'algorithme (Algo. 2) suivant :

Algorithme 2 Recherche par coordonnées (Coordinate Search (CS)).

Entrées: $n \in \mathbb{N}^*$: nombre de variables, $x_0 \in \mathbb{R}^n$: point initial, $\Delta \in \mathbb{R}^*$: pas de modification, $tol \in \mathbb{R}^*$: facteur tolérance

$k \leftarrow 1$
$x_k \leftarrow x_0$
$\Delta_k \leftarrow \Delta$
tantque $\Delta_k > tol$ **faire**
  si $f(t) < f(x_k)$ pour au moins un $t \in P_k = \{x_k \pm \Delta_k e_i : i \in [1, n]\}$ **alors**
    $x_{k+1} \leftarrow t$
    $\Delta_{k+1} \leftarrow \Delta_k$
  sinon
    x_k est un minimum local par rapport à P_k,
    $x_{k+1} \leftarrow x_k$
    $\Delta_{k+1} \leftarrow \frac{\Delta_k}{2}$
  finsi
  $k \leftarrow k + 1$
fin tantque
retourner x_k

III.2.3.2 Application au filet triangulaire

La mise en œuvre de cette méthode d'optimisation (CS) nécessite la configuration suivante :

i) Un point de départ. Dans cet exemple le point pris est $x_0 = (70; 30)$ c'est à dire un filet triangulaire formé de 70 mailles horizontales et 30 mailles verticales comme dans le cas précédent (§ III.2.2.2) ;

ii) Un pas de modification Δ. La valeur qui a été prise est 5, ce qui signifie qu'à chaque

étape on ajoute ou bien on supprime 5 mailles au filet ;
iii) Un facteur tolérance, tol, et un nombre maximal d'itérations $iter_{max}$. L'exécution de la méthode s'arrête lorsque Δ sera plus petit ou égal à tol (cas de convergence de la méthode), ou bien lorsque le nombre d'itérations maximal a été atteint. Dans cet exemple nous avons pris $tol = 0,1$ et $iter_{max} = 1000$.

L'optimisation par la méthode de recherche par coordonnées (CS) aboutit après 85 évaluations de la fonction objectif et 15 itérations à la solution $(28,7; 27,8)$ (fig. III.7(a)) qui a 80 N/m^2 comme valeur de la fonction objectif.

Les deux courbes de la figure III.7(b) représentent la variation des deux paramètres du point en fonction du nombre d'itérations. Il parait bien que la méthode converge après 15 itérations vers la solution $(28,7; 27,8)$.

La figure III.7(c) représente la variation de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. Elle montre que la valeur de la fonction objectif atteinte au bout de 15 itérations est 80 N/m^2, qui est meilleure que la valeur optimale 80,4 N/m^2 correspondante à la solution en nombres entiers $(28; 28)$.

La figure III.7(d) montre la vitesse de convergence de cette méthode en mesurant le carré de la distance entre le point courant pour chaque itération et le minimum global en nombre entiers.

Des inconvénients ont été observés dans la méthode recherche par coordonnées (CS) :
i) La recherche est effectuée selon les directions des vecteurs de base uniquement ;
ii) à l'itération k, l'algorithme teste une position déjà évalué à l'itération précédente. On peut éviter la répétition de la même évaluation (qui peut être couteuse) par l'utilisation d'un cache pour mémoriser tous les points pour lesquels on a évalué la fonction objectif ;
iii) elle n'utilise qu'une recherche locale, et pas de stratégie de recherche au niveau global. Il existe un risque de convergence vers un minimum local.

III.2.4 Hooke & Jeeves

III.2.4.1 Principe

La méthode Hooke and Jeeves [Hoo] se compose de deux routines : la recherche de la direction de descente puis le déplacement dans cette direction (recherche exploratoire). A partir d'un point initial, l'algorithme effectue une recherche exploratoire par ajout

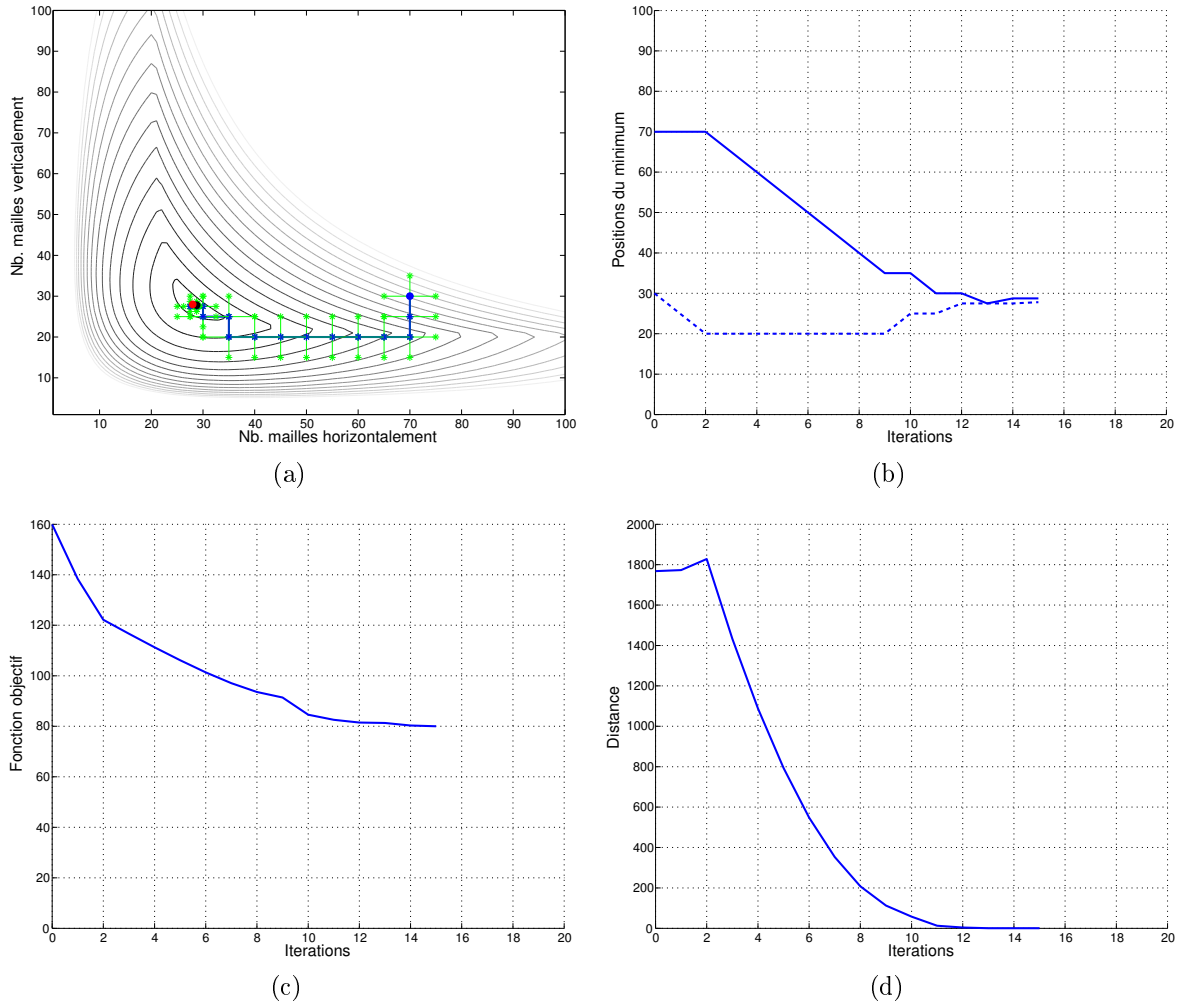


FIGURE III.7 : (a) représente les solutions successives à partir du point de départ $(70; 30)$ de la méthode d'optimisation CS, (b) montre la variation des coordonnées en fonction du nombre d'itérations, (c) représente la variation de la fonction objectif et (d) montre le carré de la distance à l'optimum. Le point rond bleu (rouge) représente le point de départ (le point optimal en nombres entiers). Le point rond noir représente la valeur minimale en nombres réels trouvée par CS. Une étoile verte représente une position testée et l'étoile bleue signifie la nouvelle position choisie. Le trajet bleu représente le parcours, du point de départ jusqu'à la valeur minimale (point noir).

d'une valeur Δ à la première variable, les autres variables restant fixes. Si le coût de la fonction à optimiser est amélioré, alors cette nouvelle composante est conservée. Dans le cas contraire, la variable est perturbée en $-\Delta$ et conservée en cas d'amélioration de la fonction objectif. Si les deux essais (ajout de $\pm\Delta$ à la $1^{ère}$ composante) n'apportent aucune amélioration, la composante reste inchangée. A la fin du processus, toutes les composantes ont été modifiées et testées une ou deux fois, et on obtient soit un point pour lequel la fonction coût a été améliorée, soit le point de référence lui-même. Dans ce dernier cas, le

processus est réitéré avec un pas Δ plus petit ($\rho * \Delta; 0 < \rho < 1$, typiquement $\rho = 0,5$). Dans le cas contraire, le nouveau point obtenu et le point initial sont utilisés pour définir la direction de recherche par extrapolation. Un déplacement peut alors être effectué le long de cette direction. Le nouveau point ainsi obtenu devient le point de référence et le processus recommence. La taille de Δ est successivement réduite en multipliant par le facteur ρ précisé par l'utilisateur ; Des petites valeurs de ρ correspondent à de petites modifications des pas de modification, ce qui force l'algorithme à examiner attentivement les régions à proximité du point courant plutôt que d'aller loin. Cela améliore la probabilité de convergence localement. La procédure s'arrête lorsque Δ devient inférieur à une certaine valeur définie par l'utilisateur.

L'algorithme de Hooke & Jeeves est illustré dans la procédure suivante :

III.2.4.2 Application au filet triangulaire

La mise en œuvre de la méthode d'optimisation de Hooke & Jeeves décrite ci-dessus nécessite la configuration suivante :
i) Un point de départ. Dans cet exemple, $x_{init} = (70; 30)$ a été pris comme précédemment ;
ii) Un pas de modification Δ_i pour chaque direction de coordonnées, désigné comme paramètre de tolérance sera réduit successivement jusqu'à ce qu'il soit égal à ϵ (10^{-6} dans notre exemple). Δ_i dépend d'un paramètre ρ ($0 < \rho < 1$, dans notre cas $\rho = 0,1$) et de la $i^{\text{ème}}$ coordonnée : Dans cet exemple, $\Delta_1 = \rho \times x_{init}(1) = 0,1 \times 70 = 7$ mailles pour la première variable et $\Delta_2 = \rho \times x_{init}(2) = 0,1 \times 30 = 3$ mailles pour la deuxième variable. Aux grandes valeurs de ρ correspondent de grands pas de modification, ce qui conduit à parcourir l'espace des variables plus rapidement en augmentant le nombre d'évaluations. Après un certain nombre d'itérations, les pas de modification Δ_i devraient être changés en $\rho \times \Delta_i$. Il est à noter dans cet exemple que nous avons remplacé les Δ_i par $\Delta_i/2$ pour des raisons pratiques.
iii) Le facteur de tolérance *tol* (10^{-6} par défaut). Dans le cas de convergence de la méthode, le processus prend fin lorsque $max(\Delta_i)$ devient plus petit ou égal à *tol*. Une valeur élevée de *tol* donne une estimation moins précise du minimum. Par contre, une valeur plus petite de *tol* implique plus de temps de calcul, mais permet une estimation plus précise.
iv) Dans le cas de non-convergence, l'exécution s'arrête après un nombre maximal d'ité-

Algorithme 3 Méthode de recherche directe Hooke & Jeeves.

Entrées: $n \in \mathbb{N}^*$: nombre de variables, $X_1 = (x_i)_{1 \leq i \leq n} \in \mathbb{R}^n$: point initial, $\Delta = (\Delta x_i)_{1 \leq i \leq n} \in (\mathbb{R}^*)^n$: paramètre représente le pas de modification suivant chacune des directions de coordonnées e_i, i=1, 2, ..., n, $tol \in \mathbb{R}^*$: facteur tolérance.

Etape 1 :
Départ par le point arbitraire X_1 appelé le point base de départ, soit k = 1.
Etape 2 :
Soit $i = 1$, $Y_{k,0} = X_k$.
Etape 3 (déplacement exploratoire) :
x_i est perturbé autour du point de base temporaire $Y_{k,i-1}$ pour obtenir le nouveau point de base $Y_{k,i}$:

$$Y_{k,i} = \begin{cases} Y_{k,i-1} + \Delta x_i \mathbf{e}_i & \textbf{si } f^+ = f(Y_{k,i-1} + \Delta x_i \mathbf{e}_i) < f = f(Y_{k,i-1}) \\ Y_{k,i-1} - \Delta x_i \mathbf{e}_i & \textbf{si } f^- = f(Y_{k,i-1} - \Delta x_i \mathbf{e}_i) < f < f^+ \\ Y_{k,i-1} & \textbf{si } f < min(f^+, f^-) \end{cases}$$

Ce processus continue pour $i = 1, 2, ...,$ jusqu'à x_n pour trouver $Y_{k,n}$.
Etape 4 :
si Le point $Y_{k,n}$ reste égale à X_k **alors**
    Réduire Δx_i (typiquement divisé par un facteur de 2)
    $i \leftarrow 1$
    Aller à l'étape 3.
sinon
    $X_{k+1} \leftarrow Y_{k,n}$ sera le nouveau point de base
    Aller à l'étape 5.
finsi
Etape 5 :
Avec les deux points de base X_k et X_{k+1}, établissons un saut de direction S comme $S = X_{k+1} - X_k$
$Y_{k+1,0} = X_{k+1} + \lambda S$, où λ est un paramètre de modification de longueur d'étape, qui peut être pris à 1 par simplicité.
Etape 6 :
$k \leftarrow k + 1$, $f_k = f(Y_{k,0})$, répéter l'étape 3.
si $f(Y_{k,n}) < f(X_n)$ **alors**
    $X_{k+1} \leftarrow Y_{k,n}$
    Aller à l'étape 5.
sinon
    $X_{k+1} \leftarrow Y_k$
    Réduire Δx_i
    $k \leftarrow k + 1$
    Aller à l'étape 2.
finsi
Etape 7 :
Le processus est supposé avoir convergé lorsque les longueurs de pas tombent en dessous d'une petite quantité *tol*. Autrement dit, le processus prend fin, lorsque $max(\Delta x_i) < tol$.

rations $iter_{max}$ (1000 dans notre exemple).

L'optimisation par la méthode de Hooke & Jeeves aboutit après 14 itérations et 56 évaluations à la solution $(28; 28, 6)$ (fig. III.8(a)) qui a 79,99 N/m^2 comme valeur de la fonction objectif.

Les deux courbes de la figure III.8(b) représentent la variation des deux variables en fonction du nombre d'itérations.

La figure III.8(c) représente la variation de la fonction objectif qui est arrivée à

79,99 N/m^2 en fonction du nombre d'itérations. Il apparait que l'amélioration de la fonction objectif vient principalement des trois premières itérations.

La figure III.8(d) montre la le carré de la distance à l'optimum global en nombres entiers en fonction du nombre d'itérations.

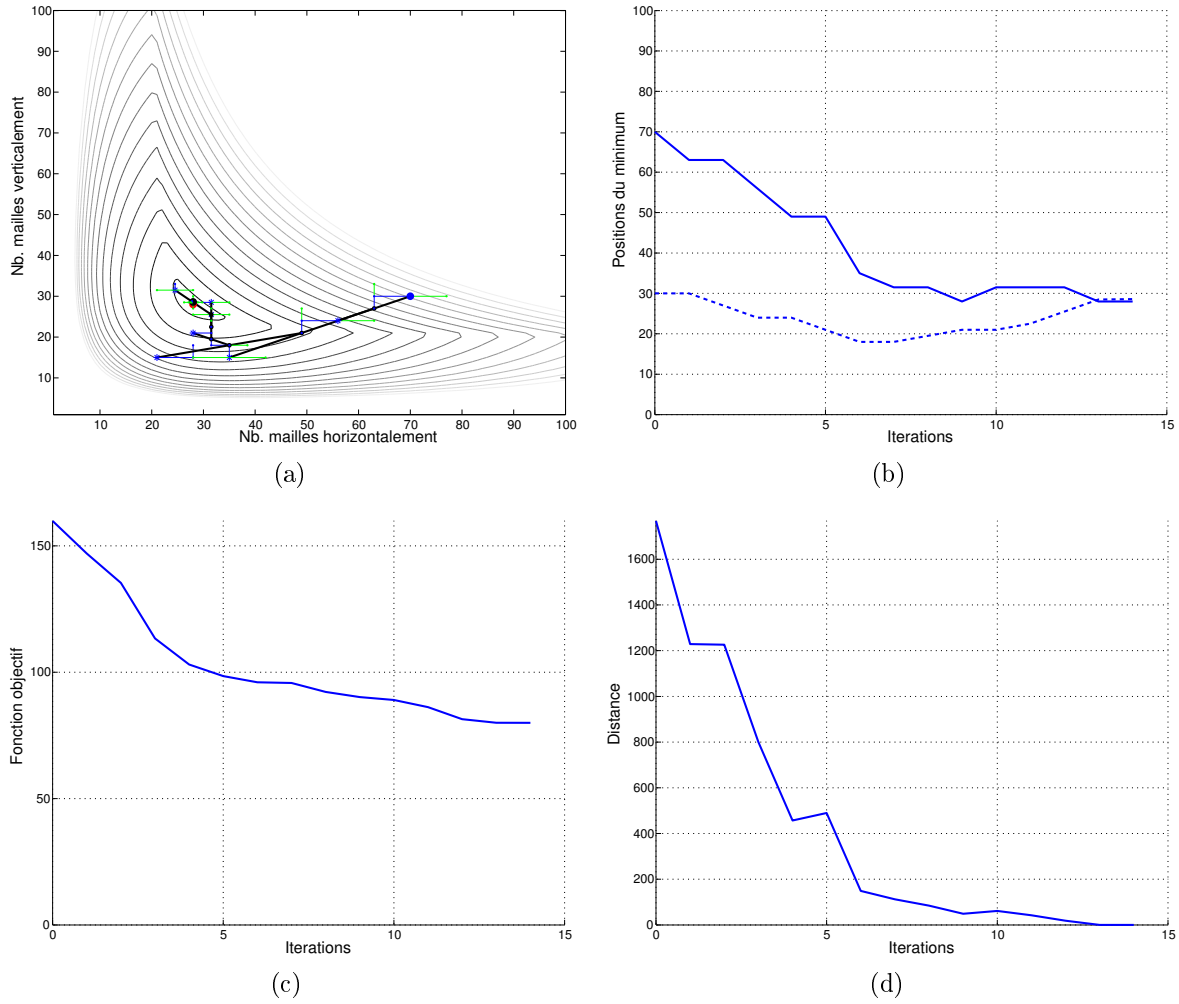


Figure III.8 : (a) représente les solutions successives en fonction du point de départ $(70; 30)$ pour la méthode d'optimisation Hooke & Jeeves, (b) montre la variation des variables, (c) représente la variation de la fonction objectif et (d) montre le carré de la distance à l'optimum. Dans (a) le point rond bleu et à droite (rouge et au milieu) représente le point de départ (le point optimal en entier). Le point rond noir (le plus haut) représente la valeur minimale réelle trouvée par la méthode. Un rond vert représente une position testée. L'ensemble des segments noirs représente le parcours du point de départ jusqu'à la valeur minimale trouvée.

Concernant le facteur ρ, une grande valeur ρ augmente le temps de calcul et présente le risque de sortir de l'espace des solutions admissibles. Une petite valeur de ρ réduit le nombre d'évaluations et augmente le risque de converger vers un minimum local. L'expé-

rience montre que le bon choix consiste à prendre une valeur de compromis (en espérant une convergence rapide).

III.2.5 Simplex

III.2.5.1 Principe

Cette méthode d'optimisation dûe à Nelder & Mead [Nel] n'a rien à voir avec la méthode du simplexe utilisée en programmation linéaire. Elle appartient à la classe des méthodes de recherche directe et tente de résoudre le problème en utilisant seulement les valeurs de la fonction objectif sans faire appel à ses dérivées.

Contrairement aux méthodes où les conditions initiales fixent un point arbitraire, la méthode de Nelder-Mead utilise un simplex de départ qui, dans $\mathbb{R}^n$, est une figure géométrique à $n+1$ points de $\mathbb{R}^n$ sur lequel des "transformations" peuvent être appliquées. Ces transformations sont déterminées par la valeur de la fonction objectif calculée aux $n+1$ points du simplex.

Plusieurs versions existent pour cette méthode dans lesquelles le simplex de départ est basé sur une initialisation aléatoire suivi d'un calcul déterministe. Il s'agit là d'une méthode de recherche séquentielle [Nel] de l'optimum, la recherche simple modifie à chaque itération un seul point résultant d'une transformation (réflexion, expansion, contraction (externe et interne) et rétrécissement) (fig. III.9) dépendante des coordonnées du centroïde du simplex.

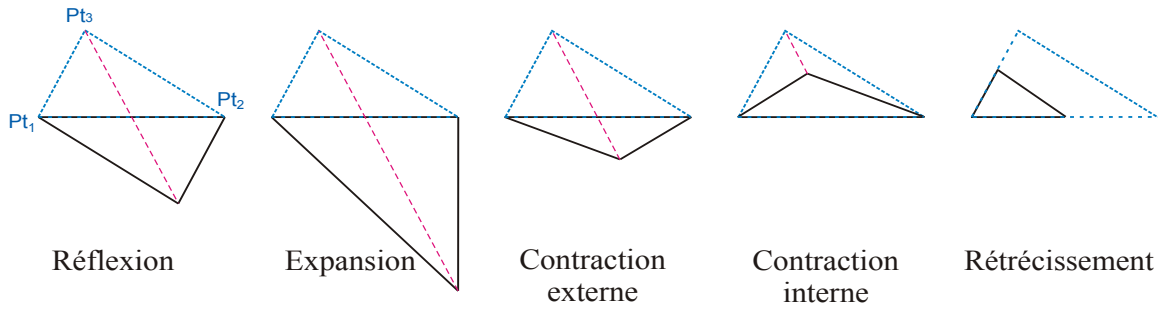


Figure III.9 : Représentation dans un espace à deux dimensions pour un problème à deux variables, des différentes opérations réalisées sur un simplex. Le simplex original est représenté en trait pointillé (bleu) et le simplex après modification est en trait normal (noir). Par convention, nous avons $f(Pt_1) < f(Pt_2) < f(Pt_3)$.

La méthode est illustrée dans l'algorithme suivant :

Algorithme 4 Simplex (Nelder & Mead).

Initialiser un simplex et calculer les valeurs de la fonction sur ses nœuds ;
Répéter les itérations t, $t \geq 0$ jusqu'au critère d'arrêt ;
    Ordonner les sommets $x_0^t, x_1^t, ..., x_n^t$ conformément à : $f(x_0^t) \leq f(x_1^t) \leq ... \leq f(x_n^t)$
    Calculer le centre de gravité : $\bar{x}^t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i^t$
    Réflexion :
        calculer le point de réflexion à partir de : $x_r^t = \bar{x}^t + \alpha(\bar{x}^t - x_n^t)$
        si $f(x_0^t) \leq f(x_r^t) < f(x_{n-1}^t)$ **alors** $x_n^t \leftarrow x_r^t$, itération suivante.
    Expansion :
        si $f(x_r^t) < f(x_0^t)$ **alors**
            calculer le point d'expansion : $x_e^t = \bar{x}^t + \beta(x_r^t - \bar{x}^t)$
            si $f(x_e^t) \leq f(x_r^t)$ **alors** $x_n^t \leftarrow x_e^t$
            sinon $x_n^t \leftarrow x_r^t$
            itération suivante.
        finsi
    Contraction extérieure :
        si $f(x_{n-1}^t) \leq f(x_r^t) < f(x_n^t)$ **alors**
            effectuer une contraction extérieure : $x_{oc}^t = \bar{x}^t + \gamma(x_r^t - \bar{x}^t)$.
            si $f(x_{oc}^t) \leq f(x_r^t)$ **alors** $x_n^t \leftarrow x_{oc}^t$, itération suivante ;
            sinon aller à l'étape **Raccourcir**.
        finsi
    Contraction intérieure :
        si $f(x_{n-1}^t) \leq f(x_r^t) > f(x_n^t)$ **alors**
            effectuer une contraction intérieure : $x_{ic}^t = \bar{x}^t + \gamma(x_n^t - \bar{x}^t)$.
            si $f(x_{ic}^t) \leq f(x_n^t)$ **alors** $x_n^t \leftarrow x_{ic}^t$, itération suivante ;
            sinon aller à l'étape **Raccourcir**.
        finsi
    Raccourcir le simplex autour de x_0^t : $x_i^t \leftarrow x_i^t + \frac{1}{2}(x_0^t - x_i^t), i = 1, ..., n$

III.2.5.2 Application au filet triangulaire

L'application de cette méthode exige la configuration suivante :

i) Un simplex de départ formé par trois sommets de $\mathbb{R}^2$, dans cet exemple nous avons pris les trois points $(70; 30)$, $(75; 40)$ et $(90; 20)$. Le premier point $(70; 30)$ étant le point de départ des méthodes testées précédemment ;

ii) Un paramètre de réflexion α, un paramètre d'expansion β et un paramètre de contraction γ. Les valeurs par défaut sont : $\alpha = \beta = 1$ et $\gamma = 0,5$;

iii) Un nombre maximum d'itérations $iter_{max}$. Dans cet exemple $iter_{max}$ égal à 50.

La figure III.10(a) montre en deux dimensions le déplacement du simplex de départ (bleu à droite) jusqu'à qu'il se réduit à un petit simplex ayant le sommet $(28,3; 28,3)$ colorié en noir comme sommet de plus faible coût ($80\ N/m^2$). Ce dernier est le point minimum trouvé sous les conditions prises.

Les deux courbes de la figure III.10(b) représentent la variation des deux variables du sommet ayant le plus faible coût du simplex, en fonction du nombre d'itérations.

La figure III.10(c) représente la variation de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. La valeur minimale trouvée de la fonction objectif est égale à 80 N/m^2, ce qui est légèrement meilleur que l'optimum (80,4 N/m^2) en nombres entiers $(28; 28)$.

La figure III.10(d) montre la vitesse de convergence de cette méthode en mesurant le carré de la distance entre le minimum courant (sommet de plus faible coût du simplex) en nombres réels et le minimum global en nombres entiers à chaque itération.

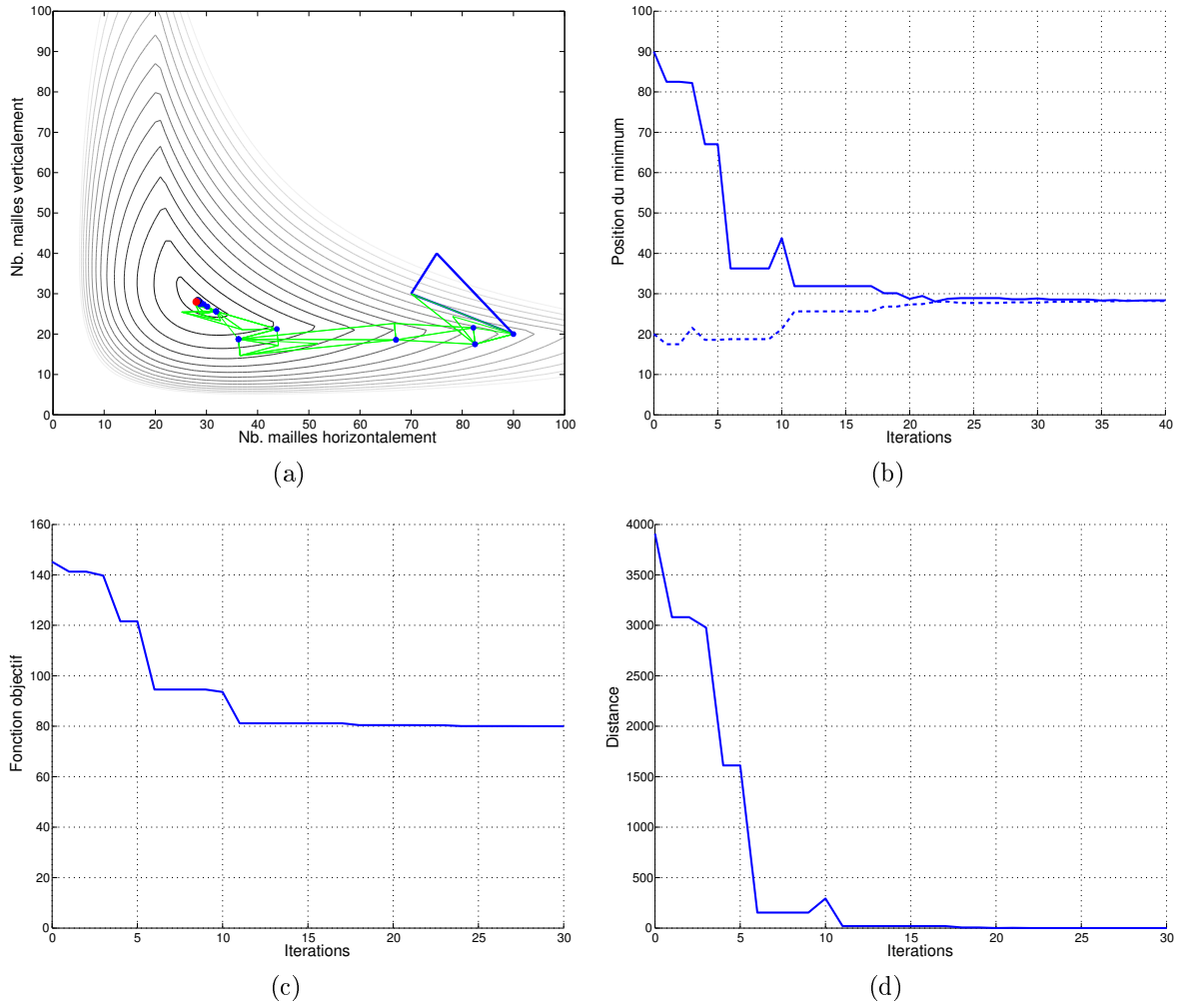


Figure III.10 : (a) Figure en 2D du déplacement du simplex de départ (bleu) durant l'application de la méthode d'optimisation Simplex. (b) variation des coordonnées du point minimum (sommet ayant le plus faible coût du simplex) et (c) variation de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations du simplex. (d) vitesse de convergence de la méthode d'optimisation.

III.2.6 Recuit simulé

III.2.6.1 Principe

La méthode de Recuit simulé (Simulated Annealing (SA)) est issue d'une analogie d'un processus physique par lequel un matériau est chauffé à une température juste en dessous de son point de fusion (recuit), puis refroidi lentement pour permettre aux molécules de s'aligner, se cristalliser et à atteindre un état d'équilibre thermodynamique d'énergie minimale.

Cette méthode, proposée par Kirkpatrick *et al.* [Kir], permet d'éviter les minima locaux. Elle consiste à considérer une fonction f à minimiser comme fonction d'énergie, et une solution s qui peut être considérée comme un état donné de la matière dont l'énergie est $f(s)$. Un paramètre de contrôle, analogue à la température T du recuit, détermine la probabilité d'accepter un mouvement aléatoire hors du minimum local. Ce déplacement est important à une température élevée et tend vers zéro quand la température est réduite.

La méthode SA démarre par une solution initiale s qui peut être prise d'une manière aléatoire dans l'espace de recherche. Une température initiale T élevée est également choisie. A chaque itération de l'algorithme une modification de la solution est effectuée. Cette modification entraîne une variation Δ de l'énergie du système. Si cette variation est négative (c'est-à-dire qu'elle fait baisser l'énergie du système), elle est appliquée à la solution courante. Sinon, elle reste acceptable avec une probabilité $e^{-\frac{\Delta}{T}}$. Ce choix de l'exponentielle pour la probabilité s'appelle règle de Metropolis [Met]. On itère ensuite selon ce procédé en gardant la température constante tant qu'il a amélioration dans la fonction objectif. La possibilité d'accepter une modification positive de l'énergie avec une probabilité $e^{-\frac{\Delta}{T}}$ permet tant que la température est élevée de s'extraire d'un minimum local. On abaisse ensuite la température par multiplication par un facteur de refroidissement α ($0 < \alpha < 1$). Le processus de recherche du minimum recommence suivant le même principe précédent jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt de la température soit atteint.

Le pseudo-code de la méthode d'optimisation de Recuit Simulé est présenté ci-dessous (Algo. 5).

Algorithme 5 Pseudo-code de l'algorithme de Recuit Simulé.

Entrées: Choisir une solution initiale $s \in S$, une température initiale T, une température d'arrêt T_{stop}, un nombre maximal de tentatives au sein d'une température $MaxTries$ et un coefficient de refroidissement α $(0 < \alpha < 1)$;

tantque $T > T_{stop}$ **faire**
  tantque $repetitionTfixe < MaxTries$ **faire**
    Choisir aléatoirement $s' \in V(s)$;
    $\Delta \leftarrow f(s') - f(s)$;
    si $\Delta < 0$ **alors**
      $s \leftarrow s'$;
    sinon
      $r \leftarrow$ nombre aléatoire entre 0 et 1 ;
      si $r < e^{-\Delta/T}$ **alors**
        $s \leftarrow s'$;
      finsi
    finsi
    repetitionTfixe $\leftarrow$ repetitionTfixe + 1 ;
  fin tantque
  $T \leftarrow \alpha T$;
  repetitionTfixe $\leftarrow 0$;
fin tantque
retourner s

III.2.6.2 Application au filet triangulaire

Nous avons adapté l'algorithme Matlab de Vandekerckhove [Van] basé sur la méthode de SA [Kir] au problème du filet exigeant la configuration suivante :

i) Un point de départ de $\mathbb{R}^2$. Nous avons pris le même point initial $(70; 30)$ que précédemment ;

ii) La température initiale (T_{init}) qui peut être n'importe quel nombre positif, la température d'arrêt (T_{stop}) qui peut être n'importe quel nombre positif plus petit que T_{init} et le coefficient de refroidissement (α). Durant l'exécution du programme, la prochaine température qui est prise est $\alpha \times T_{init}$. Dans cet exemple, les valeurs essayées sont $T_{init} = 1$ et $T_{init} = 100$ avec $T_{stop} = 10^{-1}$ et $\alpha = 0.8$;

iii) Generator : c'est le générateur de nombres aléatoires qui est donné par la fonction $@(x)(x + randn(1, 2))$. La fonction $randn(1, 2)$ génère un vecteur ligne de deux valeurs distribuées de façon Gaussienne de moyenne 0 et d'écart-type 1 ;

iv) MaxConsRej : nombre maximal de rejets consécutifs, peut être n'importe quel nombre positif. Par défaut MaxConsRej = 1000 ;

v) MaxTries : nombre maximal de tentatives pour une température, peut être n'importe quel nombre positif. Par défaut MaxTries = 300 ;

vi) MaxSuccess : nombre maximum de succès pour une température, peut être n'importe

quel nombre positif. Par défaut MaxSuccess = 20.

La première application de la méthode de SA qui est pour une température égale à 1 et en partant du point initial $(70; 30)$, aboutit à la solution $(28,23; 27,98)$ (fig. III.11(a)) qui a 80,25 N/m^2 (fig. III.11(c)) comme valeur de la fonction objectif après 1282 évaluations, 230 itérations et 12 étapes de refroidissement. En passant à la température de 100, l'optimisation conduit à la solution $(29,73; 26,82)$ (fig. III.11(b)) qui a 80,41 N/m^2 (fig. III.11(d)) comme valeur de la fonction objectif après 1631 évaluations, 610 itérations et 32 étapes de refroidissement.

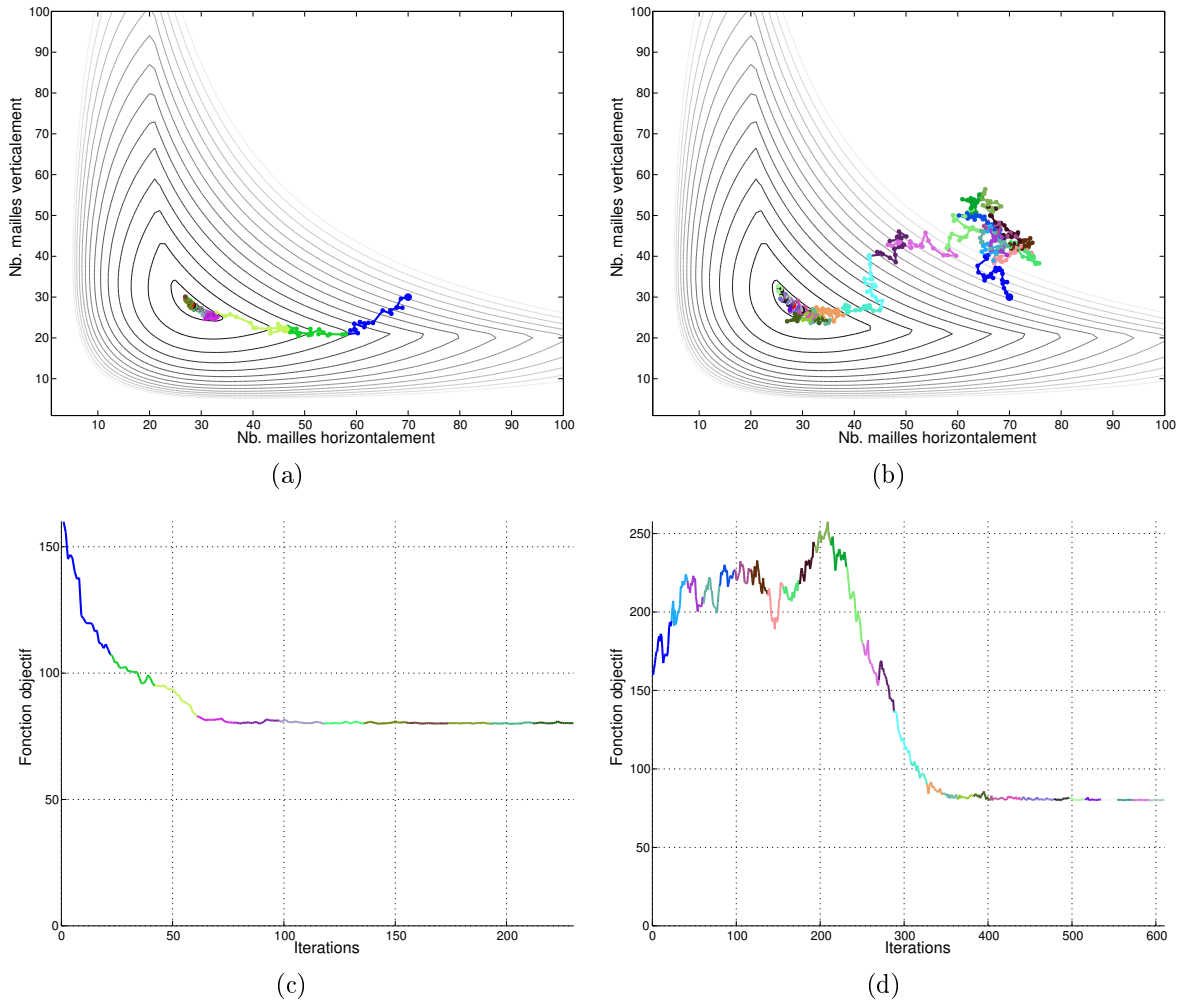
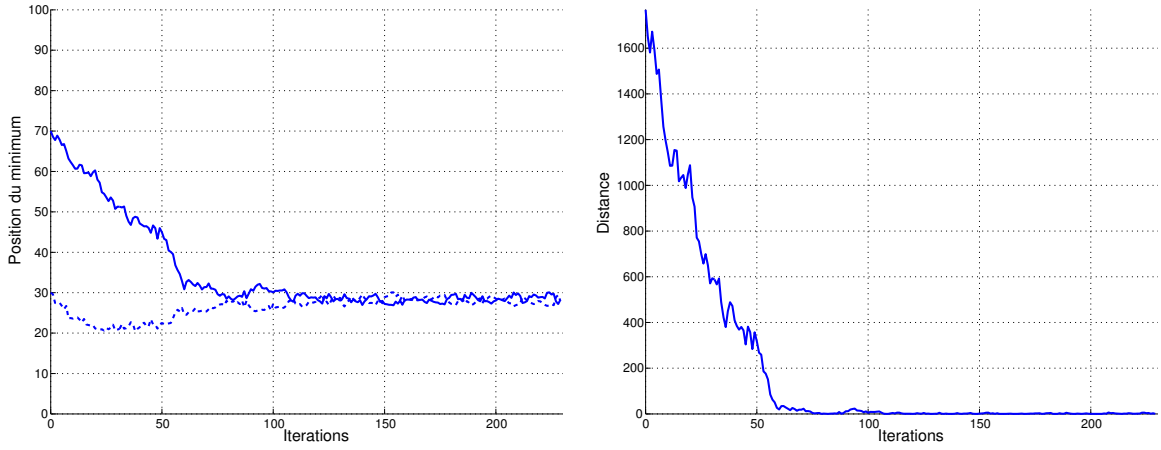


Figure III.11 : (a) et (b) représentent le déplacement en deux dimensions du minimum à chaque itération pour les deux valeurs de la température (1 et 100) de la méthode SA. (c) et (d) montrent l'évolution de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. Un changement de couleur dans chacune des figures (c) et (d) signifie un changement de température.

Les figures III.11(c) et III.11(d) représentent la variation de la fonction objectif en

fonction du nombre d'itérations avec les deux valeurs de température. Le changement du couleur dans chaque courbe signifie le changement de la température à l'itération correspondante. Il est clair (figs. III.11(c) et III.11(d)) qu'avec la première température l'algorithme ne permet pas d'explorer pleinement la surface (fig. III.11(a)), tandis qu'avec la température plus élevée (100) l'optimisation permet d'explorer de manière significative la surface (fig. III.11(b)).

Les deux courbes de la figure III.12(a) représentent l'évolution des deux coordonnées du minimum en fonction du nombre d'itérations à la température 1. La figure III.12(b) montre la vitesse de convergence de cette méthode en mesurant le carré de la distance entre le minimum courant en nombres réels et le minimum global en nombres entiers.



(a) (b)

Figure III.12 : (a) représente la variation des coordonnées du minimum courant en fonction du nombre d'itérations. (b) représente la vitesse de convergence de la méthode SA. (a) et (b) ont été tracées avec la température 1.

On constate que la température joue un rôle significatif dans l'optimisation SA du fait que cette méthode a un caractère global qui permet d'explorer la surface progressivement avec la température et de trouver le moyen efficace d'échapper des minimas locaux.

III.2.7 Combinaison Recuit simulé avec Simplex

III.2.7.1 Principe

Cette méthode décrite dans le livre "Numerical Recipes in C" [Pre] se base sur la technique de recuit simulé (SA) (Kirkpatrick *et al.* [Kir]) et celle du simplex de Nelder & Mead [Nel].

La méthode du simplex est une technique de descente rapide dans l'espace des paramètres qui permet d'atteindre le fond d'une vallée de la fonction objectif. Ce fond peut être en fait un minimum local et de ce fait on peut s'y trouver piégé. L'algorithme de recuit simulé nous permet de sortir de ce minimum local pour explorer d'autres minima et éventuellement accéder au minimum global.

La méthode du simplex revient à considérer au point x (dans $\mathbb{R}^n$) un simplex de $n+1$ points. Les mouvements sont les mêmes que celles décrites au paragraphe III.2.5, à savoir des réflexions, des expansions, des contractions et des rétrécissements du simplex. La mise en œuvre de la procédure de Metropolis [Met] est un peu plus élaborée : On ajoute une valeur aléatoire positive et proportionnelle à la température T, à la valeur de fonction objectif associée à chaque sommet du simplex, et on soustrait une variable aléatoire similaire de la valeur de la fonction objectif de chaque nouveau point qui est jugé comme un point de remplacement. Comme la procédure ordinaire de Metropolis, cette méthode accepte toujours une vraie étape de descente, mais accepte parfois une montée pour s'extraire du minimum local en explorant de manière stochastique la topographie locale.

Auparavant, le simplex n'avait d'autre choix pour évoluer que d'explorer de manière déterministe la topographie locale. Dorénavant il va être en mesure de l'explorer de manière stochastique avec une énergie supplémentaire qui lui est apportée par le recuit simulé. Donc au lieu de faire les déformations géométriques sur le simplex à partir des conditions déterministes provenant des valeurs environnantes de la fonction objectif, on les détermine maintenant de manière "thermique" (énergétique). Les positions des sommets du simplex sont alors affectées par la température. Dans la limite $T \to 0$, cet algorithme se réduit exactement à la méthode du simplex standard et converge vers un minimum local.

III.2.7.2 Application au filet triangulaire

La mise en œuvre de cette méthode mixte est basée sur une procédure nommée "amebsa" qui fait appel à la fonction "amotsa" qui gère les différentes étapes du simplex. "amebsa" et "amotsa" sont issues du livre "Numerical Recipes in C" [Pre] et nécessitent la configuration suivante :

i) Un point de départ, puis selon les dimensions de ses coordonnées le programme génère

autour de ce point un simplex formé par trois points dans l'espace de paramètres $\mathbb{R}^2$. Dans notre exemple nous avons initialisé le simplex initial à $S_0 = \{(70;30),(75;40),(90;20)\}$, identique à la méthode du Simplex (§ III.2.5.2), pour permettre de comparer l'évolution de l'exécution avec d'autres méthodes et notamment la méthode de simplex (cf. § III.2.5) ;
ii) Une température initiale "T_{init}" ($T_{init} \geq 0$) et un coefficient de refroidissement ($0 < \alpha < 1$). Durant l'exécution du programme, la prochaine température prise est $\alpha \times T_{init}$. Dans cet exemple, les valeurs prises sont $T_{init} = 5$ et $\alpha = 0,8$;
iii) Le nombre maximal de cycles "$cycle_{max}$" (par défaut 100) et le nombre maximal d'itérations "$iter_{max}$" (l'utilisateur choisit ce nombre à l'entrée) pour chaque cycle. On appelle "cycle" une phase totale d'évolution d'un simplex soumis aux conditions prises. Le cycle numéro i démarre à la température $\alpha \times T_{i-1}$. Dans cet exemple nous avons pris la valeur par défaut pour "$cycle_{max}$" et nous avons testé deux cas pour $iter_{max}$, 5 et 50 ;
iv) F_{tol} : Facteur tolérance de convergence pour la méthode (valeur par défaut 10^{-6}). Ce facteur représente la borne limite inférieure de l'écart (ΔF) entre les valeurs de la fonction objectif des deux points du simplex : le plus élevé et le plus bas. Cycle "i" s'arrête quand il atteint son nombre maximal d'itérations ou bien quand la convergence est atteinte ($\Delta F_i < F_{tol}$).

Les deux figures de gauche (droite) de fig. III.13 représentent le déplacement du simplex et la variation de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations pour $iter_{max} = 5$ ($iter_{max} = 50$). Un changement de couleur représente le passage d'un cycle à un autre. Il est clair d'après la fig. III.13(b) (cas $iter_{max} = 50$) que le nombre d'itérations à chaque cycle (nombre de simplex ayant la même couleur) est beaucoup plus grand que celui de la figure III.13(a) (cas $iter_{max} = 5$). Il apparait aussi que la plupart des cycles (fig. III.13(b)) démarrent autour du point minimum en essayant de sauter de ce point pour explorer la région proche de ce minimum afin de trouver un nouveau minimum meilleur que l'ancien. On voit bien dans les deux figures de variation de la fonction objectif III.13(c) (cas $iter_{max} = 5$) et III.13(d) (cas $iter_{max} = 50$) que la méthode converge en presque sept itérations. Par contre dans le deuxième cas ($iter_{max} = 50$) la méthode nécessite plus d'itérations pour converger.

Dans le cas $iter_{max} = 5$, la méthode converge vers la solution en nombres réels $(28,2849;28,2834)$ qui a 79,9501 N/m^2 comme valeur de la fonction objectif à une tem-

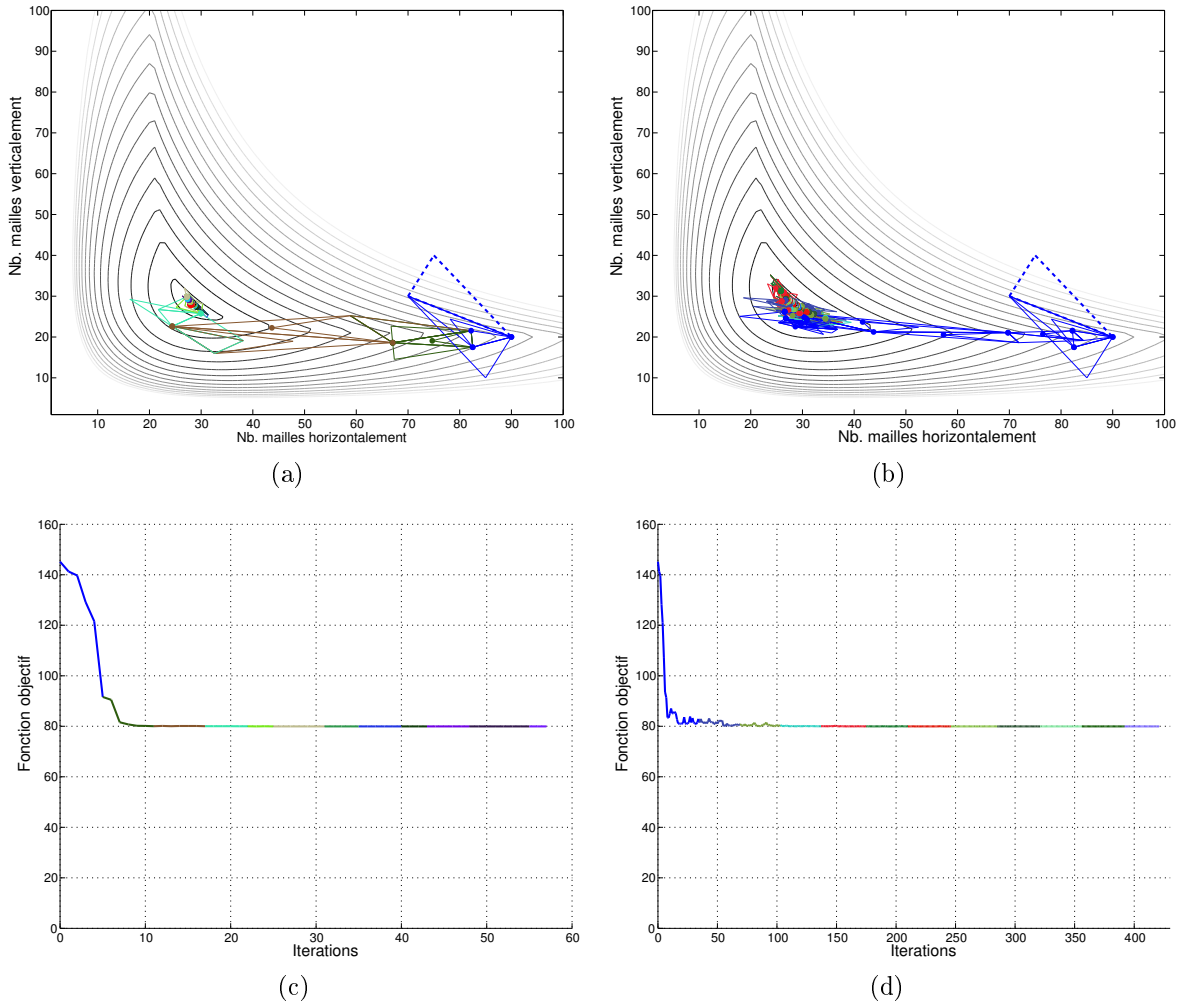
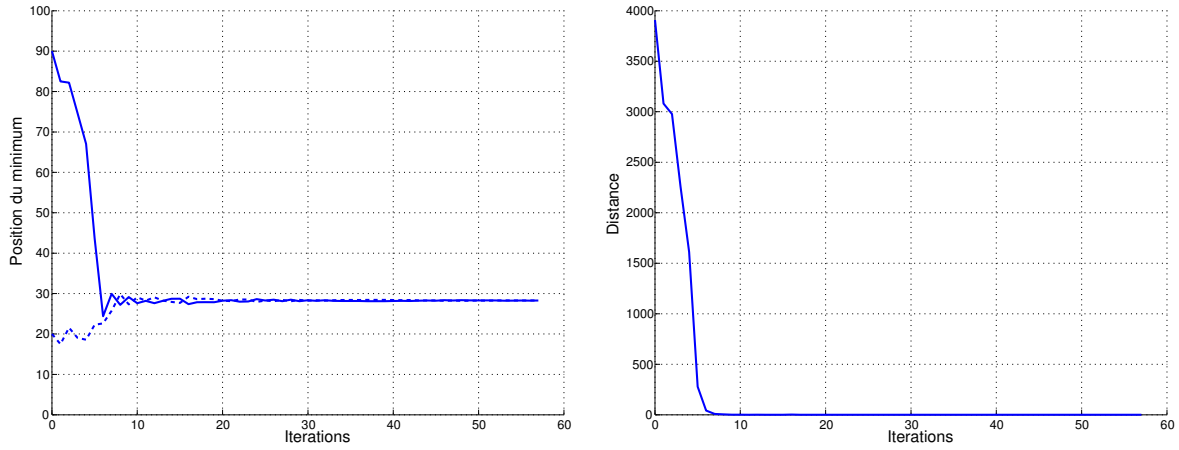


FIGURE III.13 : Les deux premières figures (a) et (b) représentent le déplacement en deux dimensions du minimum en fonction du nombre d'itérations pour deux valeurs différentes prises pour "$iter_{max}$" : 5 (a) et 50 (b) de la méthode d'optimisation mixte SA avec Simplex. (c) (cas $iter_{max} = 5$) et (d) (cas $iter_{max} = 50$) montrent l'évolution de la fonction objectif en fonction du nombre d'itérations. Un changement de couleur dans chaque figure signifie la terminaison d'un cycle et le démarrage d'un autre.

pérature 0,000174 en faisant 46 cycles et 56 itérations. Lorsque cette solution est trouvée, la méthode fait un cycle en plus avec deux itérations pour revenir et s'arrêter à la même solution à une température 0,000139. Au total, le nombre d'évaluations est de 233 et le nombre d'itérations est de 58. Par contre dans le deuxième cas ($iter_{max} = 50$) la méthode converge vers la solution en nombres réels $(28,2582; 28,3104)$ qui a 79,9501 N/m^2 comme valeur de la fonction objectif à une température 0,015112 en faisant 26 cycles et 251 itérations. Lorsque cette solution est trouvée la méthode fait 15 cycles de plus avec 171 itérations pour s'arrêter à la solution $(28,3009; 28,2678)$ qui a 79,9505 N/m^2 à une température 0,000532. Au total, le nombre d'évaluations est de 1449 et le nombre d'ité-

rations est de 422. Les deux courbes de la figure III.14(a) représentent l'évolution des deux coordonnées du point minimum en fonction du nombre d'itérations en prenant le cas $iter_{max} = 5$. La figure III.14(b) montre la vitesse de convergence de cette méthode ($iter_{max} = 5$) en mesurant le carré de la distance entre le minimum courant en nombres réels et le minimum global en nombres entiers à chaque itération.



(a) (b)

FIGURE III.14 : (a) représente la variation des coordonnées du minimum courant en fonction du nombre d'itérations. (b) représente la vitesse de convergence (le carré de la distance à l'optimum) de la méthode mixte SA avec Simplex. (a) et (b) ont été tracées avec "$iter_{max} = 5$".

III.3 Étude comparative entre ces méthodes

La qualité de la méthode d'optimisation est normalement estimée par la vitesse de convergence, et afin d'estimer cette vitesse on utilise la méthode suivante :

On trace le diagramme log-log (log de la distance (d) au minimum global en fonction du log du nombre d'itérations (N)) et on décompose la variation globale en différents régimes de variation caractérisés chacun par un exposant approprié (on s'attend à ce que $d \sim 1/N^{\alpha}$ ou $log(d) \sim -\alpha log(N)$). L'exposant est la pente obtenue à partir des incréments Δd et ΔN respectifs pris entre deux points donnés. La vitesse de convergence augmente avec α. On souhaiterait que α soit strictement plus grand que 1.

Dans chacun des paragraphes suivants, on va présenter la vitesse de convergence pour chacune des méthodes adaptatives décrites précédemment.

Recherche par coordonnées D'après la variation log-log (log de la distance au minimum global en fonction du log du nombre d'itérations) on constate (fig. III.15) la présence de trois régimes de variation. On délaisse le troisième régime ($\log(N) > 2{,}3$) étant donné qu'on est très proche du minimum et de ce fait on converge à la verticale. Le premier régime ($\log(N) < 0{,}7$) est caractérisé par un exposant nul (pour les premières itérations) tandis que le second régime se caractérise par un exposant variable dont la valeur moyenne est aux alentours de 2.

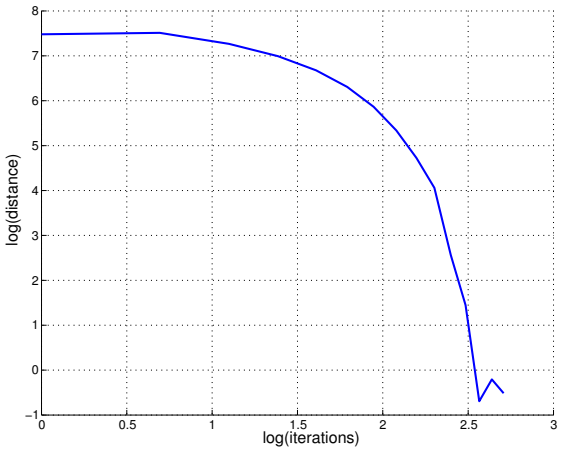


Figure III.15 : Vitesse de convergence de la méthode d'optimisation Recherche par coordonnées (CS) appliquée sur l'exemple d'un filet triangulaire fixé d'un nœud et tendu par les deux autres par deux câbles.

Hooke & Jeeves D'après la variation log-log (log de la distance au minimum global en fonction du log du nombre d'itérations) on constate (fig. III.16) la présence d'un seul régime de variation caractérisé par $\alpha \sim 2,1$ si l'on ignore le début plat de la courbe.

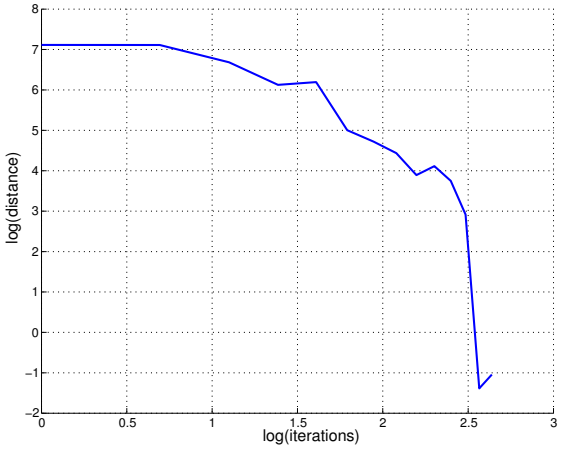


Figure III.16 : Vitesse de convergence de la méthode d'optimisation Hooke & Jeeves.

Recuit simulé D'après la variation log-log (log de la distance au minimum global en fonction du log du nombre d'itérations) on constate (fig. III.17) la présence de trois régimes de variation. Le premier est caractérisé par un exposant nul (variation plate), tandis que le second se caractérise par $\alpha \sim 3$. On délaisse le troisième régime étant donné qu'on est proche du minimum. On constate un nombre important d'itérations pour sonder la surface (régime plat) avant de converger, ce qui est probablement dû soit à une haute température soit à un mauvais coefficient de refroidissement.

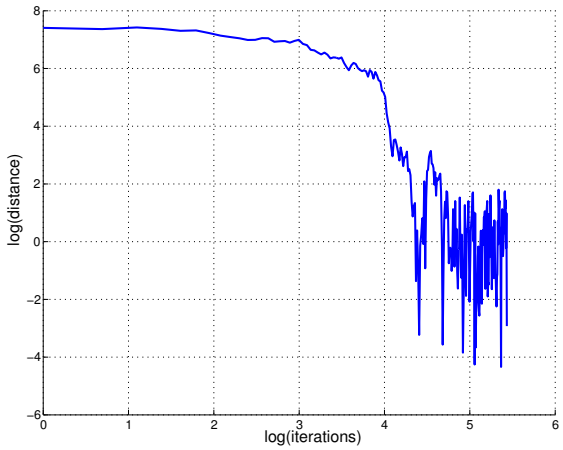


Figure III.17 : Vitesse de convergence de la méthode d'optimisation Recuit simulé.

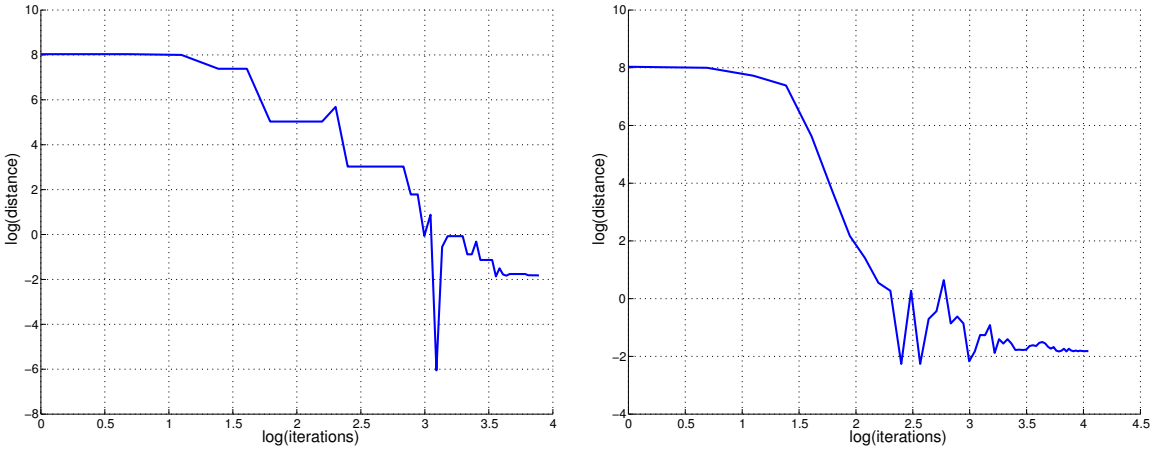
Simplex *et* **Recuit simulé avec Simplex** Dans la figure III.18 on présente la vitesse de convergence des deux méthodes d'optimisation : Simplex (III.18(a)) et Recuit simulé avec Simplex (III.18(b)). On observe dans les deux figures III.18(a) et III.18(b) la présence de deux régimes de variation caractérisés par deux exposants (pour le Simplex) :

1. α_1 presque 0 au début des itérations
2. α_2 presque 5 ce qui est un excellent résultat.

Tandis que pour la combinaison "Recuit et Simplex" on a :

1. α_1 presque 0 au début des itérations
2. α_2 presque 6,6 ce qui est un meilleur résultat que le simplex tout court.

En conclusion, les deux méthodes Simplex et Recuit simulé avec Simplex sont les meilleures (avec un léger avantage à la combinaison : "Recuit et Simplex") étant donné le plus grand α obtenu sur l'intervalle de variation.



(a) (b)

FIGURE III.18 : (a) montre la vitesse de convergence de la méthode d'optimisation Simplex et (b) montre celle de la méthode Recuit simulé avec Simplex.

Pour les petites valeurs de la distance on a des variations qui peuvent être interprétées comme une remontée de la fonction objectif. Il n'en est rien, puisque ce sont de petites valeurs amplifiées par le logarithme. Il faut tenir compte tout simplement de la tendance moyenne.

Dans le chapitre suivant on va présenter nos méthodes d'optimisation basées sur certaines de ces méthodes approchées, en les appliquant au chalut de pêche. L'application des autres méthodes testées à la maquette triangulaire au chalut réel reste comme perspective pour des nouveaux travaux de recherche.

Chapitre IV

Méthodes d'optimisation appliquée au cas des chaluts

Bien que notre étude comparative du chapitre III concernant le filet simple ait montré que la méthode du recuit simulé avec simplex était la plus performante en termes de vitesse de convergence et l'obtention de l'optimum global, celle que nous allons utiliser par la suite est la méthode de recherche par coordonnées.

La raison qui nous a amenés à faire ce choix est la suivante :

les modifications apportées au filet doivent rester acceptables par les pêcheurs. Aussi faut-il une méthode qui d'une part ne modifie que quelques paramètres, et d'autre part les modifie de façon significative. En effet des modifications trop faibles (0,1 maille de filet) n'auront pas de sens pour les professionnels. Ces contraintes excluent les méthodes ayant une composante stochastique.

Ceci dit, pour des fins de vérification des méthodes nous avons employé en outre la méthode stochastique.

En ce qui concerne l'optimisation du chalut dans son intégralité, nous avons donc choisi la méthode de recherche par coordonnées adaptée de deux façons (SOT et SRT expliquées plus loin) et la méthode aléatoire.

Présentons maintenant les chaluts ainsi que leurs caractéristiques qui sont l'objet de notre étude.

IV.1 Description des chaluts

IV.1.1 Chalut pélagique

Le chalut pélagique utilisé dans notre étude est exploité pour les recherches scientifiques [Mas]. Ce chalut a un bourrelet et une corde de dos de 57 m de longueur, des cordes latérales de longueur 52 m. Dans ce cas le chalut sera nommé **57 52**. Les funes ont 200 m de longueur et la longueur des bras est égale à 100 m. Le plan du filet du chalut (sans les câbles) est affichée dans la figure IV.1.

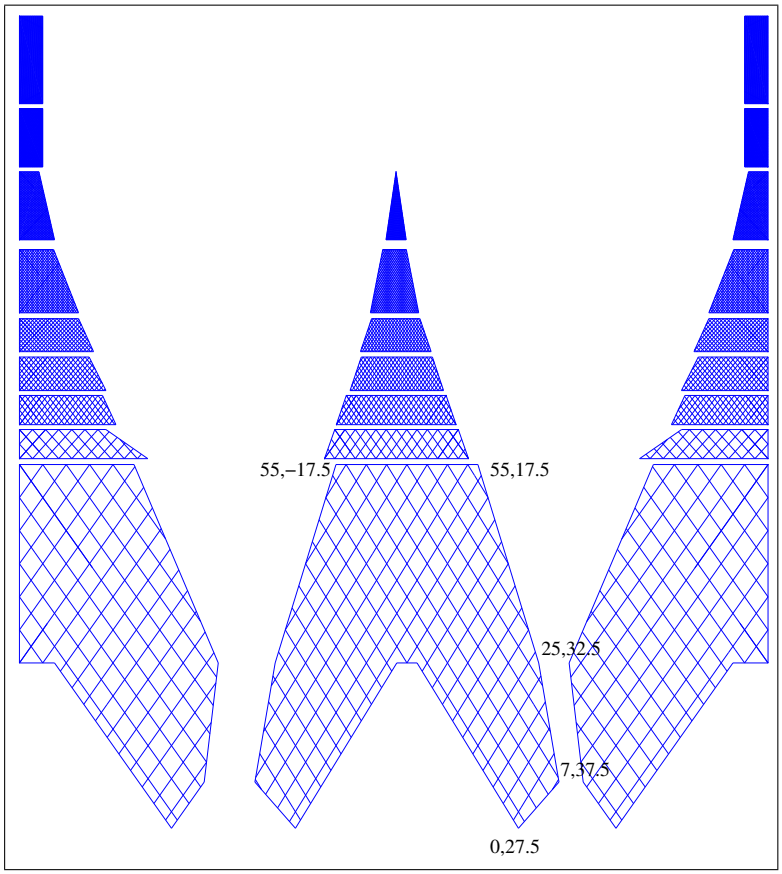


Figure IV.1 : Les pièces de filet d'un chalut pélagique. En raison de la symétrie uniquement la moitié des pièces de filet est présentée. En raison du grand nombre de fils seulement 1 fil sur 5 est tracé. Les coordonnées en nombre de mailles pour certains nœuds sont notées.

IV.1.2 Chalut de fond

Nous allons décrire deux chaluts de fond sur lesquels nous avons travaillé. Les deux chaluts ont le même plan de filet mais leurs câbles ont des longueurs différentes.

– Le premier chalut est exploité sur un navire de recherche [Rep]. Dans notre étude ce chalut est utilisé à 80 m de profondeur avec des funes (câbles d'acier pour traîner le chalut) de 215 m et des bras de 36,6 m. La vitesse de remorquage est 1,69 m/s. Ce chalut est traité dans la section V.2.1.

– Le second chalut utilisé sur un navire de recherche [Stu] a son plan affiché sur la figure IV.2. Ce chalut dans notre étude est utilisé à 81 m de profondeur avec des funes de 201 m et des bras de 36,6 m. La vitesse de traction considérée ici est de 1,51 m/s. Ce chalut est traité dans la section V.2.2.

IV.2 Paramètres d'optimisation

IV.2.1 Fonction objectif

L'énergie requise annuellement pour tracter un chalut est due à la traînée (D) et la distance annuelle de traction (L). Si nous considérons que l'efficacité du système de propulsion est connu (η) ainsi que la capacité calorifique du carburant (h_f), le volume de carburant de l'opération de chalutage (V_f) peut être évaluée par la relation suivante :

$$V_f = \frac{DL}{\eta h_f} \tag{IV.1}$$

V_f : Volume de carburant consommé par an (m^3),
D : Traînée de l'engin (filet + câbles) (N),
L : Distance parcourue par an (m),
η : Efficacité de la propulsion (souvent proche de 0,1),
h_f : Capacité calorifique du combustible (36 GJ/m^3 pour le fuel).

Une amélioration des engins de pêche doit être effectuée sans nuire à la quantité de poisson pêché par an (F). Cette quantité est fonction du volume balayé par an par le chalut, de la distribution du poisson dans le volume d'eau et de la capacité de capture du chalut.

Le volume balayé d'un an par le chalut est le produit de la surface de la gueule du chalut par la distance remorquée par an (L).

La distribution de poisson est la répartition verticale du poisson lorsqu'il rencontre

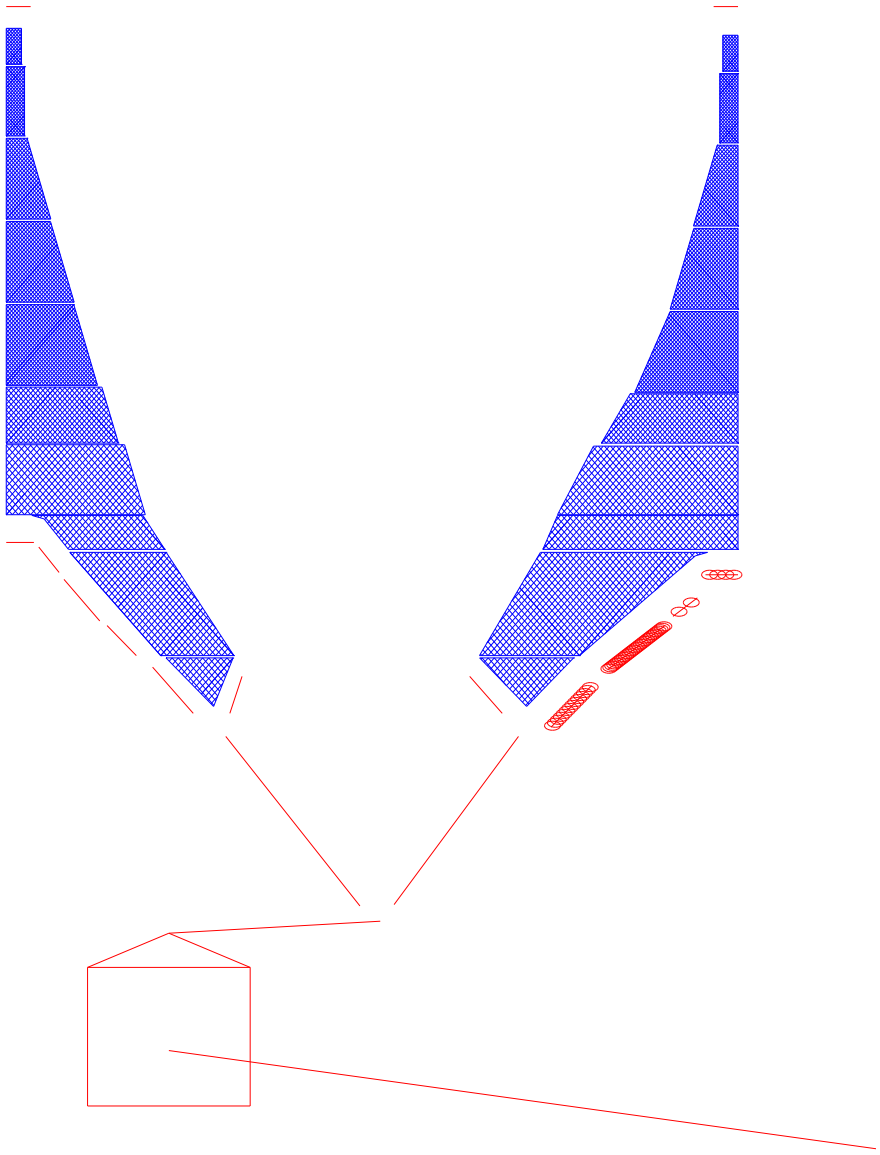


Figure IV.2 : Les pièces du filet d'un chalut de fond de référence. En raison de la symétrie du chalut seulement la moitié du dos (à droite) et du ventre (à gauche) sont présentées. En raison du grand nombre de fils seulement 1 fil sur 5 est tracé. Les flotteurs sur la corde de dos sont affichées ainsi que le panneau (carré).

le chalut, c'est à dire lorsqu'il peut être capturé par l'engin de pêche. Cette distribution de poisson dans la colonne d'eau doit être discutée avec les pêcheurs et les biologistes. Dans notre travail, nous considérons trois types de distribution du poisson (fig. IV.3) : deux distributions uniformes de poisson dont chacune est définie par deux paramètres : la profondeur à l'égard du fond de la mer et la densité volumique de poisson. Le troisième

cas est une fonction linéaire de la profondeur au-dessus du fond de la mer (les trois distributions sont représentées dans la figure IV.3). Cela signifie que nous avons deux densités uniformes respectivement sur 6 m et 3 m de hauteur, alors que la dernière densité a une variation linéaire sur 6 m de hauteur. Ces trois distributions ont été choisies de telle sorte qu'elles conduisent à la même densité de poisson (en kg/m^2) rapportée au fond.

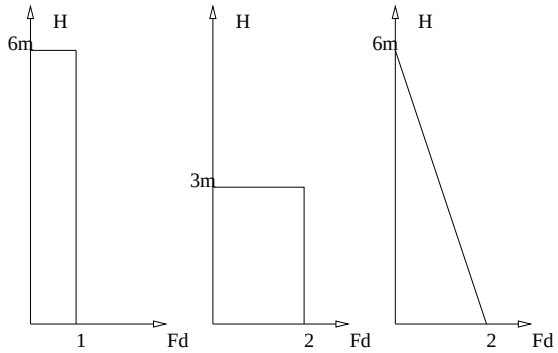


Figure IV.3 : Trois répartitions de la densité de poisson relativement au fond sont utilisées. Fd : densité de poisson, H : hauteur relativement au fond.

La quantité de poissons capturés par le chalut est l'intersection de la géométrie 2D de la gueule par la longueur annuelle parcourue et de la distribution des poissons comme le montre la figure IV.4.

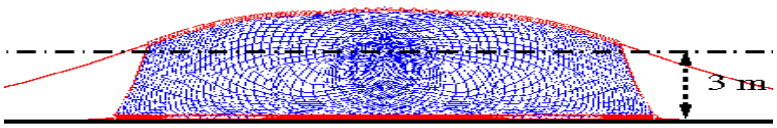


Figure IV.4 : Vue de face d'un chalut. Le poisson capturé par le chalut est lié à l'intersection (S_i) de la gueule du chalut avec la distribution de poisson (ici 3 m de hauteur).

Pour résumer, la quantité de poisson pêché par an est le produit de la distance annuelle parcourue (L) par la surface d'intersection (S_i) et la capacité de capture au chalut (T_c). Ici la capacité de capture est considérée ne pas être affectée par la méthode d'amélioration

de l'engin. Sous ces conditions, la quantité de poisson pêché par an est la suivante :

$$F = S_i L T_c \tag{IV.2}$$

F : Quantité de poisson pêché par an (kg),

S_i : Intersection entre la surface de la gueule du chalut de fond et la distribution du poisson (m^2),

L : Distance parcourue par an (m),

T_c : Capturabilité du poisson par le chalut (kg/m^3).

L'amélioration de l'engin est destinée à diminuer le ratio entre la consommation de carburant et la quantité de poisson capturé. Ce ratio est calculé à partir des deux équations précédentes :

$$\frac{V_f}{F} = \frac{D}{S_i} \frac{1}{\eta h_f T_c} \tag{IV.3}$$

Comme nous avons pris pour hypothèse que les paramètres η, h_f et T_c sont constants, en d'autres termes ils ne sont pas affectés par le processus d'optimisation, la fonction objectif d'optimisation devient égal au ratio D/S_i.

IV.2.1.1 Traînée du chalut

Dans le tableau IV.1, une répartition classique de la traînée entre les composants du chalut est présentée pour les chaluts de fond. On peut voir que la majorité de la traînée est due au filet. C'est donc dans un premier temps cette partie du chalut que nous allons optimiser pour diminuer le ratio D/S_i. Dans un deuxième temps nous ferons l'optimisation sur la longueur des câbles.

Câbles	7% - 8%
Panneaux	19% - 21%
Filet	60% - 66%
Prise	0% - 10%
Frottement sur le fond	4% - 5%
Total	100%

Tableau IV.1 : La répartition de traînée entre les composants de chalut de fond. Ces chiffres proviennent de la modélisation qui montre que la majorité de la traînée est due au filet.

La traînée D et la surface d'intersection S_i sont calculées par le modèle FEM [Prid] décrit dans le chapitre II.

IV.2.1.2 Surface d'ouverture de la gueule du chalut

Dans le modèle numérique, le filet est modélisé par éléments finis triangulaires [Pria]. La surface de la gueule du chalut est calculée comme la somme de la projection de chaque élément triangulaire sur le plan normal au déplacement de remorquage. Dans la figure IV.5, nous montrons l'aspect général des éléments triangulaires utilisées dans le modèle des éléments finis (FEM).

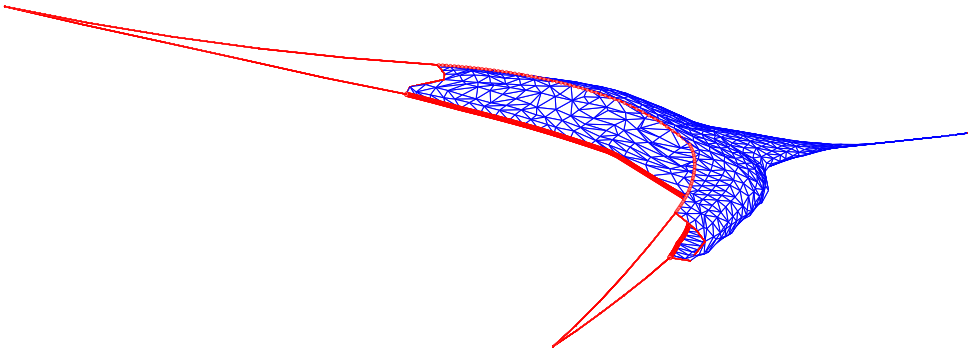


FIGURE IV.5 : Maillages triangulaires utilisées dans le modèle des éléments finis. La taille de discrétisation utilisée dans le modèle des éléments finis est de 2 m (représentée sur cette figure), alors que la taille de vérification est de 0,5 m.

IV.2.2 Paramètres numériques

Trois principaux paramètres numériques contrôlent le processus d'optimisation : la taille de discrétisation (en m), la taille de modification (PR en nombre de mailles pour le filet) et le paramètre de Newton-Raphson (NRP en N). L'influence de deux premiers paramètres a été analysée dans la réf. [Prid].

IV.2.2.1 Taille de discrétisation

La taille de discrétisation est la taille des éléments numériques utilisées dans le modèle FEM. La taille de discrétisation utilisées dans le processus d'optimisation est généralement de 2 m (fig. IV.5). Une fois le processus d'optimisation effectuée, une vérification des résultats avec la taille de la discrétisation de 0,5 m est réalisée. Dans le cas du chalut de fond de la figure IV.2, le maillage est constitué de 391 éléments triangulaires pour le filet et 73 éléments barres pour les câbles pour un pas de discrétisation 2 m, contre 5029 éléments triangulaires et 180 éléments barres pour un pas de discrétisation 0,5 m.

La discrétisation en éléments finis du filet, la numérotation des éléments dans une pièce et l'assemblage entre pièces et câbles sont décrits en détail dans les figures IV.6, IV.7 et IV.8.

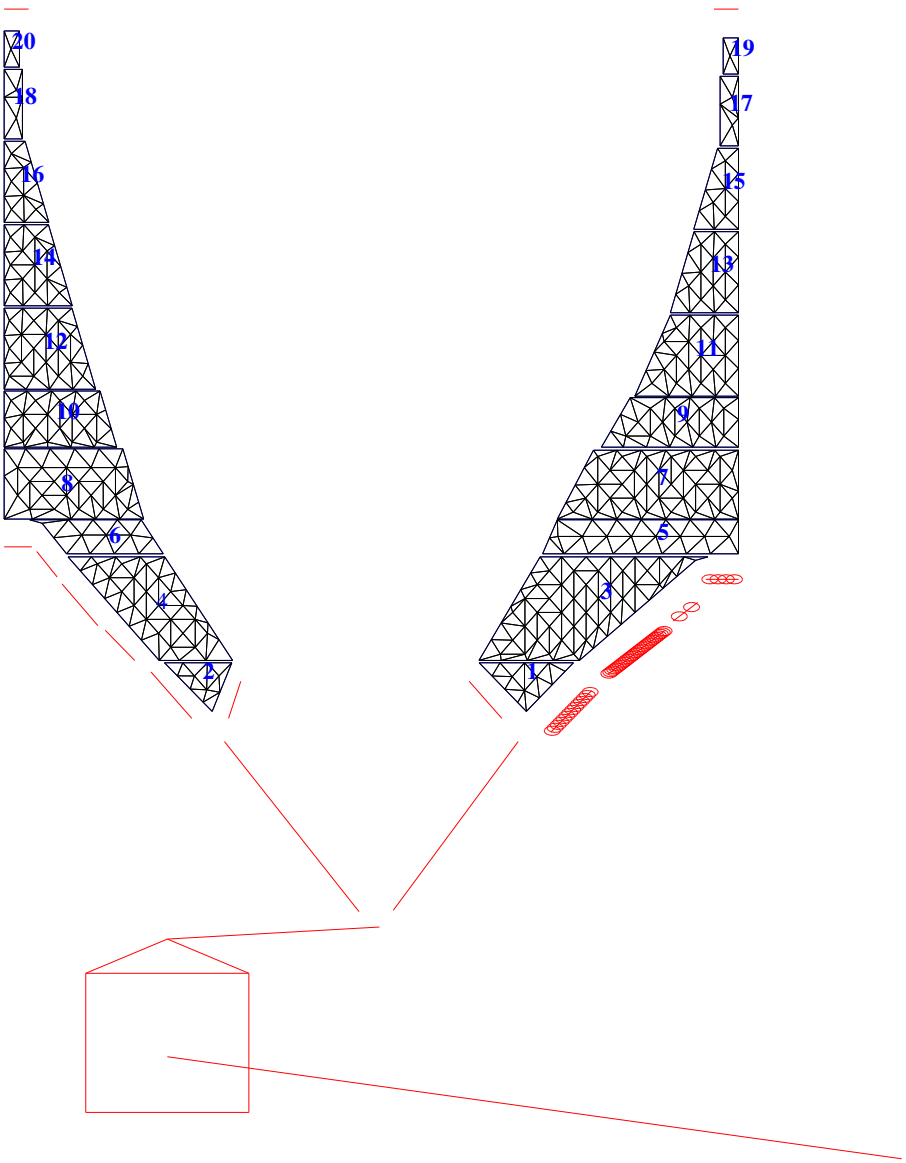


Figure IV.6 : Disposition du chalut de fond (fig. IV.2) montrant les éléments finis dans les pièces numérotées. Le pas de discrétisation est de 2 m. Dans la figure suivante (fig. IV.7), nous détaillons le partitionnement de la pièce # 3 en éléments et dans la figure IV.8 la connectivité entre les pièces # 1 et 3 et de l'assemblage avec les câbles qui les entourent.

IV.2.2.2 Taille de modification

Le paramètre (PR) définit le pas de modification (Δ) expliqué dans le chapitre III. Différentes valeurs de PR sont utilisées dans notre étude. Ce paramètre est utilisé pour

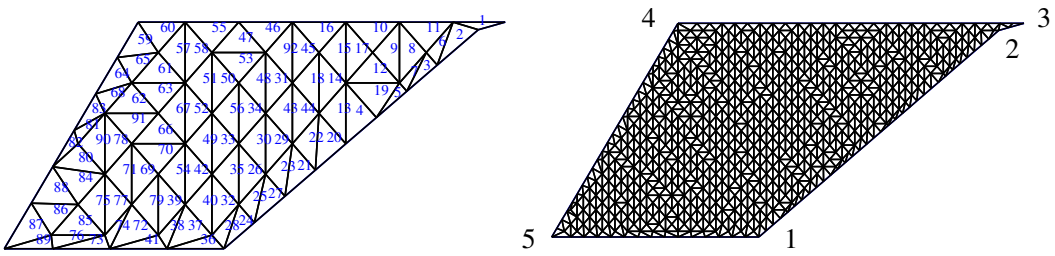


FIGURE IV.7 : Partitionnement de la pièce # 3 en éléments finis avec le système de numérotation des éléments. La taille de discrétisation de maillage est 2 m sur la gauche et 0,5 m sur la droite où les 5 sommets sont affichés.

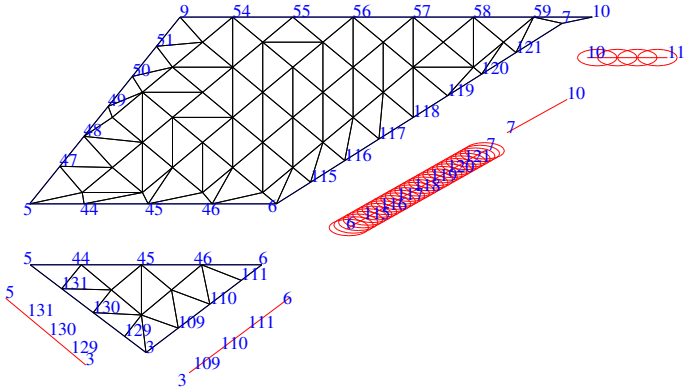


FIGURE IV.8 : Affichage des pièces # 1 et 3 montrant la connectivité des éléments finis et l'assemblage des câbles environnants.

la modification du nombre de mailles des pièces du filet dans le cas d'application de l'optimisation sur les pièces du filet, et la modification de la longueur des câbles dans le cas d'application de l'optimisation sur les câbles du chalut.

IV.2.2.3 Paramètre de Newton-Raphson

Le paramètre de Newton-Raphson (PNR) est la valeur du critère de convergence du calcul élément fini. La position d'équilibre est considérée comme atteinte lorsque la moyenne des efforts sur les nœuds est inférieure à ce paramètre. Par exemple lorsque la taille de la discrétisation est de 2 m PNR est égal à 0,1 N alors qu'il est de 0,01 N lorsque la taille de la discrétisation est de 0,5 m.

IV.2.3 Contraintes

L'optimisation est exécutée avec un certain nombre de contraintes détaillées ci-dessous. Lorsque la modification du chalut ne respecte pas ces contraintes, elle est rejetée et le processus d'optimisation se poursuit.

IV.2.3.1 Procédure d'exclusion de certaines pièces du filet (cas d'optimisation par pièces du filet d'un chalut)

Parfois des pièces du filet sont exclues du processus d'optimisation, principalement les pièces arrières. La décision d'exclusion de ces pièces du processus d'optimisation est prise sur la base de deux critères : le premier, issu de l'évaluation détaillée des valeurs de la traînée de chaque pièce du filet, montre que les pièces situées dans la rallonge et dans le cul du chalut ont une traînée faible par rapport aux pièces de la gueule. Le second critère est que certaines pièces situées dans la gueule, même si ces pièces ont une faible traînée, ont une forte influence sur la géométrie globale du chalut et à ce titre sont conservées.

Par conséquent des économies importantes sont réalisées pour le temps de simulation.

IV.2.3.2 Corde de dos couvrant le bourrelet (cas d'un chalut de fond)

Pour chaque combinaison de variables, certaines précautions doivent être prises. Une fois la forme du chalut de fond calculée, le bourrelet (câbles 5, 7, 9, 11 et 12 de part et d'autre dans la figure IV.9) doit être largement derrière la corde de dos (câbles 4, 6, 8 et 10 de part et d'autre dans la figure IV.9) afin d'éviter l'échappement des poissons par dessus la corde de dos (fig. IV.10). La distance de couverture (d) est la longueur horizontale

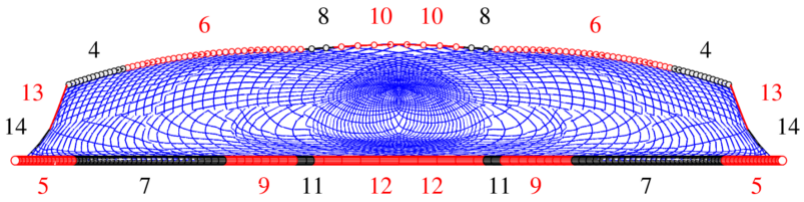


Figure IV.9 : Vue de face de la forme du chalut de fond affichant les numéros des câbles, sans les câbles du grément et sans les panneaux (voir fig. IV.2). Le schéma de numérotation est symétrique par rapport à un plan vertical situé au centre du chalut. Seul un fil sur 10 est tracé. Le plan avec les numéros des câbles est dans la figure IV.13.

entre le bourrelet et la corde de dos. Dans le processus d'optimisation, cette contrainte géométrique est toujours vérifiée par le contrôle de la distance minimale de couverture. Dans notre cas cette distance est de 3,5 m et a été évaluée sur la simulation du chalut référence.

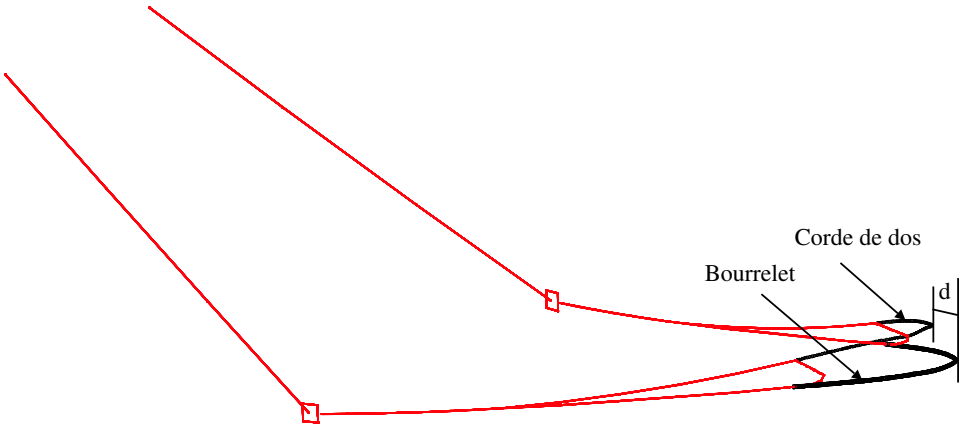


FIGURE IV.10 : Partie du chalut (le filet a été caché). Les funes sont sur la gauche, les panneaux sont les carrés. le bourrelet est sur toute sa longueur derrière la corde de dos, à une distance d.

IV.2.3.3 Contact avec le fond de la mer (cas d'un chalut de fond)

Pour certaines combinaisons de variables, le bourrelet peut perdre le contact avec le fond de la mer et donc la capturabilité pourrait être réduite. Pour chaque combinaison, le contact est vérifié. Le contact est considéré comme perdu lorsque la distance entre la base du bourrelet et le fond de la mer est supérieure au rayon du bourrelet.

IV.3 Méthodes adaptées

Dans cette partie nous allons décrire les méthodes d'optimisation appliquées au cas d'un chalut réel. Nous commençons par la méthode de recherche aléatoire (**R**andom **S**earch) dans le but de la comparer aux méthodes suivantes. Deuxièmement, nous allons décrire l'outil de recherche successive par paramètres (**S**uccessive **O**ptimization **T**ool) pour l'optimisation du plan des pièces du filet. Troisièmement, nous ferons la description de la technique d'optimisation de raffinement séquentiel (**S**equential **R**efinement **T**echnique) appliquée au filet. Enfin, nous terminerons par l'application de SOT dans le but d'optimiser les longueurs des câbles du chalut.

IV.3.1 RS (Random Search)

Nous avons décrit le principe de la méthode d'optimisation aléatoire au troisième chapitre mais uniquement avec deux variables. Dans le cas d'un chalut entier, nous avons

implémenté la même technique : les modifications sont appliquées à tous les paramètres en même temps. L'amplitude de la modification est choisie aléatoirement entre 0 et la valeur maximale permise.

Par exemple, pour une pièce de filet ayant une taille maximale de 120 mailles verticalement et 200 mailles horizontalement. Une modification de 5% de ce filet entraînera un déplacement de chaque nœud compris entre -6 et +6 mailles verticalement et entre -10 et +10 mailles horizontalement (le signe - signifie une suppression de mailles et le signe + signifie un ajout de mailles). Il y aura $2n$ modifications aléatoires : 2 pour chaque nœud (1 verticalement et 1 horizontalement), où n représente le nombre de nœuds de cette pièce de filet.

La figure IV.11 représente un plan simple à deux pièces. Le vecteur correspondant U_0 est formé par les coordonnées des nœuds de ces deux pièces.

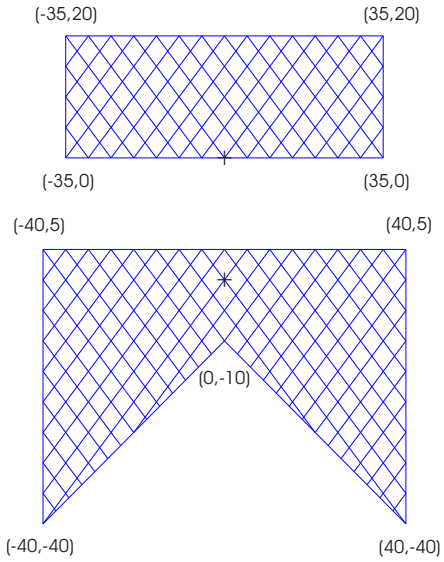


Figure IV.11 : Disposition d'un plan simple avec 2 pièces de filet ayant 9 nœuds. Les coordonnées en nombre de mailles de la première pièce (bas) et de la seconde sont notées. Ce plan est quantifiée par le vecteur de coordonnées en nombre de mailles U_0 = [-40 -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0]. Les premiers nœuds de ces deux pièces sont en bas à gauche et la numérotation est dans le sens des aiguilles d'une montre. Seulement un fil sur cinq est tracé. Les origines des coordonnées en nombre de mailles sont mises en évidence.

U_0 = [-40 -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0].

Ce vecteur des variables commence par la composante horizontale en nombre de mailles du premier nœud de la première pièce du filet, suivie par la composante verticale en nombre de mailles du même nœud, suivi par le deuxième nœud de la première pièce

jusqu'au dernier nœud de la même pièce suivie par la deuxième et ainsi de suite jusqu'à atteindre la dernière pièce de filet. La taille de ce vecteur des variables est le nombre de nœuds multiplié par 2 (le nombre de coordonnées en nombre de mailles de chaque nœud).

Dans cet exemple, nous choisissons une étape de modification arbitraire de $random(6)$ mailles pour la première pièce de filet (bas) et $random(9)$ pour la seconde (haut), où la fonction $random(m)$ rend un nombre entier aléatoire entre $-m$ et m.

Cette modification est ajoutée au vecteur de référence, ce qui donne :

$$U_1 = \begin{bmatrix} -40 + random(6) \\ -40 + random(6) \\ . \\ . \\ 0 + random(9) \end{bmatrix}$$

Ce vecteur variable est donc modifié, étape par étape jusqu'à un certain critère d'arrêt, dans notre cas c'est le temps de calcul correspondant à un nombre d'itérations (N_{max}). Toutes les composantes de U sont modifiées à chaque itération du calcul.

Chaque vecteur représente un plan de chalut. Pour chaque vecteur, la fonction objectif $\mathcal{F}$ est calculée. L'évaluation $\mathcal{F}(U_0)$ de la fonction objectif correspond au vecteur référence (U_0).

Nommons $U_{N_{max}}$ le vecteur obtenu à la fin du processus d'optimisation. Dans ce cas, le nombre d'évaluations de la fonction objectif est égal à N_{max}. De ces N_{max} évaluations de la fonction objectif, la minimale est extraite et correspond au vecteur U_k obtenu par l'algorithme 6.

Le plan final optimisé du filet correspond au vecteur U_k.

Algorithme 6 Méthode de recherche aléatoire (RS) dans le cas de la figure IV.11.

Entrées: $U_0 = (u_l^0)_{1 \leq l \leq 18} \in \mathbb{R}^{18}, N_{max} \in \mathbb{N}^*$

1: $k \leftarrow 0, i \leftarrow 1$
2: **tantque** $i \leq N_{max}$ **faire**
3: $U_i \leftarrow \begin{bmatrix} u_1^k + random(6) \\ u_2^k + random(6) \\ . \\ . \\ u_{18}^k + random(9) \end{bmatrix}$
4: **si** $\mathcal{F}(U_i) < \mathcal{F}(U_k)$ **alors**
5: $k \leftarrow i$
6: **finsi**
7: $i \leftarrow i + 1$
8: **fin tantque**
9: **retourner** U_k

Dans le cas de la figure IV.1, le vecteur a 186 composantes puisque le filet du chalut est formé de 93 nœuds.

IV.3.2 SOT (Successive Optimisation Tool) appliquée aux pièces du filet

IV.3.2.1 Description de la méthode d'optimisation

Pour réaliser cette optimisation, nous sommes partis des valeurs de référence et avons effectué les opérations suivantes :
i) imposer de légères modifications aux variables séparément (une par une),
ii) calculer la fonction objectif après chaque modification,
iii) sélectionner la modification de variable conduisant à la meilleure fonction objectif tout en respectant les contraintes imposées.

Ces trois étapes sont ré-exécutées à nouveau à partir des nouvelles variables obtenues jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne soit constatée dans la fonction objectif.

L'efficacité de la méthode dépend fortement de la valeur de la modification des variables. Cette modification est un pourcentage de la taille, en nombre de mailles, de chaque pièce du filet. A titre d'exemple une modification (PR) de 4% d'une pièce de filet formée de cent mailles sera une modification (Δ_l) d'exactement quatre mailles (en + et en -).

La méthode d'optimisation peut être décrite par le pseudo-code (Alg. 7) suivant.

La procédure d'optimisation que nous avons appelé SOT (Successive Optimization Tool) est amplement décrite dans les références [Prid, Prie]. Néanmoins, la fonction objectif utilisée dans le cas des chaluts de fond était dans un premier temps la traînée sur la largeur balayée du chalut. En utilisant cette approche pour un chalut de fond comme dans la référence [Kha], nous avons constaté que l'ouverture verticale du chalut optimisé était trop faible ce qui entraîne une diminution potentielle de la quantité de poisson pêchée. Cela nous a incité à modifier la méthode d'optimisation SOT en travaillant sur une autre fonction objectif, donnée par le rapport de la traînée sur la surface effective balayée. Cette dernière est donnée par l'intersection de la surface de l'ouverture du chalut avec le volume dans lequel la population de poissons est distribuée.

Algorithme 7 Successive Optimization Tool (SOT) dans le cas de la figure IV.11.

Entrées: $U_0 = (u_l^0)_{1 \leq l \leq n} \in \mathbb{R}^n, PR \in \mathbb{N}^*$

$M \leftarrow U_0$
$r \leftarrow 1$
tantque $r \neq 0$ **faire**
  $r \leftarrow 0$
  $k \leftarrow 0$
  $indice \leftarrow 0$
  pour $l = 1 \rightarrow n$ **faire**
    $k \leftarrow k + 1$
    $U_k \leftarrow U_0$
    $u_l^k \leftarrow u_l^0 + \Delta_l$
    si $\mathcal{F}(U_k) < \mathcal{F}(M)$ **alors**
      $M \leftarrow U_k$
      $indice \leftarrow k$
      $r \leftarrow 1$
    finsi
    $k \leftarrow k + 1$
    $U_k \leftarrow U_0$
    $u_l^k \leftarrow u_l^0 - \Delta_l$
    si $\mathcal{F}(U_k) < \mathcal{F}(M)$ **alors**
      $M \leftarrow U_k$
      $indice \leftarrow k$
      $r \leftarrow 1$
    finsi
  fin pour
  $U_0 \leftarrow M$
fin tantque
retourner U_0

IV.3.2.2 Exemple détaillé illustrant le processus d'optimisation

Dans la suite, nous détaillons une étape de la méthode d'optimisation SOT, à partir de l'exemple du plan simple composé de 2 pièces de filet (fig. IV.11) et quantifiée par le vecteur U_0.

Ce vecteur des variables est modifié, étape par étape, jusqu'à ce que la meilleure solution minimisant la fonction objectif soit trouvée.

Les modifications en question sont introduites dans les composantes du vecteur des variables une par une, laissant les autres composantes inchangées et égales à leur valeurs de départ. En outre, les modifications sont appliquées avec des signes opposés successivement sur les couples de vecteurs. Afin d'illustrer la méthode, des étapes de modification arbitraire de 6 mailles pour la première pièce de filet (en bas) et 9 pour la seconde sont présentées ci dessous.

Les 36 vecteurs variables successifs (la variable modifiée est en gras)sont :

U_1 = [**-34** -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0] (voir fig. IV.12).

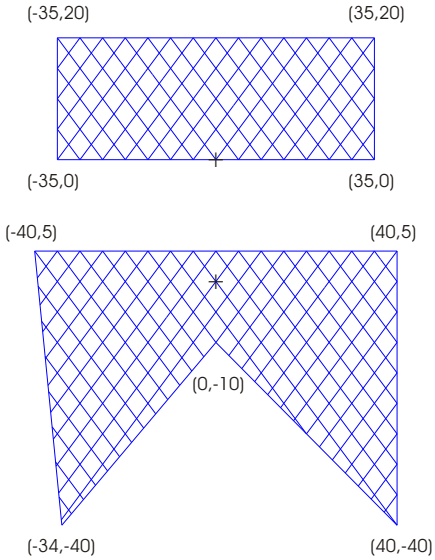


Figure IV.12 : Apparence du plan après une modification du premier nœud en terme du nombre de mailles horizontales le long de la direction positive. Le plan est quantifié par U_1 = [-34 -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0].

U_2 = [**-46** -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0].

U_3 = [-40 **-34** -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0].

U_4 = [-40 **-46** -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 0].

.

.

U_{34} = [-40 -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 **26** 0].

U_{35} = [-40 -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 **9**].

U_{36} = [-40 -40 -40 5 40 5 40 -40 0 -10 -35 0 -35 20 35 20 35 **-9**].

U_1 et U_2 diffèrent de U_0 uniquement par la première composante, U_3 et U_4 en diffèrent par la seconde jusqu'aux vecteurs U_{35} et U_{36} pour lesquels la dernière composante est différente.

Pour chaque vecteur la forme du chalut est calculée ainsi que la fonction objectif. Cela signifie qu'on obtient 37 évaluations de la fonction objectif : $\mathcal{F}(U_0)$ pour la référence (U_0), tandis que les 36 autres évaluations de la fonction objectif correspondent aux modifications (U_1 à U_{36}). De ces 36 évaluations, le minimum est extrait et correspond au U_n. Si $\mathcal{F}(U_n) < \mathcal{F}(U_0)$, U_n est conservé et utilisé comme la nouvelle référence U_0, avec $\mathcal{F}$ la fonction objectif. Le processus redémarre à partir de cette référence : 36 modifications sont appliquées et la fonction objectif est évaluée jusqu'à $\mathcal{F}(U_n) \geq \mathcal{F}(U_0), \quad \forall n \in [1,36]$.

Le plan final optimisé correspond au dernier vecteur U_0.

IV.3.3 SRT (Sequential Refinement Technique)

IV.3.3.1 Description de la méthode d'optimisation

Une technique d'optimisation numérique basée sur l'algorithme de recherche par coordonnées [Huy] a été appliquée à notre cas. Cette nouvelle technique d'optimisation (SRT) est basée sur une technique de raffinement séquentielle : les modifications se réduisent étape par étape. Ceci est une amélioration de ce que nous avons développé précédemment comme une technique d'optimisation successive (SOT) fondée sur une modification fixe.

En d'autres termes, la méthode SOT se réfère toujours à un chalut de référence quelle que soit la modification, par contre la méthode SRT se réfère, pour une modification au chalut optimisé avec la modification précédente.

Dans la méthode précédente nommée SOT et pour un certain pourcentage de modification, la modification reste constante le long du processus d'optimisation. Dans la méthode SRT, la modification se raffine le long du processus : par exemple l'optimisation commence par une modification de 16% et quand il n'y a plus d'amélioration avec cette modification, l'optimisation passe à 8% et ainsi de suite. En fait, l'utilisateur choisit le pourcentage de modification au début, le pourcentage d'arrêt et le coefficient de baisse : par exemple un début à 16%, une fin à 1% et une baisse à 0,5. Un important pourcentage de modification devrait être entrepris au début dans certains cas afin d'éviter de se retrouver dans un minimum local.

Dans l'exemple IV.3.2.2, nous avons détaillé un seul cycle de la méthode d'optimisation SOT, et plus loin dans le chapitre suivant nous allons fournir un exemple complet d'application de la méthode SRT au chalut de fond.

IV.3.3.2 Différence de méthodologie entre les deux méthodes SOT et SRT

Le tableau IV.2 montre en partie la différence entre les deux méthodes d'optimisation SOT et SRT avec un pourcentage maximal de modification de 64%. Ce tableau montre bien que SOT fait une partie de SRT. Ch_0 représente le chalut référence et Ch_i pour $i > 0$ représente le chalut obtenu par l'application de la méthode SOT sur le chalut Ch_{i-1}. Le chalut optimisé par SOT est le meilleur chalut obtenu en terme d'objectif parmi les Ch_i

$1 \leq i \leq 7$. Par contre le chalut optimisé par SRT est le dernier chalut obtenu, c'est à dire le chalut Ch_7.

Successive Optimization Tool	**Sequential Refinement Technique**
1. SOT sur Ch_0 avec 64% $\Rightarrow Ch_1$;	1. SOT sur Ch_0 avec 64% $\Rightarrow Ch_1$;
2. SOT sur Ch_0 avec 32% $\Rightarrow Ch_2$;	2. SOT sur Ch_1 avec 32% $\Rightarrow Ch_2$;
3. SOT sur Ch_0 avec 16% $\Rightarrow Ch_3$;	3. SOT sur Ch_2 avec 16% $\Rightarrow Ch_3$;
4. SOT sur Ch_0 avec 8% $\Rightarrow Ch_4$;	4. SOT sur Ch_3 avec 8% $\Rightarrow Ch_4$;
5. SOT sur Ch_0 avec 4% $\Rightarrow Ch_5$;	5. SOT sur Ch_4 avec 4% $\Rightarrow Ch_5$;
6. SOT sur Ch_0 avec 2% $\Rightarrow Ch_6$;	6. SOT sur Ch_5 avec 2% $\Rightarrow Ch_6$;
7. SOT sur Ch_0 avec 1% $\Rightarrow Ch_7$.	7. SOT sur Ch_6 avec 1% $\Rightarrow Ch_7$.

Tableau IV.2 : Différence entre les deux méthodes d'optimisation SOT et SRT pour le même chalut de référence et les mêmes pourcentages de modification.

IV.3.4 SOT appliquée aux câbles d'un chalut

L'optimisation est basée sur trois points principaux comme déjà décrit précédemment : la fonction objectif, les variables et les contraintes.

Les variables sont ici les longueurs des câbles. Elles sont représentées par un vecteur qui contient toutes les variables représentant chacune une longueur de câble. La taille de ce vecteur (nb) est le nombre de câbles que l'utilisateur accepte de modifier. En effet l'utilisateur impose que certains câbles restent inchangés, dans ce cas ils ne participent pas à l'optimisation.

Pour exécuter l'optimisation, nous devons d'abord initialiser le vecteur des variables c'est à dire toutes les longueurs de câble à leurs valeurs du chalut de référence (fig. IV.2).

L'optimisation se fait conformément à l'algorithme 7 (cf. § IV.3.2), mais appliquée dans le cas de la figure IV.13. En d'autres termes, effectuer une telle optimisation exige que nous commencions à partir des valeurs de référence et que nous effectuions les opérations suivantes :

i) imposer une modification aux variables séparément (une par une),

ii) évaluer la fonction objectif après chaque modification,

iii) sélectionner la variable générant la meilleure optimisation tout en respectant les contraintes imposées.

Ces trois étapes sont réalisées à nouveau à partir de nouvelles valeurs des variables jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne soit constatée dans la fonction objectif.

L'efficacité de la méthode d'optimisation dépend du nombre des variables. Pour un nombre de variables assez important le temps de calcul devient élevé et il n'y a pas de garantie d'aboutir à la solution optimale. Dans la suite, nous allons représenter un exemple détaillé illustrant en détail les variables de décision et le processus d'optimisation.

IV.3.4.1 Procédure d'optimisation

Dans ce qui suit, nous fournissons des détails d'un cycle de SOT unique. A partir du plan affiché sur la figure IV.13, nous introduisons le vecteur suivant dont les 15 composantes sont les longueurs (en m) des 15 câbles libres :

U_0 = [36,6 59,4 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 201].

La composante n de ce vecteur correspond à la longueur du câble # n. Par exemple, la première valeur (36,6) est la longueur du câble # 1 (derrière le panneau) dans la figure IV.13.

Ce vecteur (U_0) est modifié paramètre par paramètre jusqu'à ce que la meilleure solution soit trouvée. Les 30 vecteurs successifs (la variable modifiée est en gras) se présentent de la façon suivante pour une modification de 2% :

U_1 = [**36,97** 59,4 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 201].

U_2 = [**36,23** 59,4 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 201].

U_3 = [36,6 **58,99** 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 201].

U_4 = [36,6 **58,81** 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 201].

.

.

U_{28} = [36,6 59,4 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 **7,23** 201].

U_{29} = [36,6 59,4 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 **203,01**].

U_{30} = [36,6 59,4 59,4 7 7,8 14,9 14,35 1,1 4,94 2,25 0,79 3,12 7,7 7,3 **198,99**].

Dans le tableau IV.3 nous présentons les résultats des sept premiers et les sept derniers cycles de la procédure d'optimisation. Les vecteurs ci-dessus correspondent simplement à la première ligne du tableau IV.3 qui montre que la modification du câble # 2 est responsable de la plus forte minimisation de la fonction objectif.

Pour chaque vecteur, la forme du chalut est calculée ainsi que la fonction objectif. Cela signifie 31 évaluations de la fonction objectif : $\mathcal{F}(\mathrm{U}_0)$ pour la référence (U_0) tandis

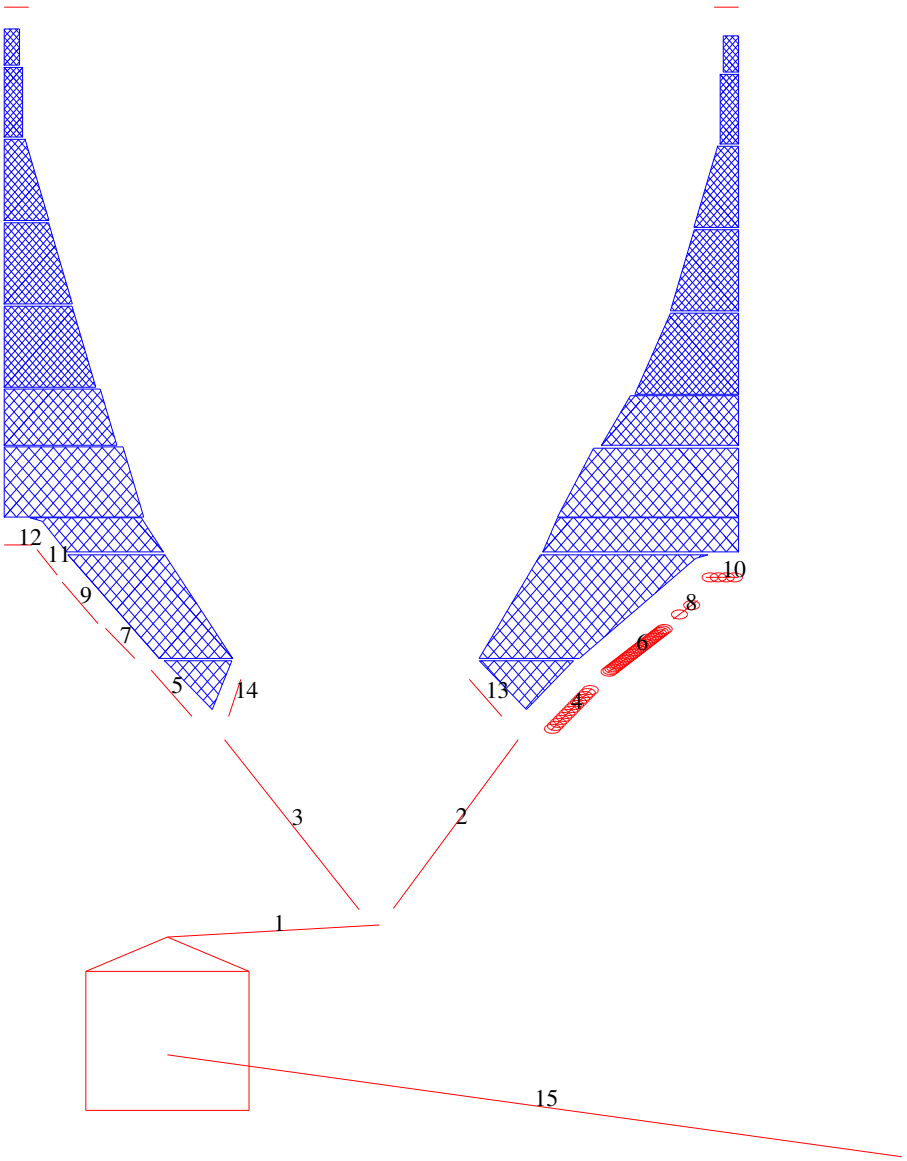


Figure IV.13 : Disposition du chalut référence affichant les numéros des câbles. En raison de la symétrie du chalut uniquement la moitié de pièces du filet et des câbles est présentée. Les flotteurs sur la corde de dos sont affichés ainsi que les panneaux (carrés). La fune est le câble # 15, le bras est # 1, l'entremise du dessus est # 2 et l'entremise du dessous est # 3. En raison du grand nombre de fils du filet seulement 1 fil sur 10 est tracé.

que les 30 évaluations restantes correspondent aux modifications (U_1 à U_{30}). De ces 30 évaluations, le minimum est extrait et correspond à U_n. Si $\mathcal{F}(U_n) < \mathcal{F}(U_0)$, U_n est le plan conservé et utilisé comme nouvelle référence (U_0). Le processus se poursuit à partir de cette référence jusqu'à $\mathcal{F}(U_n) \geq \mathcal{F}(U_0), \quad \forall n \in [1,30]$. Le plan final optimisé correspond au dernier U_0.

Cycle #	Câble modifié #	Modification (m)	Objectif (N/m^2)	Réduction par cycle (N/m^2)
Référence			542,28	
1	2	+0,59	427,03	115,25
2	4	+0,07	425,15	1,88
3	4	+0,07	422,18	2,97
4	4	+0,07	421,4	0,78
5	7	+0,14	420,58	0,82
6	6	+0,15	417,76	2,82
7	12	-0,03	417,08	0,68
. . .				
93	8	-0,01	400,52	0,06
94	15	+2,01	400,39	0,13
95	8	-0,01	400,36	0,03
96	8	-0,01	400,25	0,11
97	8	-0,01	400,08	0,17
98	15	+2,01	399,77	0,31
99	11	-0,01	399,76	0,01

Tableau IV.3 : Illustration de la procédure d'optimisation selon le cycle d'exécution et le meilleur câble avec les résultats correspondants. L'optimisation est initialisée avec une variable référence conduisant à une valeur de la fonction objectif égale à 542.28 N/m^2 (première ligne). Ce tableau montre que le gain est principalement obtenu au cours des premiers cycles.

IV.4 Principe d'homothétie

Dans le cas d'optimisation du plan d'un chalut pélagique, on observe parfois que l'optimisation augmente considérablement la surface balayée du chalut (surface de la gueule). Pour éviter l'augmentation de la capacité de pêche, en raison de règles de gestion des pêcheries, le chalut optimisé est transformé par une homothétie afin d'obtenir une surface balayée proche de celle du chalut référence. Une homothétie de $n\%$ implique :
i) la réduction du nombre de mailles de toutes les pièces du filet de $n\%$ (horizontalement et verticalement),
ii) la réduction de la longueur et du diamètre des câbles utilisés dans le chalut de $n\%$,
iii) la réduction de la taille des panneaux métalliques de $n\%$ horizontalement et verticalement.

Dans ces conditions on peut s'attendre à une diminution des forces de traînée de $(n\%)^2$ et une diminution des surfaces constitutives du chalut de $(n\%)^2$. Dans cette hypothèse la surface balayée est bien réduite de $(n\%)^2$ mais dans le même temps l'objectif reste constant $[\frac{(n\%)^2}{(n\%)^2}]$.

IV.5 Économie potentielle en énergie et/ou en temps

Pour chacun des chaluts, les économies potentielles sont évalués sous les hypothèses suivantes :

1. La quantité de poisson pêché par an par le chalut optimisé doit rester identique à celle obtenue avec le chalut de référence.
2. L'efficacité combinée du moteur et de l'hélice est égal à 10%, l'énergie par litre de carburant équivaut à 36 MJ/l et le coût de carburant est égale à 0,6 €/l. Notez que ces valeurs sont considérées comme acceptables pour l'année 2012.
3. La durée journalière moyenne du chalutage est de 21 h et 36 minutes pendant 260 jours. Cette durée est calculée à partir d'une marée classique : 3 h de chalutage pour 20 minutes de virage et de filage pour 36 traits sur 5 jours.

Chapitre V

Résultats

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des méthodes d'optimisations SOT, RS et SRT décrites dans le chapitre précédent sur les deux types de chalut : pélagique et de fond. Nous avons utilisés ces méthodes pour minimiser la fonction objectif avec ou sans prise en compte de la distribution de poisson. Les trois cas de distribution ont été testées afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur le processus d'optimisation dans le cas de chalut de fond.

Le but initial de cette thèse est de minimiser la consommation de fuel par kg de poisson pêché. Ainsi nous avons considéré comme fonction objectif la traînée sur la surface balayée par la gueule du chalut. Il est évident que la consommation de carburant est reliée à la traînée tandis que la capturabilité est plutôt reliée à la surface balayée par la gueule du filet. Ainsi nous avons entrepris d'optimiser le nombre de mailles des pièces du filet car nous savions que le filet est principalement responsable de la traînée. Durant cette optimisation sur les pièces de filet, nous avons constaté que la traînée demeurait quasiment constante alors que la surface balayée augmentait, ce qui signifie que le gain obtenu venait principalement de l'augmentation de la surface balayée. Or, la surface en question, dépend aussi de la disposition des câbles qui la soustendent, ce qui nous a amené finalement à optimiser les longueurs des câbles du chalut. Cette dernière solution semble particulièrement attrayante aux pêcheurs qui pourraient ainsi tenir compte plus facilement des modifications proposées par l'optimisation.

V.1 Application de SOT aux chaluts pélagiques

Dans cette partie les résultats des deux méthodes d'optimisation SOT et RS sur un chalut pélagique sont présentés.

Le chalut est décrit dans le chapitre IV.1.1. Dans ce cas la fonction objectif est le ratio entre la traînée et la surface balayée. La notion de distribution de poisson n'a pas de sens dans ce cas, le chalut étant positionné verticalement à partir d'informations sondeurs sur la répartition de poissons. Nous avons analysé une situation où la vitesse de chalutage est égale à 2 m/s. La traînée calculée est 67174 N et la surface balayée est 200 m^2, ce qui donne le rapport de la traînée sur la surface balayée égal à 336 N/m^2. Les valeurs constituent la situation de référence. Le plan du chalut référence est montrée dans la figure IV.1 et la forme est représentée dans la figure V.1.

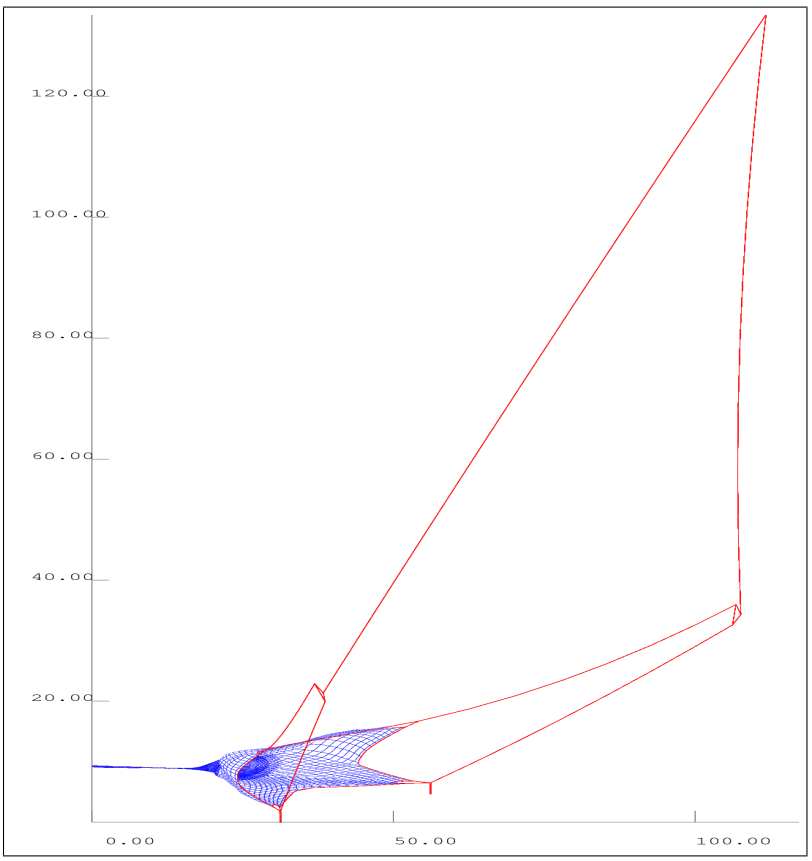


Figure V.1 : Forme du chalut référence. Seulement un fil sur 5 est tracé.

V.1.1 Comparaison entre les deux méthodes SOT et RS

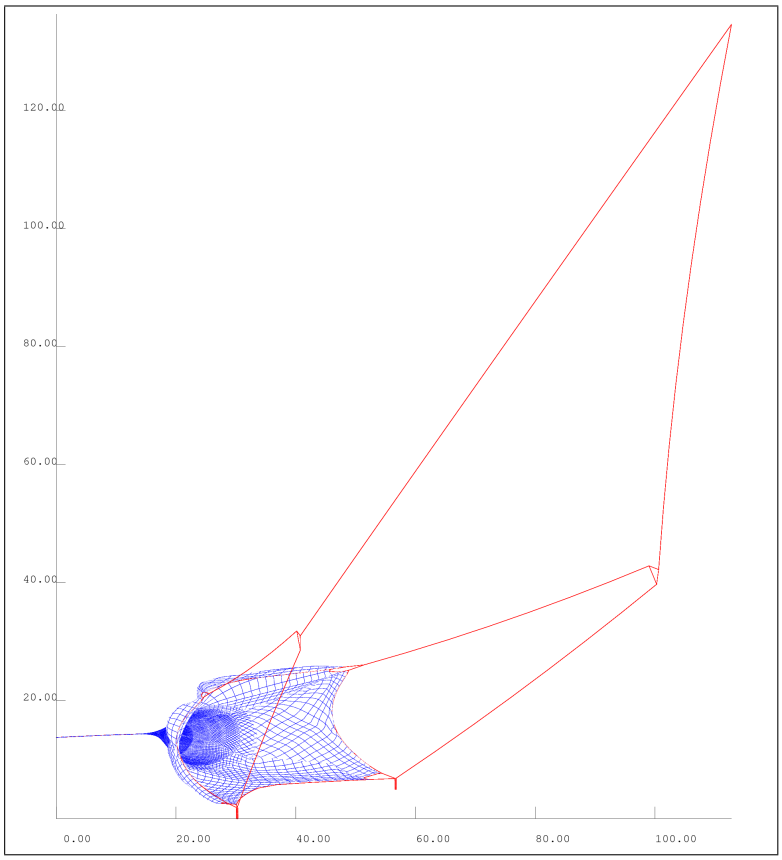
Les principaux résultats du processus d'optimisation avec les deux méthodes sont affichés dans le tableau V.1. Ce tableau montre que les meilleurs résultats sont obtenus (réduction de 54%) avec la première méthode (SOT) et avec une modification de 8%. La forme du chalut optimisé est donnée sur la figure V.2(a) et son plan est sur la figure V.3(a).

Ce tableau montre également que les meilleurs résultats avec la deuxième méthode (RS) sont obtenus (réduction de 33%) avec une modification maximale de 16%. La forme du chalut est donnée sur la figure V.2(b) et le plan est à la figure V.3(b).

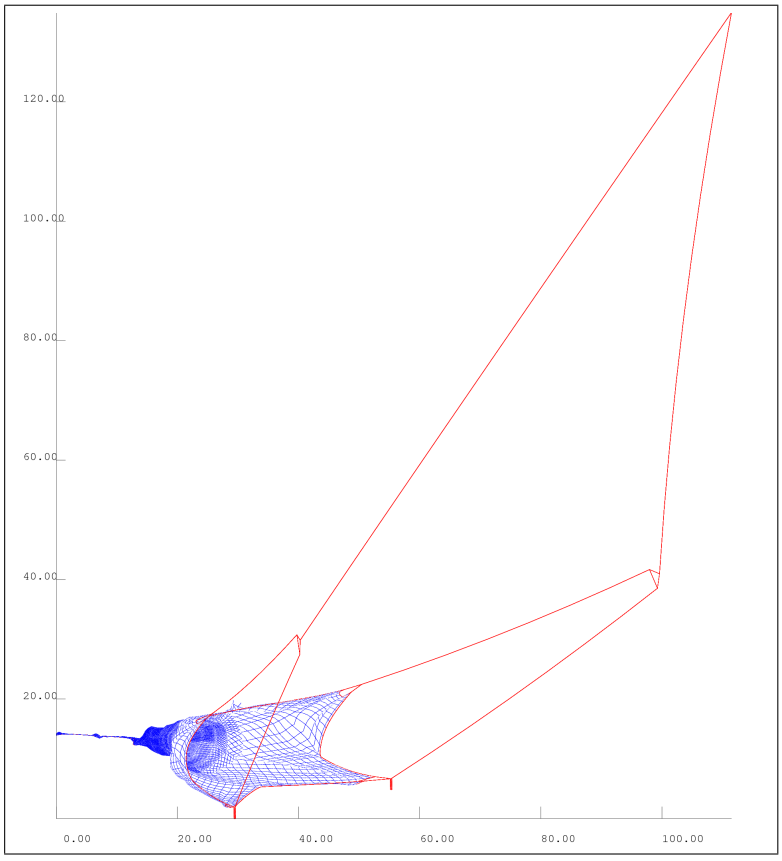
Méthode	PR	Réduction (%)	Nb. chaluts	Temps (h)
SOT	1%	48	25752	27
	2%	44	10656	12
	4%	51	15540	30
	8%	**54**	**9324**	**16**
	16%	54	9206	26
	32%	23	736	4
RS	1%	8	5850	17
	2%	14	5357	17
	4%	26	4079	17
	8%	19	2797	17
	16%	**33**	**2673**	**17**
	32%	0	3078	17

Tableau V.1 : Principaux résultats pour les deux méthodes d'optimisation (SOT et RS) avec des tailles de modification différentes (de 1% à 32%). Ces résultats sont les suivants : réduction de la traînée par la surface balayée relativement au chalut référence, le nombre de chaluts calculés et le temps de calcul. On peut noter que le critère d'arrêt de RS est le temps de calcul (17 h).

En terme d'objectif (la traînée sur la surface balayée) il est clair à partir du tableau V.1 que le meilleur résultat (réduction de 54%) est obtenu par la méthode SOT avec PR égal à 8% et à 16%. Nous retenons le résultat de PR 8% car il offre des modifications de plan plus faibles. Ce résultat est meilleur que celui obtenu par la deuxième méthode (RS, 33% à PR 16%). La forme du chalut obtenu par la méthode SOT (fig. V.2(a)) semble aussi meilleure que celle obtenue par la deuxième méthode (fig. V.2(b)), surtout dans la partie arrière du chalut, qui est plus cahotique avec la méthode RS (fig. V.2(b)). Ce point pourrait être expliqué par le fait que dans la méthode RS, tous les paramètres sont modifiés en même temps. Ce point est visible sur la figure V.3 : Le plan généré par la méthode RS (fig. V.3(b)) montre que les pièces de filet dans la partie arrière sont modifiées contrairement à la méthode SOT (fig. V.3(a)) où les pièces dans la partie arrière sont

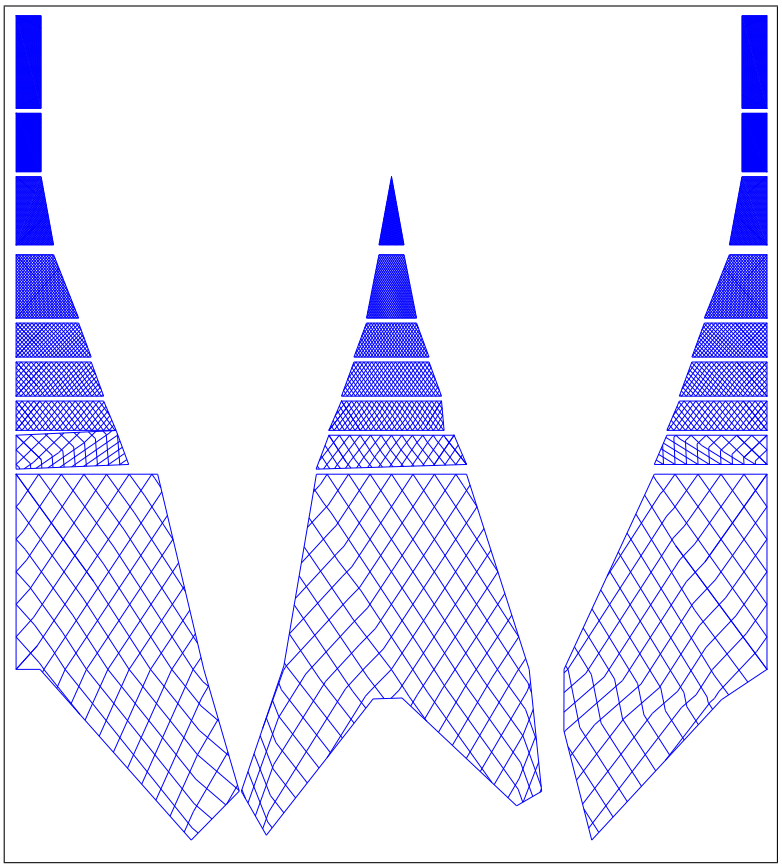


(a)

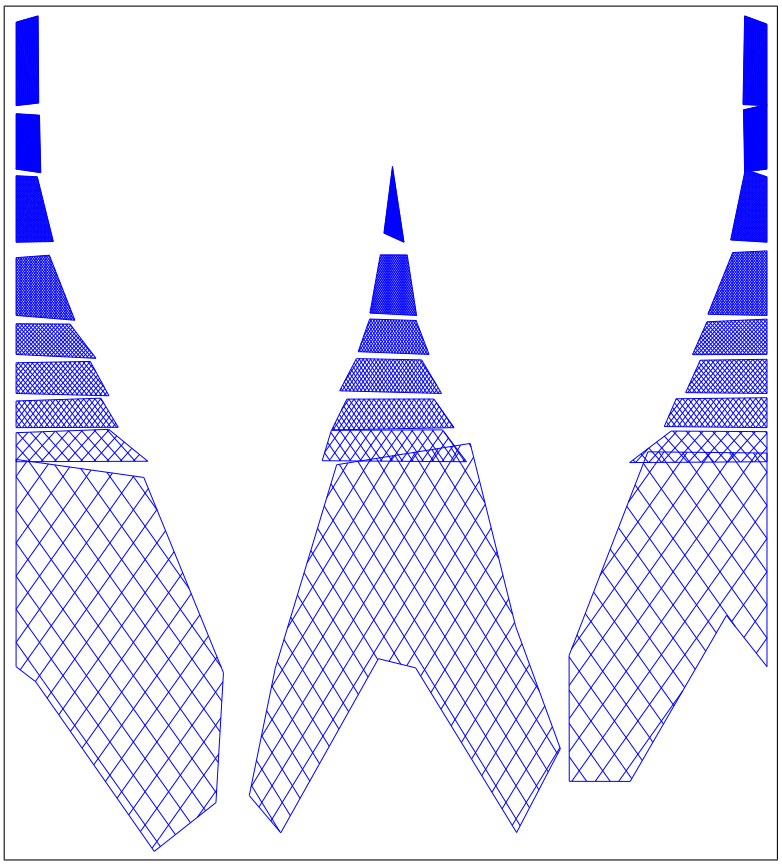


(b)

Figure V.2 : Formes des chaluts optimisés par la première méthode (SOT) (a) et la deuxième méthode (RS) (b). Seulement un fil sur 5 est tracé. Ces formes sont à comparer avec celle de référence de la figure V.1.



(a)



(b)

FIGURE V.3 : Plans des chaluts optimisés par la première méthode (SOT) (a) et la deuxième méthode (RS) (b). Un fil sur 5 est tracé. Ces plans sont à comparer à celui de référence de la figure IV.1.

identiques à la référence (fig. IV.1). Ce bon résultat pour la méthode SOT est en partie atténuée par le nombre de chaluts calculés requis par cette méthode (9324 modifications de chalut) et la durée de calcul (jusqu'à 30 h) qui est beaucoup plus longue que celle requise par la deuxième méthode (2673 modifications dans 17h). Il faut noter aussi que la méthode RS est affectée par le temps de calcul, ici limité à 17 h.

V.1.2 Application du principe de l'homothétie

Le tableau V.1 a montré la différence entre les deux méthodes SOT et RS en termes de réduction, du nombre de chaluts calculés et du temps de calcul. Le tableau V.2 précise la traînée et la surface balayée des chaluts optimisés par la méthode SOT et selon différentes valeurs de PR (de 1% jusqu'à 32%).

PR	Traînée (kN)	Surface balayée (m^2)	Réduction (%)
Chalut référence	**67**	**200**	**0**
1%	78	442	48
2%	74	393	44
4%	82	497	51
8%	**80**	**516**	**54**
16%	76	491	54
32%	71	273	23

Tableau V.2 : Principaux résultats de l'optimisation pour les tailles de modification de 1% à 32%. Ces résultats sont les suivants : La traînée du chalut, la surface balayée et la réduction de la traînée sur la surface balayée relativement au chalut référence pour le chalut pélagique.

Le tableau V.2 et la figure V.4 montrent que le processus d'optimisation augmente beaucoup la surface balayée (de 200 m^2 à 516 m^2 pour PR de 8%) au prix d'une légère augmentation de la traînée (de 67 à 80kN).

Pour les pêcheries surexploitées, cette augmentation de surface balayée peut être néfaste car elle génère une augmentation de l'effort de pêche, aussi faut-il réduire la surface balayée tout en conservant les gains de l'optimisation. La transformation du plan par homothétie est alors une solution.

La figure V.4 représente le chalut de référence (■) dans l'espace "Surface balayée","Objectif". Elle représente aussi l'ensemble des optimisations (PR de 1% à 32%) par les ○. Nous pouvons remarquer qu'ils suivent la même tendance : une diminution d'objectif s'accompagne d'une augmentation de surface balayée. L'optimisation que nous avons retenue (PR 8%) est celle qui donne l'objectif minimal et la surface balayée maxi-

male (○ le plus à droite). A partir de ce point, qui correspond aux figures V.2(a) et V.3(a), nous réalisons quatre homothéties. Les résultats de ces homothéties sont représentées par des + dans la figure V.4 et dans le tableau V.3. Nous rappelons que nous espérons conserver le même objectif. Nous pouvons voir sur la figure V.4 et dans le tableau V.3 que les homothéties dégradent légèrement l'objectif (passage d'une réduction de 54% à 39% pour une homothétie de 71%).

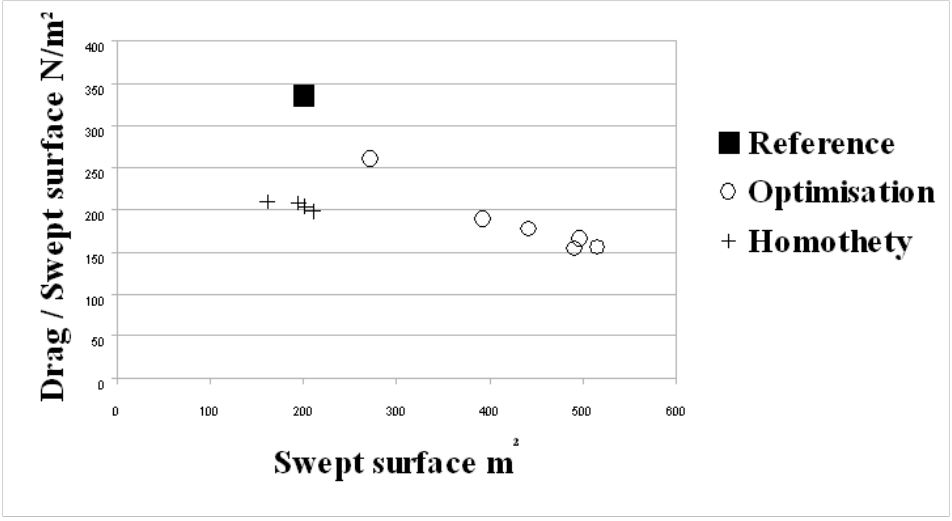


FIGURE V.4 : Objectif en fonction de la surface balayée pour le chalut de référence (■), les chaluts optimisés (○) et les chaluts homothétiquement transformés (+).

	Traînée (kN)	Surface balayée (m^2)	Réduction (%)
Chalut référence	**67**	**200**	**0**
65%	34	161	38
70%	40	194	38
71%	**41**	**202**	**39**
72%	42	211	41

Tableau V.3 : Principaux résultats de l'homothétie avec plusieurs rapports (de 65% à 72%). Ces résultats sont les suivants : La traînée du chalut, la surface balayée et la réduction de la traînée par la surface balayée relativement au chalut référence. Le rapport qui donne la plus proche surface balayée à la référence est de 71%.

La forme du chalut transformé par l'homothétie de 71% est sur la figure V.6, on peut constater que la forme est semblable à celle optimisée (figure V.2(a)) mais que la taille est plus petite. Le plan du chalut transformé par l'homothétie est sur la figure V.5. On peut voir que la forme des pièces est identique mais que le nombre de mailles est plus petit que sur le plan présenté sur la figure V.3(a).

La traînée est maintenant pour ce chalut homothétiquement transformé de 41 kN soit un gain de 39% relativement au chalut référence.

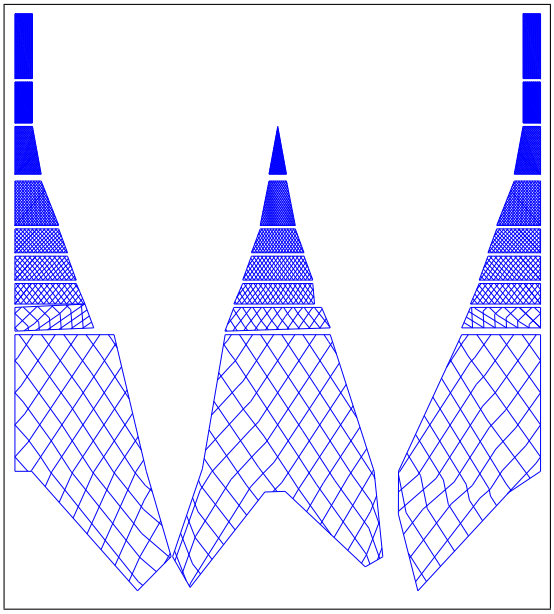


Figure V.5 : Plan du chalut optimisé et homothétiquement transformé (ratio de 71%). Seulement un fil sur cinq est tracé. Le nombre de mailles est de 71% du nombre de mailles du plan de la figure V.3(a).

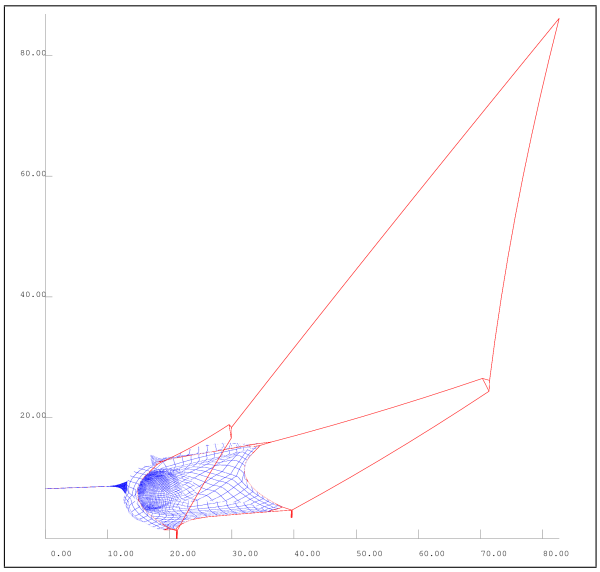


Figure V.6 : Forme du chalut optimisé homothétiquement transformé. Seulement un fil sur 5 est tracé. La forme est similaire à la figure V.2(a), mais avec une surface de la gueule égale à celle du chalut de référence (fig. V.1).

V.2 Application de SOT sur les pièces de filet du chalut de fond

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'optimisation par la méthode SOT appliquée sur deux chaluts de fond décrits précédemment dans le chapitre IV.1.2. Deux cas seront présentés. Dans le premier cas (§ V.2.1), nous cherchons à minimiser une fonction objectif égale à la traînée du chalut divisée par la largeur balayée sans prendre en compte la distribution de poisson. Dans le deuxième cas (§ V.2.2), nous essayons de minimiser la fonction objectif (D/S) avec prise en compte de la distribution de poisson.

V.2.1 Sans prise en compte la distribution de poisson

Le plan du filet du chalut, qui est utilisé sur un navire de recherche [Rep], est affiché dans la figure V.7, le gréement n'étant pas représenté. Les autres caractéristiques du chalut ont été décrits dans le chapitre IV.1.2. Dans cette étude, la largeur balayée lorsqu'elle est nécessaire au calcul d'objectif, a été choisie comme la distance entre les extrémités des ailes et non pas entre les panneaux. Plus précisément, la largeur balayée est définie ici comme la moyenne entre les pointes d'ailes supérieures (b sur fig. V.9) et les pointes d'ailes inférieures (a sur fig. V.9).

Dans le cas de la figure V.7, il y a 134 variables, cela signifie 269 modifications (références et variable). La forme du chalut référence est sur la figure V.8.

V.2.1.1 Fonction objectif

La fonction objectif ici est la traînée divisée par la largeur balayée. La traînée est la traînée totale sur le chalut (câbles, filet, flotteurs). La largeur balayée est la valeur moyenne des ouvertures horizontales supérieure et inférieure entre les pointes d'ailes (fig. V.9).

La traînée calculée sur le chalut référence est de 63 kN et la largeur balayée est de 22,3 m, ce qui donne une traînée par largeur balayée égale à 2840 N/m.

V.2.1.2 Résultats

Les principaux résultats du processus d'optimisation sont présentés dans le tableau V.4.

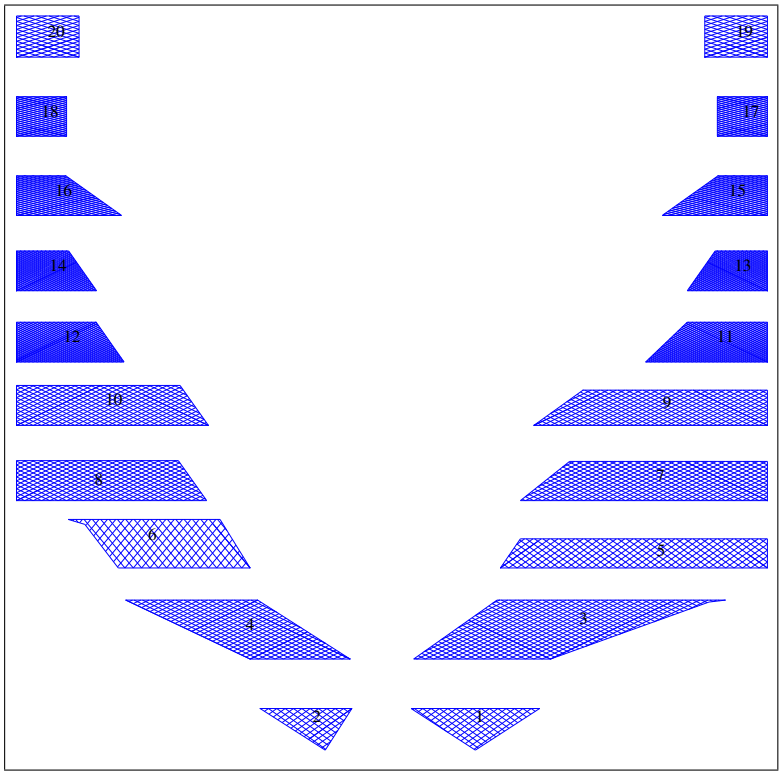


Figure V.7 : Le filet d'un chalut de fond. Compte tenu de la symétrie uniquement la moitié de pièces est présentée. En raison du grand nombre de fils seulement 1 fil sur 5 est tracé.

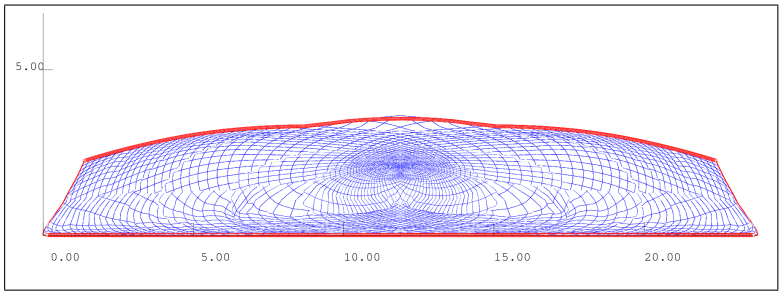


Figure V.8 : Vue de face de la forme du chalut référence, nous affichons dans la figure seulement le filet. Seul un fil sur 10 est tracé.

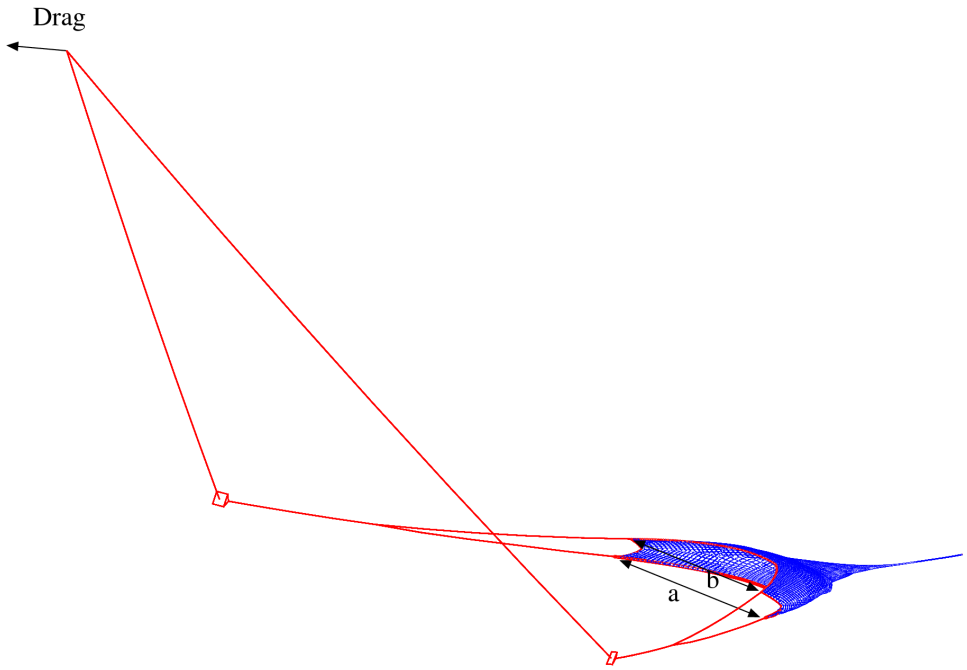


FIGURE V.9 : La fonction objectif est la traînée ("Drag") divisée par la valeur moyenne des ouvertures horizontales $((a+b)/2)$.

	Réf	**SUCCESSIVE OPTIMISATION TOOL (SOT)**					
		1%	**2%**	**4%**	**8%**	**16%**	**32%**
Traînée (kN)	63	64	64	64	64	62	57
Largeur balayée (m)	22,3	26,1	26,3	26,6	27	31,2	32,5
Ouverture verticale (m)	3,6	3,5	3,6	3,6	3,8	3	1,8
Surface gueule (m^2)	68	73,2	75	74,4	82,4	65,2	40,6
Surface fils (m^2)	189,8	193,9	193,8	192,1	188	172,4	121,6
Traînée sur le fond (kN)	14	14	14	14	14	13	15
Objectif (N/m)	**2840**	**2467**	**2449**	**2419**	**2357**	**1990**	**1755**
Réduction (%)		**13**	**14**	**15**	**17**	**30**	**38**

Tableau V.4 : La fonction objectif est la traînée sur la largeur balayée. Les résultats sont la traînée (kN), la largeur balayée (m), l'ouverture verticale (m), la surface de la gueule (m^2), la surface des fils du filet (m^2), la traînée du chalut sur le fond (kN) et la fonction objectif $(N/m$ et pourcentage de réduction) pour chaque pourcentage (PR de 1% à 32%) de SOT. Ces résultats montrent la diminution de la hauteur de la gueule du chalut pour certaines pourcentages.

Ce tableau montre que les meilleurs résultats sont obtenus pour une modification de 32%. En raison de l'ouverture verticale (1,8 m) qui est considérée comme trop petite car inférieure à la référence, ce cas (32%) est rejeté car il y a un risque de réduction de capturabilité. Pour la même raison le cas 16% est rejeté (ouverture verticale de 3 m). Enfin le cas 8% est sélectionné : réduction importante de la fonction objectif (17%) et une ouverture verticale plus grande (3,8 m) que la référence (3,6 m). La forme correspondante est indiqué ci-dessous dans la figure V.10 et en 3D à la figure V.11(b). Le plan est dans la figure V.12, et le découpage des pièces du filet est dans le tableau V.5.

L'importance de l'ouverture verticale pour le pêcheur en terme de capturabilité, nous a amené à modifier la fonction objectif pour prendre en compte la distribution verticale de poisson dans la section suivante (§ V.2.2).

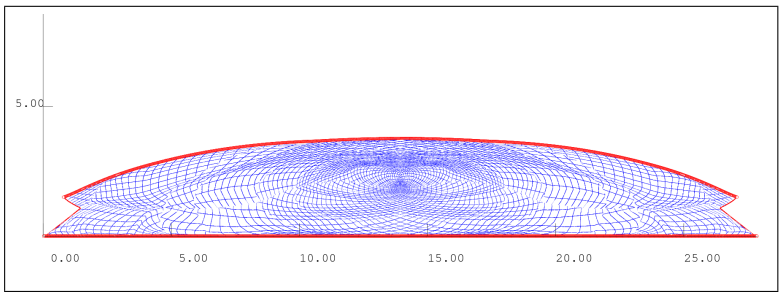
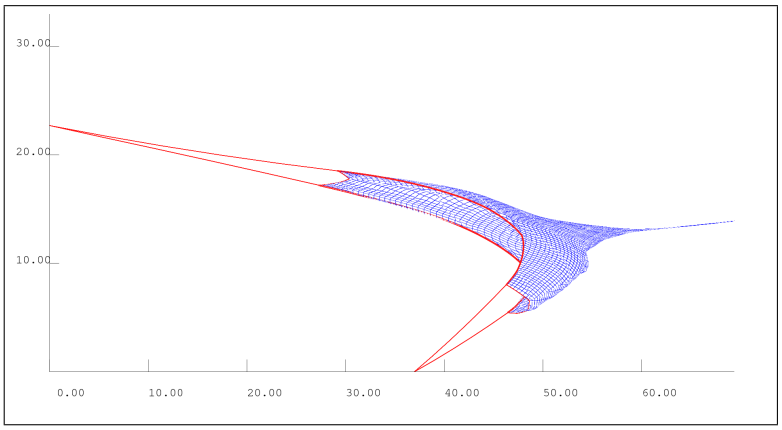


Figure V.10 : Vue de face de la forme du chalut optimisé, nous affichons dans cette figure seulement le filet. Un fil sur 10 est tracé.

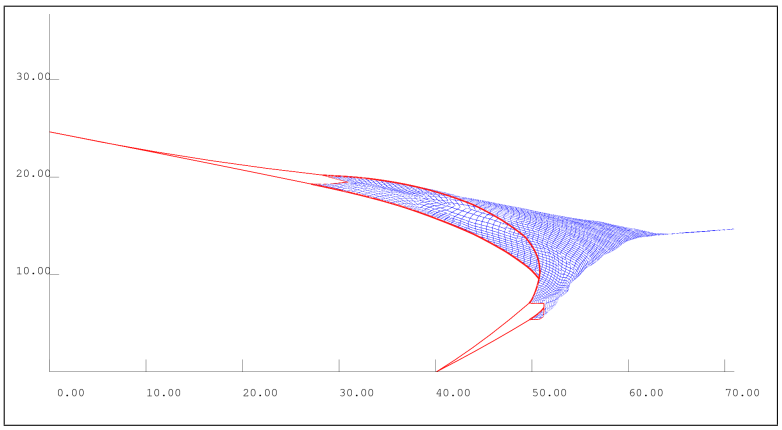
Il peut être constaté sur le plan de la figure V.12 et avec les coupes des pièces du filet (tab. V.5) que seules quelques pièces ont été modifiées (11 pièces sur 20 et 34 coupes sur 82) par rapport au chalut référence (fig. V.7). Il est clair également que la forme du chalut optimisé (fig. V.10) est proche de la forme du chalut référence (fig. V.8). Le chalut optimisé balaye une largeur de 27 m, plus grande que celle du chalut référence (22,3 m). Cela signifie une augmentation potentielle de la capture de poisson qui peut être compensée par une diminution du nombre des jours de pêche.

V.2.1.3 Économie financière de carburant et économie de temps

Les principaux résultats, en terme d'économie annuelle de carburant et de durée de pêche pour les deux chaluts de fond (chalut référence à la figure V.8 et optimisé à la figure V.10) sont présentés dans le tableau V.6. Avec les hypothèses que nous avons définies au chapitre IV.5, et compte tenu de la même surface balayée annuelle pour les



(a)



(b)

FIGURE V.11 : Aspects 3D du chalut de fond référence (a) et optimisé (b). Seulement un fil sur 10 est tracé. Nous remarquons que la poche visible sur le chalut référence ($\simeq 55\ m$) disparait pour le chalut optimisé.

Pièce	Référence	Optimisé	Pièce	Référence	Optimisé
1	77N	71N 3B	*2*	55N	46N 6B
	39N 35B	45N 32B		39N 35B	41T 35B
	39N 35B	35T 26B		35T 16B	35T 12B
3	137N	167N	*4*	79N	79N 6B
	75T 50B	75T 35B		75AB	75T 64B
	82N	67N		60N	60N 6B
	95N 72B	110N 72B		75T 56B	75T 45B
	10N 3B	25N 3B	*6*	91N	Inchangée
5	148N	Inchangée		10N 3B	Inchangée
	25T 12B	Inchangée		22T 20B	29N 24B
	137N	137N 8B		79N	70N 2B
	23N	23N 2B		25T 18B	Inchangée
	25T	30T	*8*	97N	79N
7	119N	95N		51T	Inchangée
	50T 30B	53N 50B		23N	41N 4B
	148N	148N 8B		91N	73N 4B
	50T	57T		51T 17B	51T 35B
9	111N	88N	*10*	98N	Inchangée
	45T 30B	52N 45B		51T	Inchangée
	140N	Inchangée		115N	115N 4B
	45T	Inchangée		51T 17B	46T 17B
11	96N	Inchangée	*12*	96N	Inchangée
	101T 50B	Inchangée		101T	Inchangée
	146N	Inchangée		129N	Inchangée
	101T	Inchangée		101T 34B	Inchangée
13	63N	Inchangée	*14*	63N	Inchangée
	101T 34B	Inchangée		101T	Inchangée
	96N	Inchangée		96N	Inchangée
	101T	Inchangée		101T 34B	Inchangée
15	30N	35N	*16*	30N	Inchangée
	101T 34B	101T 28B		101T	Inchangée
	63N	Inchangée		63N	Inchangée
	101T	Inchangée		101T 34B	Inchangée
17	30N	Inchangée	*18*	30N	Inchangée
	100T	Inchangée		100T	Inchangée
	30N	Inchangée		30N	Inchangée
	100T	Inchangée		100T	Inchangée
19	25N	Inchangée	*20*	25N	Inchangée
	52T	Inchangée		52T	Inchangée
	25N	Inchangée		25N	Inchangée
	52T	Inchangée		52T	Inchangée

Tableau V.5 : Les coupes des pièces de filet des chaluts référence et optimisé. Les coupes sont affichées pour chaque pièce en commençant par le côté supérieur, en tournant vers la gauche. Voir la figure V.7 (ou bien V.12) pour la numérotation des pièces.

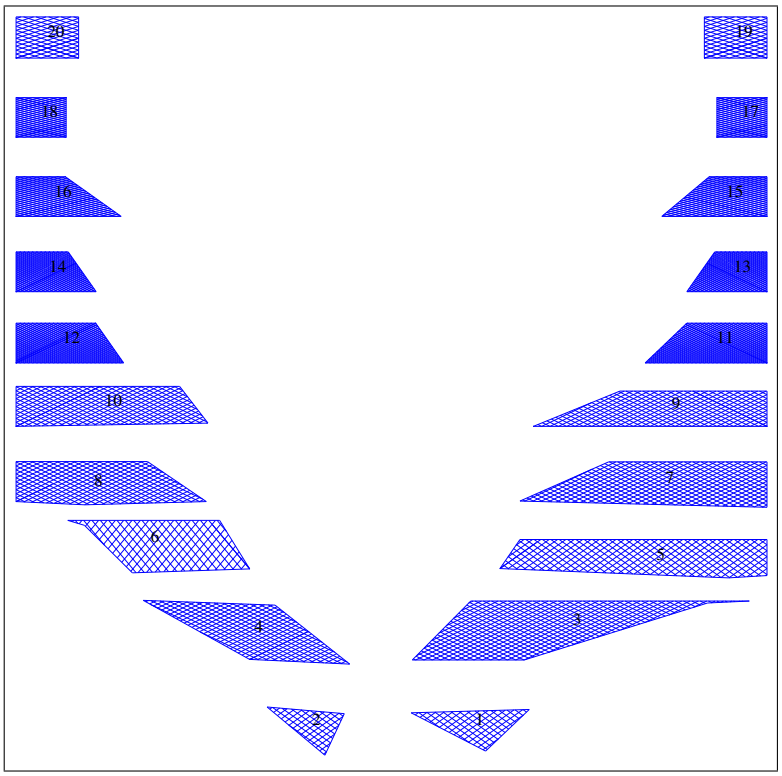


FIGURE V.12 : Les pièces de filet du chalut de fond optimisé. En raison du grand nombre de fils seulement 1 fil sur 5 est tracé. Ce plan est à comparé avec le plan de référence de la figure V.7.

deux chaluts, la durée par an est diminuée de 45 jours avec le chalut optimisé et l'économie attendue en coût du carburant peut s'élever à 54000 € par an.

	Chalut référence	**Chalut optimisé**
Traînée (kN)	63	64
Largeur balayée (m)	22,3	27
Durée chalutage (jours/an)	**260**	**215**
Distance chalutage (km/an)	34168	28222
Surface balayée (km^2)	762	762
Energie de traînée (MWh/an)	598	502
Volume de fuel (m^3)	559	469
Fuel (€/an)	**335400**	**281400**

Tableau V.6 : Comparaison entre les chaluts référence et optimisé en termes de temps en mer et coût de fuel : économie de 45 jours et de 54 k€.

V.2.2 Avec prise en compte de la distribution de poisson

Le chalut de référence est décrit dans le chapitre IV.1.2. La vitesse de traction considérée ici est de 1,51 m/s. La traînée calculée est de 57 kN et la surface de la gueule est de 70 m^2, son intersection avec la répartition des poissons sur 6m (3m et linéaire) et

pondérée par la densité de poisson est de 70 (129 et 102) m^2 ce qui donne une traînée par intersection balayée égale à 811 (440 et 558) N/m^2. Le plan du chalut de référence est affiché dans la figure IV.2 et la forme en 3D est à la figure V.13.

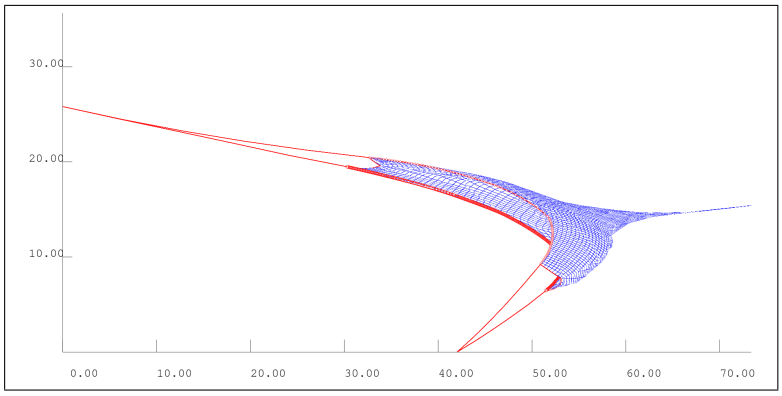


Figure V.13 : Aspect 3D du chalut de fond référence. Nous affichons un zoom sur le filet et uniquement un fil sur 10 est tracé.

V.2.2.1 Résultats

Nous avons pris en compte pour la fonction objectif l'intersection de la gueule du chalut avec le volume dans lequel la population de poissons est distribuée.

L'optimisation avec de grandes déformations de 64% (PR), conduit à de bonnes valeurs pour la fonction objectif, mais de grandes déformations de pièce de filet, quelle que soit la réparation du poisson (constante sur 6 m de hauteur, constante sur 3 m ou linéaire sur 6 m). La même conclusion est atteinte pour PR de 32%, 16% et 8%.

En revanche, lorsque PR est de 4%, 2% et 1%, les déformations des pièces de filet sont petites alors que les résultats pour la fonction objectif restent bons. A partir de ces constatations nous retenons et présentons que les résultats pour PR égal à 2%, car c'est un bon compromis entre la réduction de la fonction objectif et les déformations des pièces du filet.

Ces résultats sont affichés dans trois tableaux (V.7, V.8 et V.9) portant chacun sur une distribution de poisson. Dans chaque tableau sont présentés : la traînée, la surface réelle de la gueule, la surface d'intersection avec la distribution du poisson et pondérée par la distribution (S_i), l'objectif ($Traînée/S_i$), l'ouverture verticale (VO) et l'ouverture horizontale (HO : moyenne des pointes d'ailes).

Pour la répartition des poissons constante sur une hauteur de 6 m, la réduction de la

Mesures	SOT 2% avec une distribution de poisson constante jusqu'à 6 m		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	811	390	-52
Traînée (kN)	57	57	0
Surface gueule (m^2)	70	173	147
S_i (m^2)	70	145	107
VO (m)	3,5	7,8	121
HO (m)	24,3	25,6	5

Tableau V.7 : Optimisation en considérant la distribution de poissons constante jusqu'à 6m. Principaux résultats de l'optimisation présentés avec une taille de modification considérée (PR) de 2%. Ces résultats sont les suivants : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée entre la gueule et la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale.

consommation de carburant est de 52%. La forme 3D correspondant est indiquée dans la figure V.14 et le plan est à la figure V.15. Nous remarquons une forte augmentation de l'ouverture verticale (7,8 m) pour capturer les poissons qui sont répartis ici sur 6 m de haut. La réduction de l'objectif ($Traînée/S_i$) est obtenue ici uniquement par l'augmentation de la surface d'intersection (+107%) car la traînée reste identique (0%). L'augmentation de la surface d'intersection (+107%) provient quasiment exclusivement d'une augmentation verticale, car l'augmentation de l'ouverture horizontale n'est que de 5%.

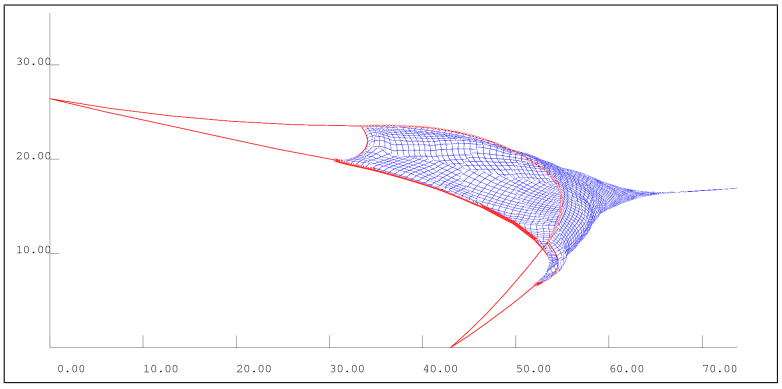


Figure V.14 : Forme 3D du chalut optimisé avec SOT au PR égal à 2% et pour une distribution uniforme de poissons jusqu'à 6m de haut.

Dans le cas de 3 m de hauteur, la réduction de la consommation de carburant est de 16%. La forme 3D correspondant est représentée sur la figure V.16 et le plan est sur la figure V.17. Nous remarquons de façon un peu surprenante que l'ouverture verticale augmente jusqu'à 5,9 m alors que le poisson n'est réparti que jusqu'à 3 m. Néanmoins, la diminution de l'objectif (-16%) est obtenue par une augmentation de la surface d'intersection (+14%) et une diminution de la traînée (-5%). L'augmentation de la surface d'intersection (14%) est plutôt liée à l'augmentation horizontale (9%).

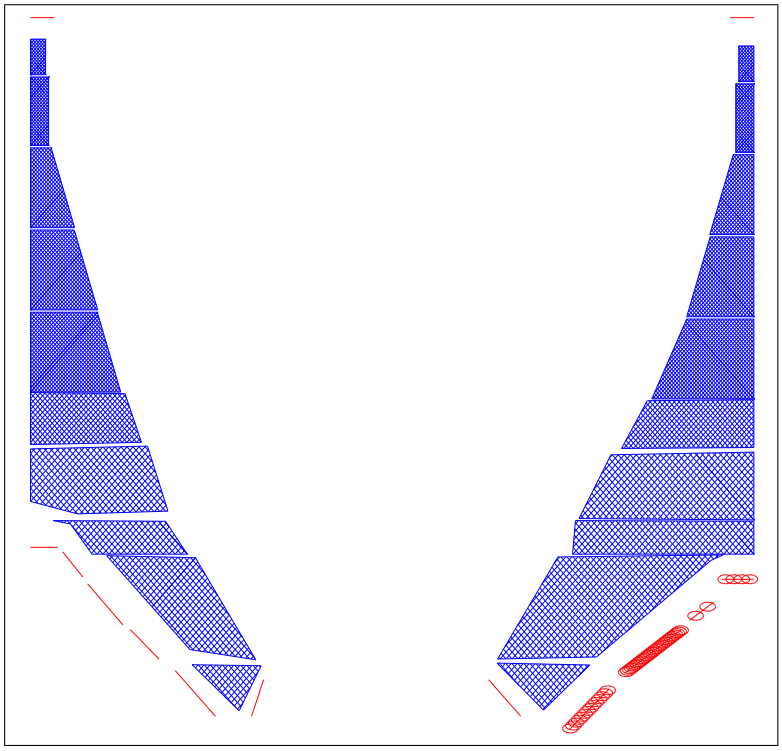


FIGURE V.15 : Plan du chalut optimisé avec SOT au PR égal à 2% et pour une distribution uniforme de poissons jusqu'à 6m de haut.

Mesures	SOT 2% avec une distribution de poisson constante jusqu'à 3 m		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	440	367	-16
Traînée (kN)	57	54	-5
Surface gueule (m^2)	70	132	89
S_i (m^2)	129	147	14
VO (m)	3,5	5,9	68
HO (m)	24,3	26,4	9

Tableau V.8 : Optimisation en considérant la distribution de poissons constante jusqu'à 3m. Principaux résultats de l'optimisation présentés avec une taille de modification (PR) de 2%. Ces résultats sont les suivants : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée entre la gueule et la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale.

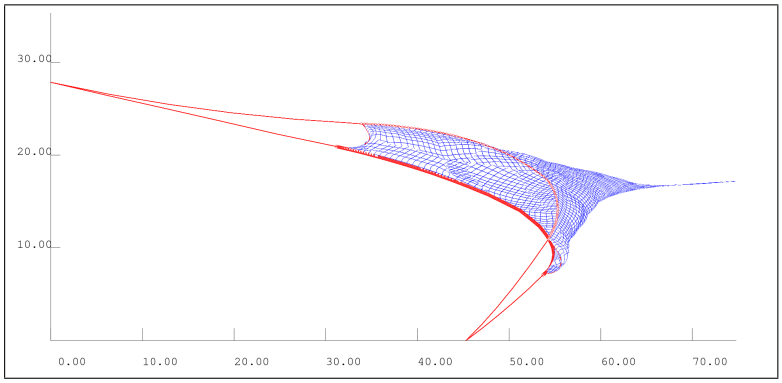


FIGURE V.16 : Forme 3D du chalut optimisé avec SOT au PR égal à 2% et pour une distribution uniforme de poissons jusqu'à 3m de haut.

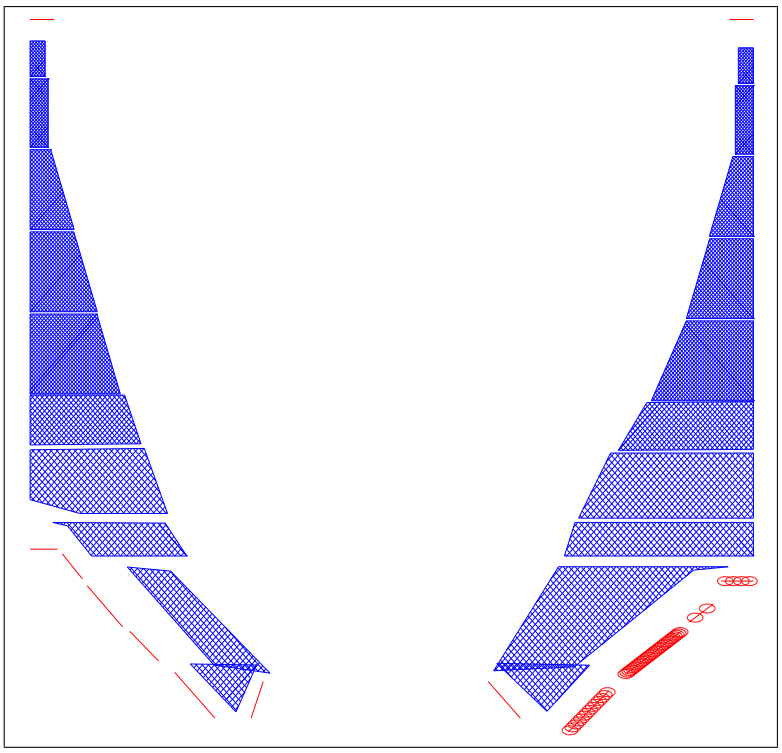


FIGURE V.17 : Plan du chalut optimisé avec SOT au PR égal à 2% et pour une distribution uniforme de poissons jusqu'à 3m de haut.

Mesures	SOT 2% avec une distribution linéaire de poisson jusqu'à 6 m		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	558	374	-33
Traînée (kN)	57	55	-4
Surface gueule (m^2)	70	148	111
S_i (m^2)	102	146	44
VO (m)	3,5	6,5	86
HO (m)	24,3	26,5	9

Tableau V.9 : Optimisation en considérant la distribution de poissons linéaire jusqu'à 6m. Principaux résultats de l'optimisation présentés avec une taille de modification (PR) de 2%. Ces résultats sont les suivants : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée entre la gueule et la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale.

Dans la répartition linéaire des poissons, 33% de réduction de la consommation de carburant est obtenue. La forme 3D correspondant est représentée sur la figure V.18 et le plan sur la figure V.19. Cette réduction d'objectif (33%) est pour l'essentiel obtenue par une augmentation de surface (+44%). Cette augmentation est due à une augmentation verticale (86%).

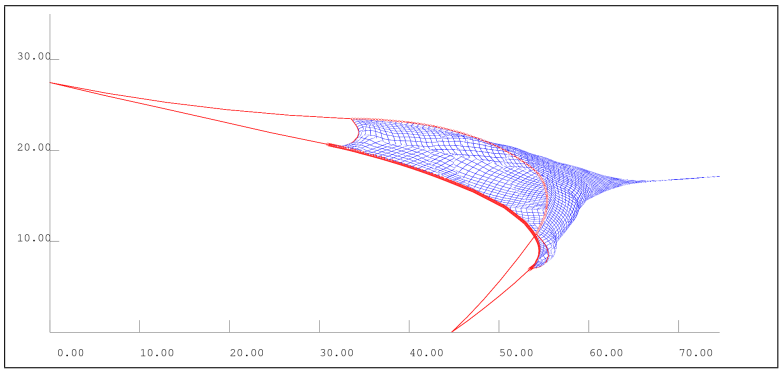


Figure V.18 : Forme 3D du chalut optimisé avec SOT au PR égal à 2% et pour une distribution linéaire de poissons jusqu'à 6m de haut.

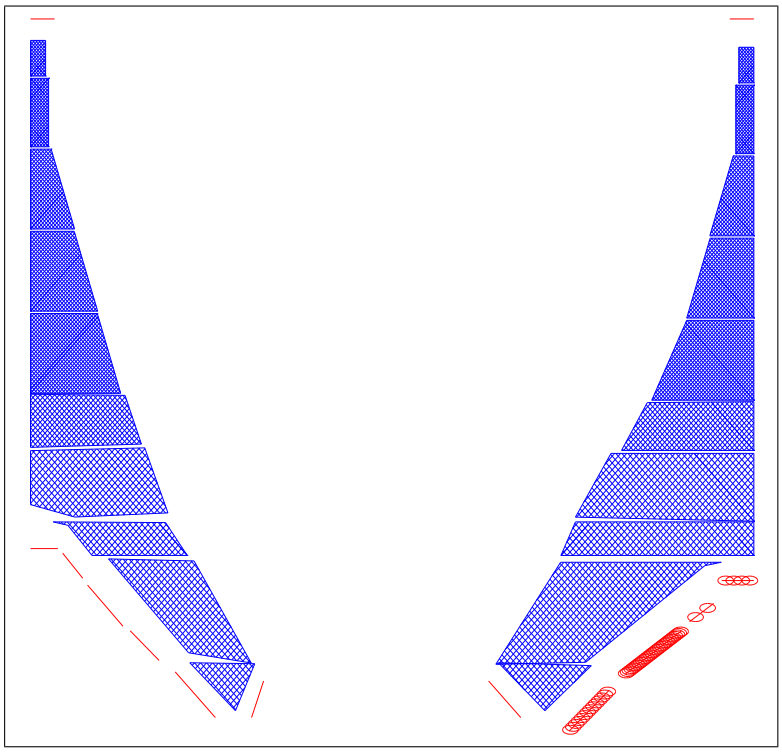


Figure V.19 : Plan du chalut optimisé avec SOT au PR égal à 2% et pour une distribution linéaire de poissons jusqu'à 6m de haut.

Il peut être constaté sur les plans (figs. V.15, V.17 et V.19) que seules quelques pièces ont été modifiées par rapport au chalut de référence (fig. IV.2). Il est clair également que

les formes en 3D des chaluts optimisés (figs. V.14, V.16 et V.18) sont proches de celle du chalut de référence (fig. V.13).

Les chaluts optimisés ont des surfaces d'intersection plus grande (+107%, +14% et +44%) que celle de la référence. Cela signifie une augmentation potentielle de la capturabilité qui peut être compensée par une diminution du nombre de sorties de pêche.

V.2.2.2 Vitesse d'exécution

Le tableau V.10 montre la durée de calcul et le nombre de calculs de chalut effectués pendant la procédure d'optimisation pour les trois distributions de poissons (6m, 3m et linéaire) pour PR de 2%. Il montre que le temps de calcul pour un seul chalut est d'environ 13 s. La machine utilisée est basée sur huit processeurs (Intel Xeon^{TM}E5345 @2.33GHz) avec l'architecture GNU gcc-4 du compilateur fonctionnant sous Linux Ubuntu 8.04.

Distribution de poisson	**Successive Optimisation Tool (SOT)**	
Constante jusqu'à 6 m	***Nombre de chaluts évalués***	10064
	Temps de calcul	14h 44min
Constante jusqu'à 3 m	***Nombre de chaluts évalués***	14652
	Temps de calcul	21h 27min
Linéaire jusqu'à 6 m	***Nombre de chaluts évalués***	9324
	Temps de calcul	13h 39min

Tableau V.10 : Temps total de l'optimisation par rapport au nombre total de chaluts calculés pour PR de 2% avec les trois cas de distributions : 6m, 3m et linéaire.

V.2.2.3 Économie financière de carburant et économie de temps

Les principaux résultats, en terme d'économie annuelle de carburant et de durée de pêche pour les deux chaluts de fond (la forme du chalut de référence est à la figure V.13 et les chaluts optimisés dans les figures V.14, V.16 et V.18) sont affichés dans le tableau V.11. Avec les hypothèses définies au chapitre IV.5 (volume balayé, pondéré par la distribution, constant : 2,1 km^3/an pour la distibution 6 m, 3,9 km^3/an pour la distribution 3 m et 3,1 km^3/an pour la distribution linéaire), la durée par an diminue de 135 jours avec le chalut optimisé et l'économie peut atteindre 140 k€ par an avec la distribution des poissons constante sur la hauteur de 6 m, 32 jours et 44 k€ par an avec une distribution sur 3 mètres et 79 jours et 89 k€ par an avec la distribution linéaire.

	Référence			Optimisé		
	6m	**3m**	**Linéaire**	**6m**	**3m**	**Linéaire**
Traînée (kN)	57			57	54	55
Largeur (m)	24,3			25,6	26,4	26,5
Durée (jours/an)	**260**			**125**	**228**	**181**
Distance (km/an)	30529			14726	26799	21195
S_i (m^2)	70	129	102	145	147	146
Volume (km^3/an)	2,1	3,9	3,1	2,1	3,9	3,1
Energie traînée (MWh/an)	481			231	402	322
Volume fuel (m^3/an)	450			216	376	301
Fuel (€/an)	**269764**			**129703**	**225321**	**180724**

Tableau V.11 : Comparaison des chaluts de fond de référence et optimisés avec PR égal à 2% en terme de temps en mer et coût du carburant pour les distributions de poissons constantes (6m et 3m) et linéaire. Les volumes balayés sont pondérés par la distribution de poissons. Ces volumes restent constants entre la référence et les chaluts optimisés.

V.2.2.4 Prise de poisson

Une prise de poissons dans le cul de chalut (fig. V.20) modifie la traînée du chalut, et par conséquent la surface de la gueule et l'objectif de l'optimisation. Nous étudions ici l'influence de la prise sur le maintien de l'efficacité de l'optimisation qui a été réalisée sur le chalut vide (sans prise). Nous avons examiné l'influence de la prise pour le chalut référence et les chaluts optimisés selon les trois distributions de poissons.

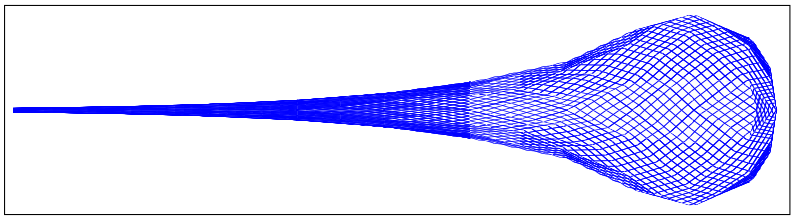


Figure V.20 : Cul du chalut avec 5 m^3 de poissons. Ce cul est modélisé avec un pas de maillage d'éléments finis de 0,5 m. Un fil sur deux est tracé.

Les résultats d'ajout de 5 m^3 de poissons dans le cul du chalut sont affichés dans les tableaux V.12, V.13 et V.14 portant chacun sur une distribution de poissons. Dans chaque tableau sont présentés : la traînée, la surface réelle de la gueule, la surface d'intersection avec la distribution du poisson et pondérée par la distribution (S_i), l'objectif ($Traînée/S_i$), l'ouverture verticale (VO) et l'ouverture horizontale (HO : moyenne des extrémités d'ailes). Les formes des chaluts sont représentées dans la figure V.21.

Pour la distribution de poissons constante jusqu'à 6 m de hauteur, la réduction de la consommation de carburant est de 37%, légèrement dégradée par rapport au chalut sans prise (52%, cf. tab. V.7). La forme en 3D correspondante est dans la figure V.21(b).

Mesures	SOT 2% - poisson const jusqu'à 6 m - 5 m^3 prise		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	753	474	-37
Traînée (kN)	58	57	-1
Surface gueule (m^2)	77	124	61
S_i (m^2)	77	121	57
VO (m)	4,7	6,4	37
HO (m)	22,8	23,4	3

Tableau V.12 : Ajout de 5 m^3 de poissons dans le cul du chalut (référence et optimisé) selon la distribution constante jusqu'à 6 m de hauteur. Ces résultats sont les suivants : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée par la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale.

Mesures	SOT 2% - poisson const jusqu'à 3 m - 5 m^3 prise		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	474	404	-15
Traînée (kN)	58	55	-6
Surface gueule (m^2)	77	103	33
S_i (m^2)	122	135	11
VO (m)	4,7	5,1	8
HO (m)	22,8	24,5	8

Tableau V.13 : Ajout de 5 m^3 de poissons dans le cul du chalut (référence et optimisé) selon la distribution constante jusqu'à 3 m de hauteur. Ces résultats sont les suivants : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée par la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale.

Dans le cas d'une répartition sur 3 m de hauteur, la réduction de la consommation de carburant est de 15%. Cette réduction est équivalente au chalut sans prise (16%, cf. tab. V.8). La forme en 3D correspondant est représentée dans la figure V.21(c).

Mesures	SOT 2% - dist linéaire jusqu'à 6 m - 5 m^3 prise		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	558	433	-22
Traînée (kN)	58	56	-3
Surface gueule (m^2)	77	115	50
S_i (m^2)	104	130	25
VO (m)	4,7	5,8	23
HO (m)	22,8	24,5	8

Tableau V.14 : Ajout de 5 m^3 de poissons dans le cul du chalut (référence et optimisé) selon la distribution linéaire jusqu'à 6 m de hauteur. Ces résultats sont les suivants : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée par la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale.

Dans le cas d'une distribution linéaire jusqu'à 6 m de hauteur et avec 5 m^3 de poissons dans le cul de chalut, la réduction de la consommation de carburant est de 22%. Cette réduction reste significative mais inférieure au chalut sans prise (33%, cf. tab. V.9). La forme en 3D correspondant est représentée dans la figure V.21(d).

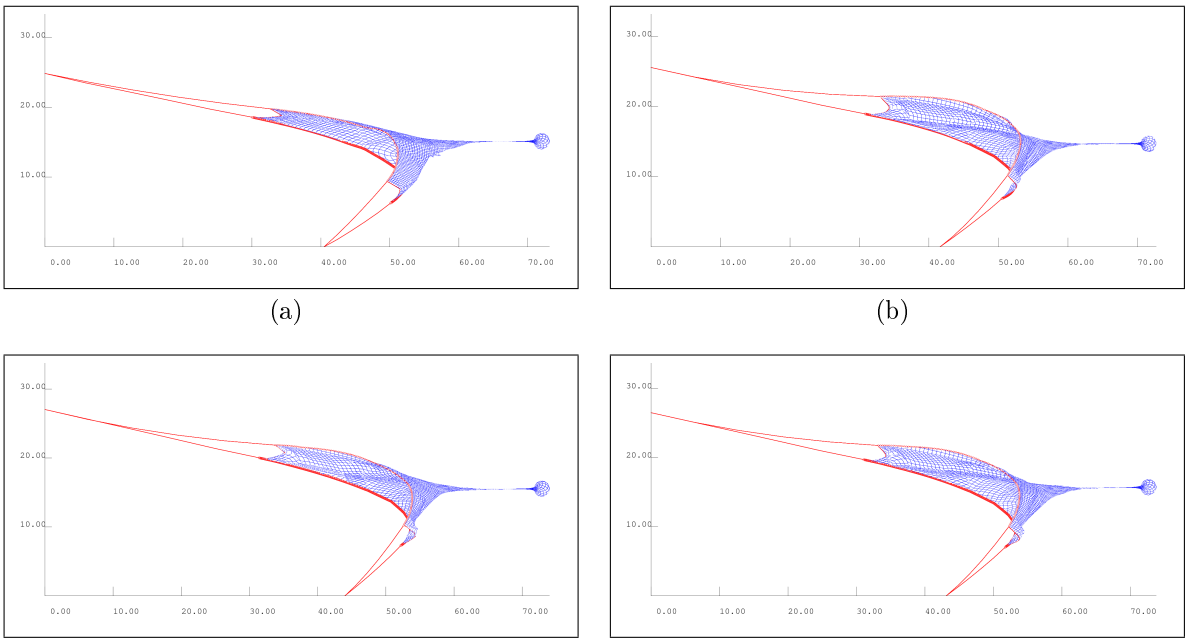


Figure V.21 : Figures 3D des chaluts référence et optimisés par la méthode SOT à PR égal à 2% selon les trois distributions de poissons et après ajout 5 m^3 prise de poisson. (a) chalut référence, (b) chalut optimisé selon la distribution constante jusqu'à 6 m, (c) distribution constante jusqu'à 3 m et (d) distribution linéaire jusqu'à 6 m de hauteur.

Nous constatons que la prise de poissons dans le cul de chalut réduit les économies obtenues sur les chaluts sans prise mais qu'elles restent significatives.

V.3 Application de SRT pour optimiser les pièces de filet du chalut de fond

Nous appliquons la méthode SRT pour optimiser le plan d'un chalut de fond selon les trois distributions de poissons (deux cas constants jusqu'à 6 m et 3 m de hauteur et un cas linéaire jusqu'à 6 m de hauteur) sous les mêmes conditions que pour la méthode SOT du paragraphe V.2.2. Le plan du chalut de référence est affiché dans la figure IV.2 et la forme est à la figure V.13.

V.3.1 Processus d'optimisation

Si nous commençons l'optimisation avec un pourcentage de modification élevé (PR égal à 64% par exemple) et en exécutant le SRT avec des modifications successives de 32%,

16% jusqu'à 1%, nous obtenons de forte réduction d'objectif. Mais cette optimisation provoque de grandes déformations dans les pièces de filet du chalut comme le montre figure V.22(a). La conclusion est la même pour PR égal à 32%, 16% et 8% (figs. V.22(b), V.22(c) et V.22(d)). En revanche, lorsque le PR de départ est de 4% (fig. V.22(e)) et moins (2% correspondant à V.22(f)) les déformations sont moins spectaculaires, par contre les résultats de la fonction objectif sont parfois moins bons (selon le cas de distribution de poissons).

Ceci est illustré par les résultats du processus d'optimisation obtenus pour PR variant de 2% jusqu'à 64%, qui sont affichés dans trois tableaux (V.15, V.16 et V.17) portant chacun sur une distribution de poissons donnée.

Le tableau V.15 montre les résultats pour la distribution de poissons constante jusqu'à 6 m de hauteur. La traînée d'un chalut optimisé varie de 54 à 57 kN selon PR. Elle est légèrement plus petite que celle du chalut référence (57 kN). La surface de gueule d'un chalut optimisé varie de +99% à +147% par rapport à la référence (70 m^2). La surface d'intersection pondérée par la densité de poisson varie de +100% à +109% par rapport au référence (70 m^2). L'ouverture entre les panneaux varie de +2% à +13% par comparaison avec celle de référence (68,5 m^2). L'objectif varie de 52% (PR égal à 2% ou 64%) jusqu'à 56% (PR égal à 8%).

Mesures	**SRT - poisson const jusqu'à 6 m**						
	Référence	**2%**	**4%**	**8%**	**16%**	**32%**	**64%**
Objectif (N/m^2)	811	390	375	359	382	368	388
Traînée (kN)	57	57	55	52	53	53	54
Surface gueule (m^2)	70	173	163	145	140	143	139
S_i (m^2)	70	145	146	145	140	143	139
VO (m)	3,5	7,8	7,1	5,9	5,9	5,8	5,7
HO (m)	24,3	25,6	26,4	28,3	27,6	27,6	27,3
DO (m)	68,5	69,5	72	77,3	74,6	76,2	73,6
Réduction (%)		52	54	56	53	55	52

Tableau V.15 : Optimisation par la méthode SRT en considérant la distribution de poissons constante jusqu'à 6 m. La taille de modification (PR) varie de 2% jusqu'à 64%. Les mesures sont : fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée par la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale, ouverture entre panneaux, réduction de la fonction objectif. Les résultats sont pour le chalut référence et les chalut optimisés.

Le tableau V.16 montre les résultats pour la distribution de poissons constante jusqu'à 3 m de hauteur. La traînée d'un chalut optimisé varie de 49 à 54 kN selon PR. Elle est légèrement plus petite que celle du chalut référence (57 kN). La surface de gueule d'un

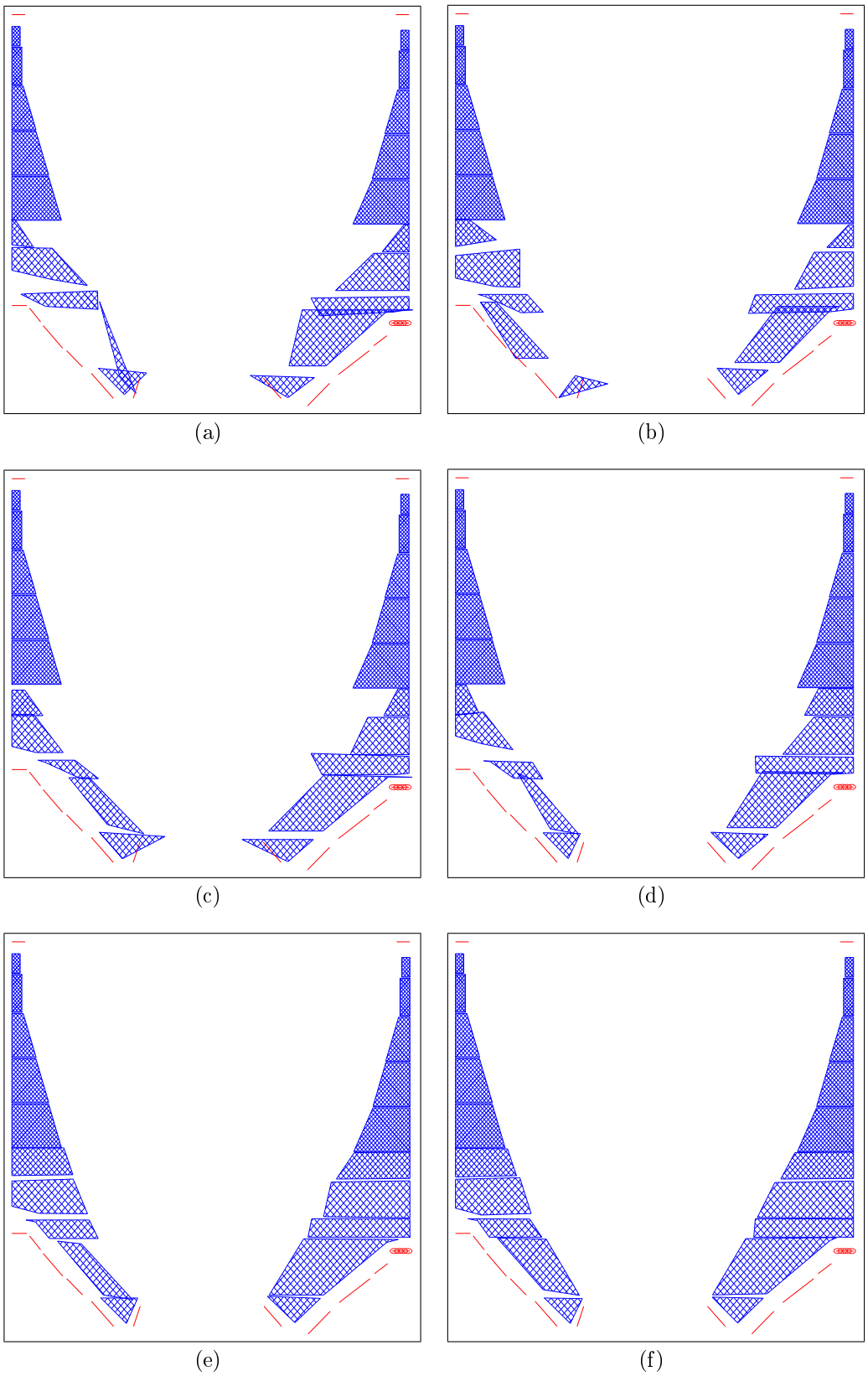


Figure V.22 : Plans des chaluts optimisés par la méthode d'optimisation SRT selon différents PR et une distribution de poissons constante jusqu'à 6 m de hauteur : fig. (a) correspond à 64%, (b) à 32%, (c) à 16%, (d) à 8%, (e) à 4% et (f) à 2%. Un fil sur 10 est tracé. Le chalut référence est à la figure IV.2.

chalut optimisé varie de +24% à +89% par rapport à la référence (70 m^2). La surface d'intersection pondérée par la densité de poisson varie de +14% à +23% par rapport à la référence (70 m^2). L'ouverture entre les panneaux varie de +7% à +21% par comparaison avec celle de référence (68,5 m^2). L'objectif varie de 16% (PR égal à 2%) jusqu'à 30% (PR égal à 32%).

Mesures	**SRT - poisson const jusqu'à 3 m**						
	Référence	**2%**	**4%**	**8%**	**16%**	**32%**	**64%**
Objectif ***(N/m^2)***	440	367	344	349	359	310	315
Traînée (kN)	57	54	52	52	53	49	50
Surface gueule ***(m^2)***	70	132	101	101	97	86	90
S_i ***(m^2)***	129	147	150	149	148	159	158
VO (m)	3,5	5,9	4,5	4,5	4,3	3,5	3,7
HO (m)	24,3	26,4	27,4	27,2	27,3	29,7	28,3
DO (m)	68,5	73,4	77,4	76,7	75,4	82,9	81,5
Réduction (%)		16	22	21	18	30	28

Tableau V.16 : Optimisation par la méthode SRT en considérant la distribution de poissons constante jusqu'à 3 m. La taille de modification (PR) varie de 2% jusqu'à 64%. Les mesures sont : fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée par la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale, ouverture entre panneaux, réduction de la fonction objectif. Les résultats sont pour le chalut référence et les chalut optimisés.

Le tableau V.17 montre les résultats pour la distribution de poissons linéaire jusqu'à 6 m de hauteur. La traînée d'un chalut optimisé varie de 52 à 55 kN selon PR. Elle est légèrement plus petite que celle du chalut référence (57 kN). La surface de gueule d'un chalut optimisé varie de +80% à +115% par rapport à la référence (70 m^2). La surface d'intersection pondérée par la densité de poissons varie de +44% à +49% par rapport à la référence (70 m^2). L'ouverture entre les panneaux varie de +6% à +13% par comparaison avec celle de référence (68,5 m^2). L'objectif varie de 33% (PR égal à 2%) jusqu'à 39% (PR égal à 64%).

V.4 Application de SOT sur les câbles du chalut de fond

Nous appliquons ici la méthode SOT pour optimiser les longueurs des câbles d'un chalut de fond selon la distribution de poisson constante jusqu'à 6 m de hauteur, sous les mêmes conditions déjà prises dans le paragraphe V.2.2. Le plan du chalut de référence est

Mesures	SRT - poisson linéaire jusqu'à 6 m						
	Référence	**2%**	**4%**	**8%**	**16%**	**32%**	**64%**
Objectif (N/m^2)	558	372	357	361	344	356	342
Traînée (kN)	57	55	53	53	52	52	52
Surface gueule (m^2)	70	150	134	132	136	126	136
S_i (m^2)	102	147	147	146	151	147	151
VO (m)	3,5	6,7	5,8	5,7	5,6	5,3	5,6
HO (m)	24,3	26,5	27,2	27,1	27,9	28,3	27,7
DO (m)	68,5	72,4	75,8	75,4	77	76,7	77,3
Réduction (%)		33	36	35	38	36	39

Tableau V.17 : Optimisation par la méthode SRT en considérant la distribution linéaire de poissons jusqu'à 6 m de hauteur. La taille de modification (PR) varie de 2% jusqu'à 64%. Les mesures sont : fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, l'intersection pondérée par la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale, ouverture entre panneaux, réduction de la fonction objectif. Les résultats sont pour le chalut référence et les chalut optimisés.

affichée dans la figure IV.13 et la forme est à la figure V.23.

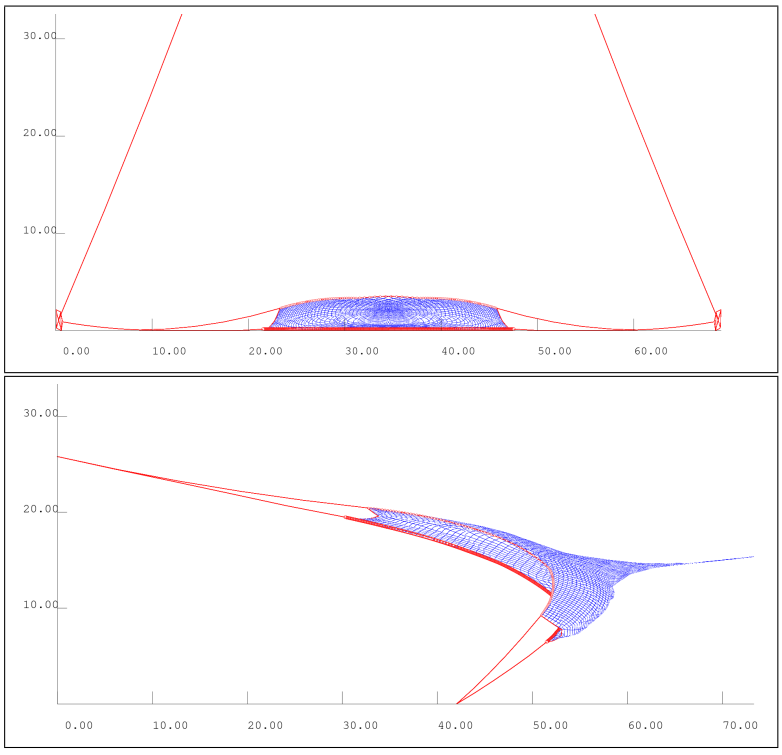


Figure V.23 : Vue de face (en haut) et 3D (en bas) du chalut de fond référence. Un fil sur 10 est tracé. Puisque l'entremise du dessus (câble # 2 dans fig. IV.13) soutient la partie haute du filet, nous nous attendons que sa longueur joue un rôle important tel que discuté dans le texte.

V.4.1 Résultats de l'optimisation

L'optimisation SOT est exécuté avec trois valeurs de PR : 4%, 2% et 1%. Une légère variation dans les chaluts optimisés est observée entre les différentes valeurs de PR (de 4% à 1%). Nous choisissons les résultats obtenus avec PR 1%.

Les résultats sont donnés dans le tableau V.18 : les câbles modifiés sont notés, ainsi que leur longueur de référence (RL), longueur à l'optimum (OL), la variation de longueur (LM) et leur contribution à la réduction d'objectif (Pourcentage gain).

Selon ce tableau et la figure V.24, la plus importante réduction d'objectif est obtenue avec les câbles # 2, 4 et 12 (en gras dans le tableau V.18).

Câble #	**RL (m)**	**OL (m)**	**LM (%)**	**Pourcentage gain (%)**
1	36,60	36,60	0	0,00
2	**59,40**	**59,99**	**1**	**80,87**
3	59,40	59,40	0	0,00
4	**7,00**	**7,21**	**3**	**3,95**
5	7,80	7.18	-8	0,43
6	14,90	15,05	1	1,98
7	14,35	14,49	1	0,58
8	1,10	0,96	-13	0,32
9	4,94	4,40	-11	0,61
10	2,25	2,14	-5	0,24
11	0,79	0,73	-7	0,06
12	**3,12**	**2,34**	**-25**	**9,54**
13	7,70	7,16	-7	0,01
14	7,30	6,86	-6	0,18
15	201,00	223,11	11	1,23

Tableau V.18 : Pour chaque câble, nous présentons sa longueur de référence (RL), sa longueur optimisée (OL) et la différence en pourcentage (LM) entre les deux. Le pourcentage de gain est la contribution dans la réduction obtenue par chaque câble par rapport au gain total. Ce tableau montre que la modification des câbles # 2, 4 et 12 (gras) conduit à l'amélioration la plus significative.

Le tableau V.19 donne les principaux résultats d'optimisation en terme de traînée, surface balayée, surface d'intersection de la gueule avec la répartition de poisson, l'ouverture verticale, horizontale et la distance entre panneaux.

Le tableau V.20 précise les gains en carburant et en temps de pêche obtenus avec le chalut optimisé.

Nous obtenons une réduction de la consommation de carburant net de 49%. La forme 3D correspondant est indiqué dans la figure V.26.

Une légère augmentation de la largeur du chalut optimisé est observée (passant de 24,3 m à 25,3 m) ainsi que dans la hauteur (de 3,5 m à 6,6 m) conduisant à une augmen-

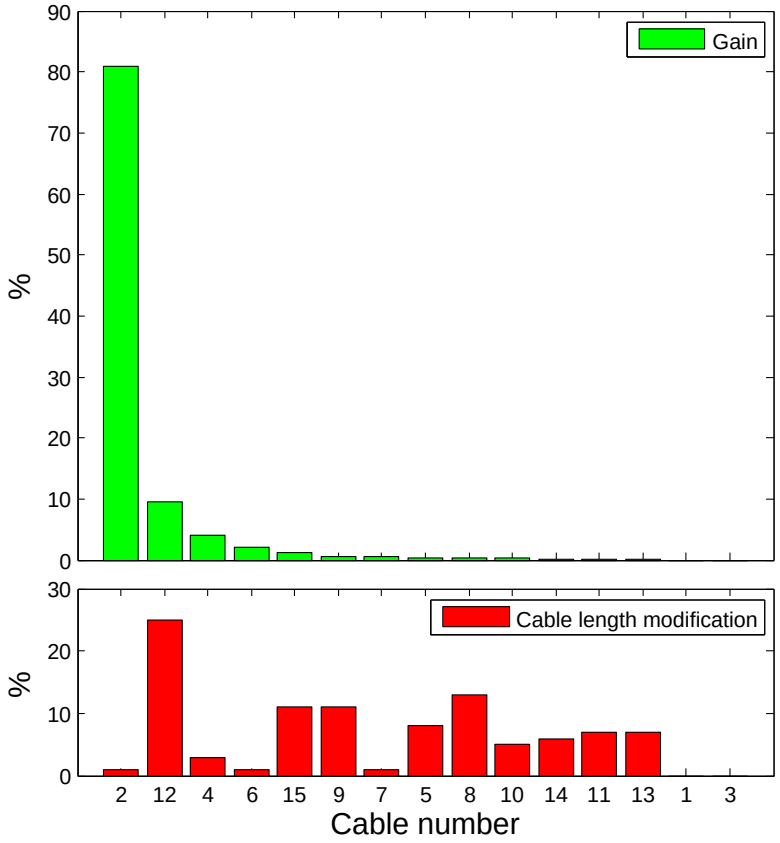


Figure V.24 : Pourcentage de modification de longueur (bas) et pourcentage de réduction (haut) attribué à chaque câble par rapport au gain total. L'axe horizontal représente les numéros des câbles ordonnés selon leur effets sur la réduction. Notons que câble # 2 a la plus grande contribution à la totalité du gain.

Mesures	SOT1%		
	Référence	Optimisé	Différence (%)
Objectif (N/m^2)	809	414	-49
Traînée (kN)	57	57	1
Surface gueule (m^2)	70	145	107
S_i (m^2)	70	138	97
VO (m)	3,5	6,6	88
HO (m)	24,3	25,3	4
DO (m)	68,5	73,1	7

Tableau V.19 : Principaux résultats de l'optimisation : valeur de la fonction objectif ($Traînée/S_i$), traînée du chalut, surface de la gueule, surface balayée, intersection entre la gueule du chalut avec la distribution de poissons, ouverture verticale, ouverture horizontale et distance entre les panneaux. Les résultats sont pour les chaluts référence et optimisé.

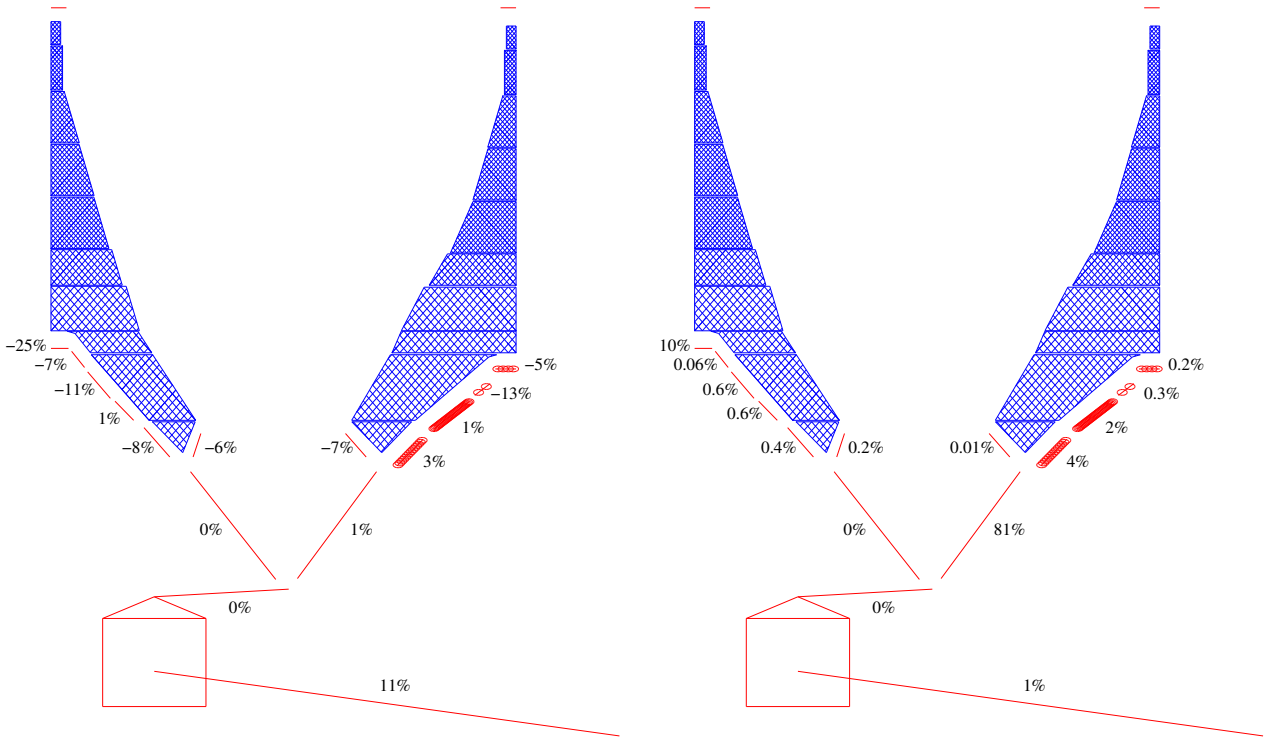


Figure V.25 : Plan du chalut montrant la modification en pourcentage après l'optimisation des longueurs des câbles (gauche) et leur contribution à la réduction de la fonction objectif (droite).

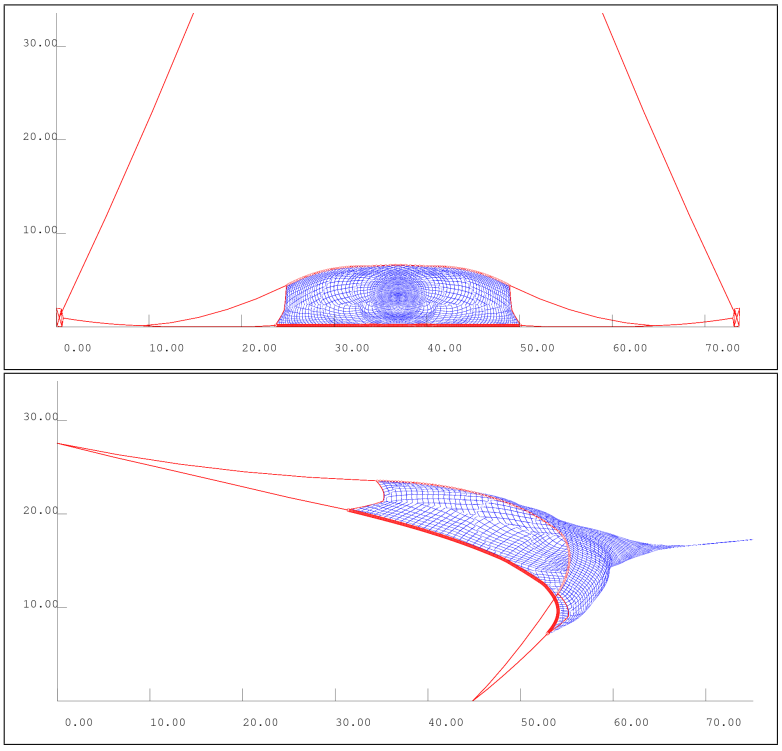


Figure V.26 : Vue de face (ci-dessus) et 3D (ci-dessous) du chalut optimisé.

tation de la surface de la gueule et donc une diminution potentielle du nombre de jours de pêche.

D'après les résultats ci-dessus il apparaît qu'un petit changement (1%) dans le câble # 2 produit un gain de plus de 80% de la réduction de gain totale de carburant (cf. fig. V.25 et tab. V.18). Cela provient du fait que ce câble contrôle la hauteur de la corde de dos et par conséquent la surface balayée, comme on peut voir dans les figures V.25 et V.26.

V.4.2 Temps d'exécution de la procédure

Le temps d'exécution de la procédure d'optimisation est de 3 h 51 min tandis que le nombre total de chaluts évalués atteint 2970. Cela montre que le temps de calcul par chalut est d'environ 5 s. La machine utilisée est basée sur un CPU à huit processeurs (Intel Xeon^{TM}E5345 @2.33GHz) avec l'architecture GNU gcc-4 du compilateur fonctionnant sous Linux Ubuntu 8.04. Ce temps d'exécution (3h 51) est significativement plus faible que pour l'optimisation sur les pièces de filet (14h 44, cf. tab. V.10) avec des gains équivalents (49% et 52%, cf. tabs. V.19 et V.7).

V.4.3 Économie financière de carburant et économie de temps

La réduction de la consommation de carburant ainsi que l'économie en termes de distance parcourue, de jours de pêche et d'énergie sont affichés dans le tableau V.20. Le chalut référence est affiché dans la figure V.23 et le chalut optimisé dans la figure V.26.

Compte tenu de nos hypothèses définies au chapitre IV.5, nous en déduisons que la durée totale de pêche par an avec le chalut optimisé est diminué de 128 jours (-49%). L'économie sur le coût du carburant pourrait atteindre environ 132 k€ par an ce qui représente une économie nette de 49%.

	Chalut référence	**Chalut optimisé**
Traînée (kN)	57	57
Largeur balayée (m)	24,3	25,3
Durée (jours/an)	**260**	**132**
Distance (km/an)	30529	15481
S_i (m^2)	70	138
Volume (km^3/an)	2,1	2,1
Energie traînée (MWh/an)	481	246
Volume fuel (m^3/an)	450	230
Fuel (€/an)	**269783**	**137828**

Tableau V.20 : Durée de pêche par an, distance parcourue, volume filtré, énergie de traînée, volume de carburant consommé et son coût sont présentés pour les chaluts référence et optimisé. Les principaux résultats (en gras) sont une réduction du coût du carburant de 49% et une réduction des jours de pêche de 49%.

Chapitre VI

Validation de l'optimisation et de la simulation

Nous avons fait des essais dans le bassin d'essai de Boulogne sur mer sur une maquette de chalut de pêche pélagique et des maquettes de filet rectangulaire. Ces essais ont pour but de valider l'efficacité des simulations et de vérifier les optimisations numériques avec les résultats expérimentaux.

VI.1 Essai en bassin d'une maquette de chalut pélagique

Nous avons testé une maquette de chalut pélagique dans différentes conditions : différentes vitesses du courant (0,373, 0,427 et 0,545 m/s), sans et avec panneaux, sans et avec funes. Les deux capteurs de tension de fune sont de type LESE à jauge de contrainte à valeur maximale admissible de 50 N. Dans les deux figures suivantes (VI.1 et VI.2) nous présentons les cas testés.

Sans panneaux, avec funes et vitesse 0,545 m/s

Les formes géométriques expérimentale (fig. VI.1 gauche) et simulée (fig. VI.1 droite) sont proches : ouvertures verticales expérimentale de 29 cm et simulée de 28,5 cm, l'ouverture horizontale supérieure est expérimentalement de 85 cm et de 88 cm dans la simulation, l'ouverture horizontale inférieure est 89 cm et 80 cm. Par contre il y a un grand écart en

terme de tension totale : l'expérimental 6,97 N et la simulation 3 N.

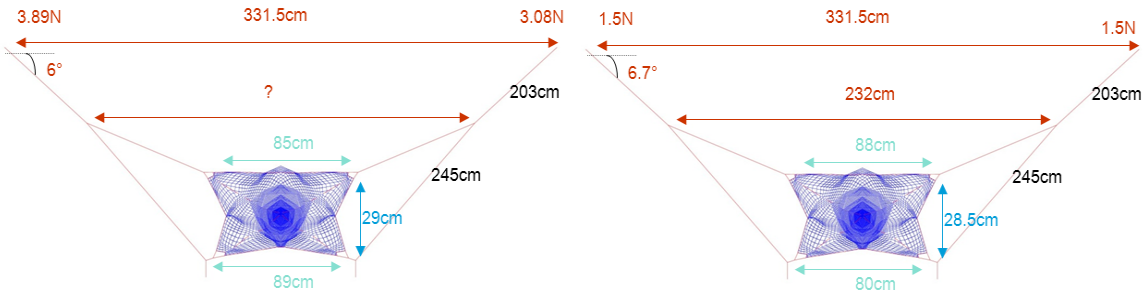


Figure VI.1 : Différence entre les mesures des résultats expérimental (gauche) et simulation (droite). Les essais sont avec funes, sans panneaux et à une vitesse de 0,545 m/s. Tension totale expérimentale égale à 6,97 N et celle de la simulation égale à 3 N.

Avec panneaux, avec funes et vitesse 0,545 m/s

Les formes géométriques des maquettes expérimentale (fig. VI.2 gauche) et simulée (fig. VI.2 droite) se ressemblent : même ouverture verticale (28 cm), l'ouverture horizontale supérieure est 96 cm et 100 cm, l'ouverture horizontale inférieure est 112,5 cm et 86 cm. Par contre il y a un grand écart en terme de tension totale : l'expérimental 9,12 N et la simulation 5,2 N.

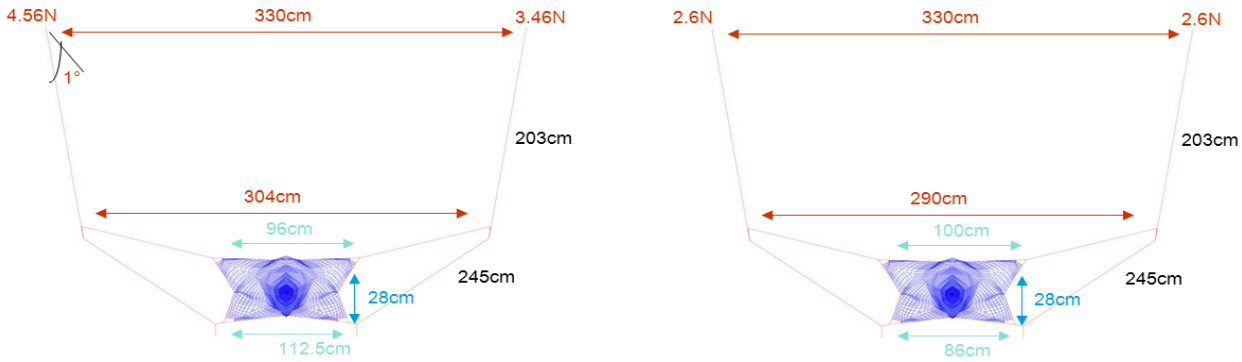


Figure VI.2 : Différence entre les mesures expérimentales (gauche) et la simulation (droite). Les essais sont avec funes, avec panneaux et à une vitesse de 0,545 m/s. La tension totale expérimentale égale 8,02 N et celle de la simulation égale 5,2 N.

Afin d'améliorer la prise en compte des efforts hydrodynamiques exercés sur le chalut, il convient avant tout de mieux cerner leur origine. L'étude du comportement d'un chalut complet a montré les limites en termes de comparaison entre résultats numériques et

expérimentaux. En effet, les efforts sont faibles et la forme est complexe. Aussi, nous avons mis en place une seconde série d'essais permettant d'analyser le comportement d'une structure simple, une nappe d'alèse rectangulaire, dans un écoulement uniforme. Ces essais ont pour objectifs de créer une base de données de mesures d'efforts et de géométries pour une comparaison avec les logiciels numériques existants.

VI.2 Manipulation en bassin sur des maquettes de filet rectangulaires

Nous avons testé trois maquettes de filets, une de référence, une autre optimisée et une troisième témoin dans le but de valider nos travaux de simulation. La méthode d'optimisation utilisée est celle étudiée dans le cadre de cette thèse. Notre objectif est d'optimiser le plan de la maquette de référence en minimisant le rapport de la traînée sur la surface balayée, et de faire une comparaison entre les résultats d'essai en bassin et ceux obtenus par le logiciel de simulation afin de valider son efficacité. Pour ce faire nous avons obtenu un plan de la maquette optimisée par simulation. Cette maquette a été fabriquée par la suite, ainsi que celle de référence pour les mesures de bassin. Par ailleurs, nos mesures ont été validées par des tests sur une maquette témoin (maquette testée deux fois à deux dates différentes) pour ce qui concerne la géométrie et la répartition des efforts.

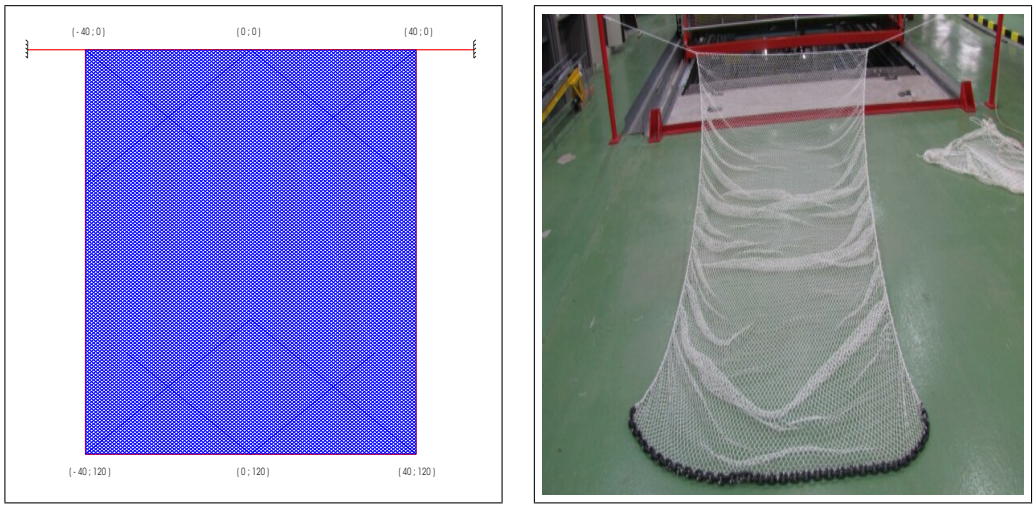
VI.2.1 Présentation des maquettes

La société de confection de chalut COPEBO a réalisé les trois maquettes de filet. Deux sont présentées en figures VI.3 et VI.4. Les maquettes munies de funes ont été testées dans le bassin : la première est dite 1232 référence (le 1^{er} chiffre "1" signifie que la maquette est tendue par deux funes de longueur 1 m, le $2^{ème}$ chiffre "2" signifie qu'une corde de longueur 2 m cousue à la partie supérieure de la maquette, le $3^{ème}$ chiffre "3" signifie que chaque côté (gauche et droite) de la maquette est cousue à une corde de longueur 3 m et le $4^{ème}$ chiffre "2" signifie qu'une chaine de longueur 2 m est cousue à la partie inférieure de la maquette). La deuxième maquette est dite 1232 optimisée et la troisième témoin est la 1242.

Les fils de filet sont de type "Alèze PA Tissu 600 MS 22 mm". Chaque côté d'une

maille est de longueur 22 mm et de diamètre 1,75 mm. Les funes et les cordes sont en polyamide, de 6 mm de diamètre. Les funes sont de 1 m de longueur, la corde supérieure est de longueur 2 m, les cordes des côtés sont de longueur 3 m chacune pour une maquette de type 1232 et 4 m pour une maquette de type 1242. La chaine cousue à la partie inférieure est en acier, de longueur 2 m et de densité 2,25 kg/m.

La figure VI.3 montre le plan et le photo de la maquette 1232 référence avant de la plonger dans l'eau. La figure VI.4 montre la maquette 1232 optimisée. Sur les nœuds (à gauche sur les figures) sont marquées les coordonnées en nombre de mailles. Chaque plan est symétrique par rapport à l'axe vertical.

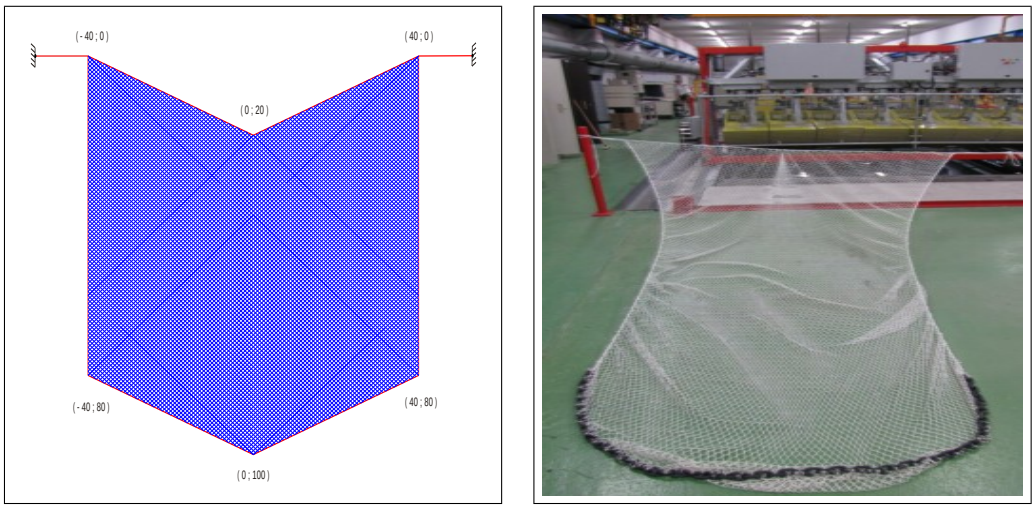


(a) (b)

Figure VI.3 : (a) Plan de la maquette 1232 référence avec les coordonnées en nombre de mailles. (b) Photo.

VI.2.2 Dispositif expérimental

Les funes permettent de fixer la nappe d'alèse à des capteurs de traction de 50 DaN et de mesurer ainsi l'effort de traction dans celles-ci. L'imersion du dispositif est rendue possible par deux bras verticaux de la passerelle de traction du bassin, qui autorise un positionnement précis dans les trois axes. La figure VI.5 ci-dessous illustre ce dispositif. Les points P1, P2, P3 et P4 (fig. VI.5) sont les points de relevés géométriques nécessaires pour la comparaison avec la simulation numérique. Ces relevés sont effectués à l'aide d'une lunette de visée permettant de déterminer la coordonnée X (horizontal) et Z (vertical) des points de mesures. Une chaîne d'acquisition de mesure National Instrument



(a) (b)

FIGURE VI.4 : (a) Plan de la maquette 1232 optimisée avec les coordonnées en nombre de mailles. (b) Photo.

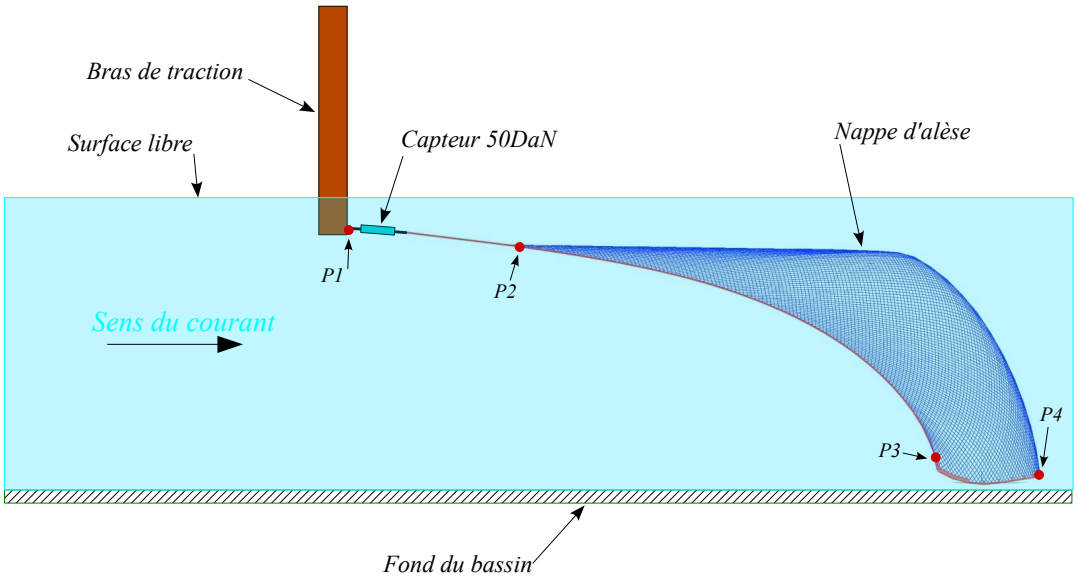


FIGURE VI.5 : Dispositif expérimental, les positions des mesures géométriques (P1 à P4) sont notées par un rond.

permet d'acquérir les données des capteurs de traction. La chaîne est composée d'un châssis SCXI1000, d'une module numériseur SCXI1600, d'une carte de conditionnement de signaux SCXI1520 et d'un bornier de connection SCXI1314T. Les mesures sont réalisées à une fréquence d'acquisition de 100 Hz pendant une durée de 100 s. En plus des valeurs moyennes, le fichier comprenant le signal temporel de chaque mesure est conservé. Dans cette étude nous n'utilisons que les valeurs moyennes.

VI.2.3 Protocole expérimental

L'alèse est déployée dans le courant pour trois vitesses de veine différentes : 0,6 m/s, 0.8 m/s et 0.96 m/s et à trois écartements différents entre les bras de traction tirants les funes 220, 270 et 320 cm. Pour chacun de ces cas nous mesurons :

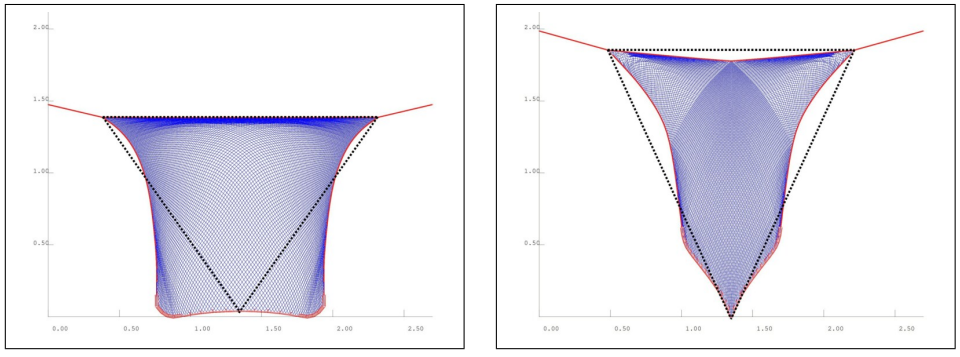
1. Grâce à la lunette de visée, les coordonnées X (selon l'écoulement) et Z (verticale) des points de relevé géométrique P1, P2, P3, et P4 nécessaires pour la comparaison avec la simulation.

2. Les tensions de funes (T_t et T_b) à tribord et babord.

3. Les angles vertical (α) et horizontal (β) des funes au compas. De ces mesures nous calculons la traînée totale (T) :
   $T = T_b \cos\alpha \cos\beta + T_t \cos\alpha \cos\beta$.

4. La surface balayée : Comme il y a peu de points géométriques, la surface balayée est estimée à la surface du triangle dont les sommets sont les extrémités des deux funes et le milieu de la chaîne (fig. VI.6).

Dans ces conditions la moitié de l'ouverture de la corde haute (H) et la surface balayée sont données par :
$H = (EcartBras/2)\breve{}((tg\beta \times \pi/180) \times (X_{FinFune(P2)}\breve{}X_{DebutFune(P1)}))$;
Surface balayée estimée $= H \times (Z_{FinFune(P2)}\breve{}Z_{MilieuChaine(P4)})$.



(a) (b)

Figure VI.6 : Surface balayée estimée par le triangle pointillé. (a) le filet 1232 référence et (b) la maquette optimisée.

VI.2.4 Maquette témoin 1242

La maquette témoin (1242) montre un bon accord avec les résultats de simulation concernant la tension dans les funes (inférieure à 10% dans tous les cas testés dont un seul cas est présenté dans tab. VI.1) contrairement à ce que nous avions obtenu pour l'essai de maquette de chalut (§ VI.1). Cependant, les formes géométriques mesurées sont un peu plus amples que celles simulées surtout dans la partie basse au niveau des points P3 et P4 (fig. VI.7). Il est à noter que cette maquette a été mesurée à deux instants différents (un mois d'écart), les mesures d'effort montrant une différence de 7% avec un petit écart dans les résultats géométriques (tab. VI.1).

Maquette 1242				
Différence (%)	**Début Sep**		**Fin Sep**	
Tension	1		8	
	X_{diff1}	Z_{diff1}	X_{diff2}	Z_{diff2}
Fin fune P2(X2,Z2)	20	-50	9	-60
Début chaine P3(X3,Z3)	1	-18	-1	-28
Milieu chaine P4(X4,Z4)	2	-16	0	-23

Tableau VI.1 : Comparaison des mesures (en %) de la maquette témoin (1242) entre deux essais en bassin à deux dates différentes (début et fin septembre) avec les résultats de la simulation. Les résultats sont pris à une vitesse 0,8 m/s et un écartement entre les bras 270 cm.

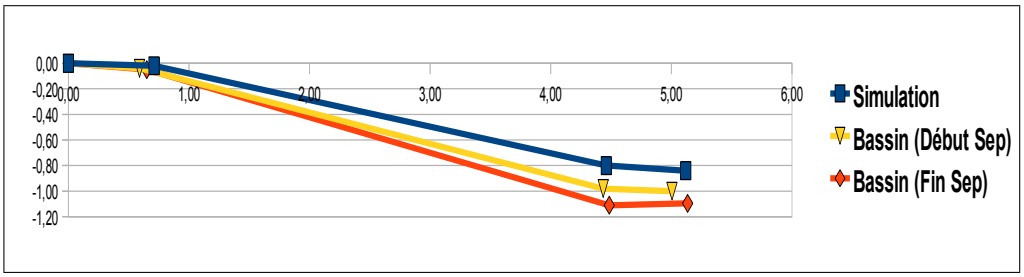


Figure VI.7 : Positions géométriques de la maquette témoin (1242) selon la simulation avec deux essais en bassins à deux dates différentes (Début septembre et fin septembre) à une vitesse 0.8 m/s et un écartement entre les funes de 270 cm. X horizontalement et Z verticalement en m.

VI.2.5 Maquettes 1232 référence et optimisée

Étant donné que les dimensions de la nappe d'alèse 1242 sont trop grandes pour un déploiement dans la veine d'eau, nous avons fait réaliser une maquette (1232) de 2m×3m pour qu'elle ne touche pas le fond.

Pour la maquette de référence 1232, les efforts réels dans les funes sont plus faibles que ceux de la simulation, environ 22% de moins (23% dans le cas d'un écartement de 270 cm et une vitesse de 0,6 m/s présenté dans tab. VI.2). Les formes des maquettes numériques et expérimentale semblent similaires avec des petites différences surtout pour les points P3 et P4 (figs. VI.5 et VI.8) où l'on peut relever en moyenne un écart de 20 cm (fig. VI.9). Nous remarquons également quelques différences de forme sur les figures (fig. VI.8) entre l'expérimental à droite et le numérique à gauche. En effet, le "dos" de la forme numérique est marqué par une "cassure" franche que le nous ne percevons pas sur celle de l'expérimentale.

Maquette 1232				
Différence (%)	X_{ref}	Z_{ref}	X_{opt}	Z_{opt}
Fin fune P2(X2,Z2)	-4	-36	-9	-31
Début chaine P3(X3,Z3)	0	-14	0	-21
Milieu chaine P4(X4,Z4)	0	-11	0	-11
	Référence		**Optimisé**	
Tension	23		-34	
Traînée	22		-38	
Surface balayée	-13		-19	
Fonction objectif	39		-24	

Tableau VI.2 : Comparaison des résultats (en %) entre le bassin et la simulation pour les maquettes 1232 référence et optimisée, à une vitesse 0,6 m/s et un écartement entre les funes de 270 cm.

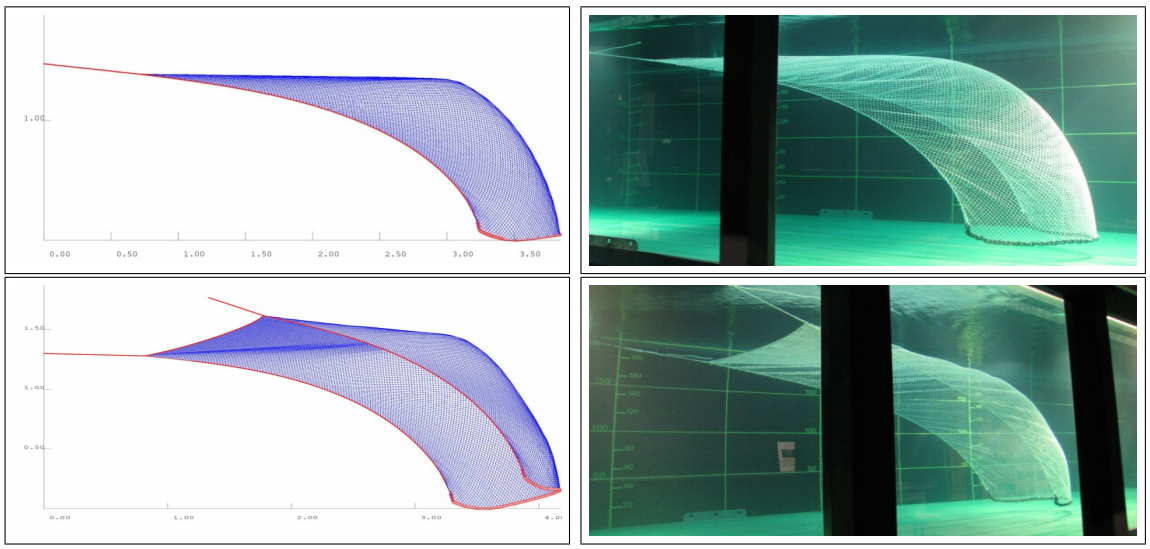


FIGURE VI.8 : Vues de la maquette 1232 référence (bassin (droite) et simulation (gauche)) à une vitesse de 0,6 m/s et un écartement entre les funes de 270 cm.

En ce qui concerne la maquette optimisée, nous constatons effectivement une réduction de la tension dans les funes et par conséquent une diminution de la fonction objectif par

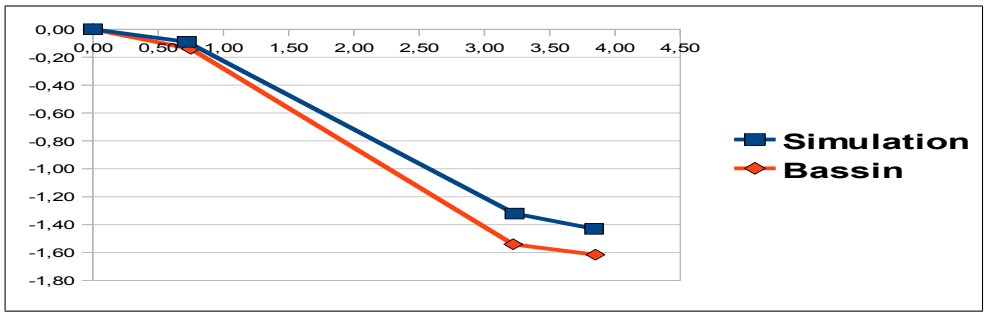


FIGURE VI.9 : Comparaison des positions relatives des points P1, P2, P3 et P4 expérimentaux et numériques pour la maquette référence 1232, à une vitesse 0,6 m/s et un écartement entre les bras de 270 cm. X horizontalement et Z verticalement en m.

rapport à la maquette de référence. Cette réduction est d'environ 33% comme étant la moyenne entre les trois vitesses de traction testées (34% dans le cas d'un écartement de 270 cm et une vitesse de 0,6 m/s présenté dans tab. VI.2). Les différences de formes géométriques sont, quant à elles, moins marquées que pour la maquette de référence. En effet, les points P3 et P4 présentent une différence maximale d'environ 20 cm (fig. VI.11). Cependant, les figures montrent un dos plus bombé que dans la simulation comme le montre la figure VI.10, nous constatons un gonflement du filet dans le bassin qui n'est pas observé en simulation. Ainsi nous observons que la chaîne simulée a une forme anguleuse alors qu'en bassin elle a une forme arrondie non singulière.

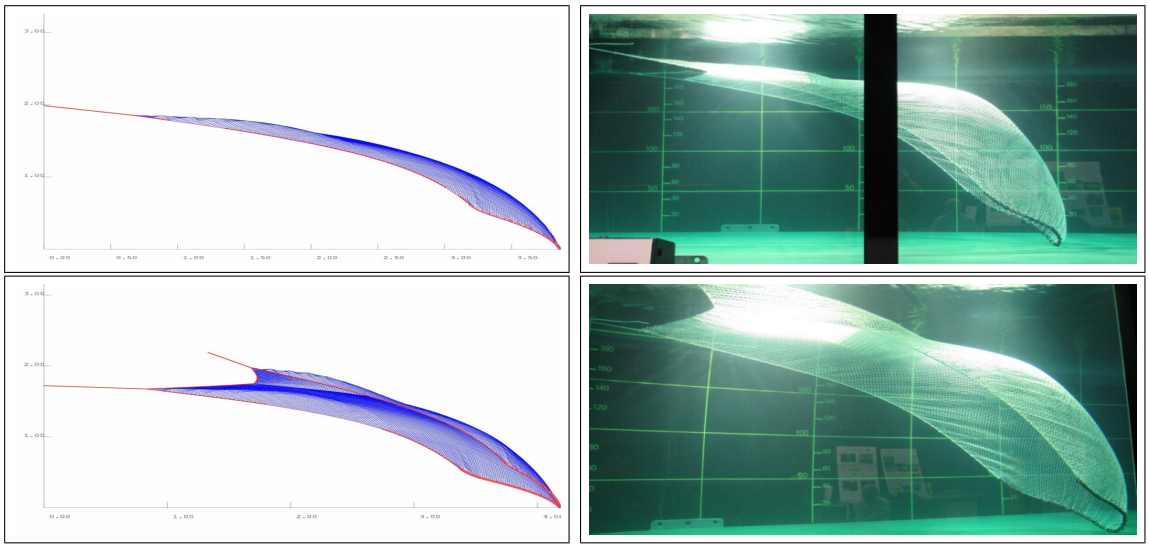


FIGURE VI.10 : Vues de la maquette 1232 optimisée (bassin (droite) et simulation (gauche)) à une vitesse de 0,6 m/s et un écartement entre les funes de 270 cm.

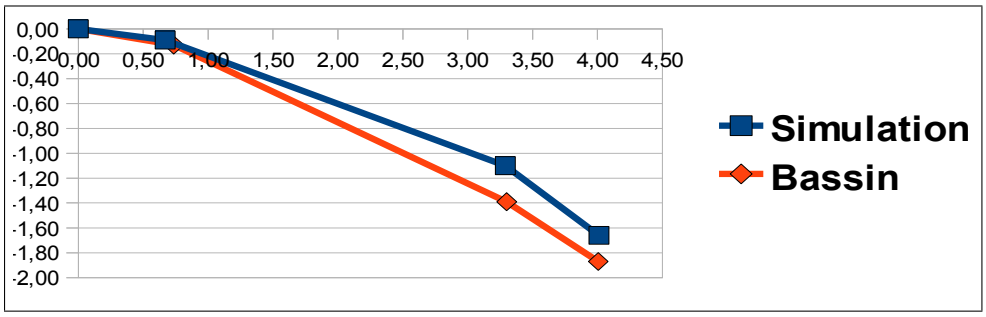


FIGURE VI.11 : Comparaison des positions relatives des points P1, P2, P3 et P4 expérimentaux et numériques pour la maquette 1232 optimisée, à une vitesse 0,6 m/s et un écartement entre les bras de 270 cm. X horizontalement et Z verticalement en m.

VI.3 Discussion et conclusions sur les essais en bassin

Nous avons fait des mesures en bassin sur une pièce de filet rectangulaire avec trois écartements (220 cm, 270 cm et 320 cm) entre les capteurs et à trois vitesses d'écoulement d'eau (0,6 m/s, 0,8 m/s et 0,96 m/s). Tout d'abord nous avons noté les points suivants :

1. Il y a une non-uniformité dans la section des fils du filet (le diamètre varie de 1,5 mm à 2 mm). Nous avons opté pour une valeur moyenne de 1,75 mm pour la simulation alors que le plan des maquettes indique une valeur de 2 mm.
2. Les mesures des capteurs indiquent une variabilité non-stationnaire (variation temporelle de la valeur moyenne et de l'écart-type) des efforts (non montrée ici).
3. Il peut y avoir une différence entre les conditions de bord concernant l'écoulement de fluide entre le bassin et la simulation. La géométrie ouverte de la maquette peut provoquer le détournement de l'écoulement du courant d'eau vers le bas. Par contre, lorsque nous testons une géométrie fermée (maquette de chalut), mesure et simulation concordent.
4. Les paramètres de raideur en flexion de la chaîne peuvent différer entre la simulation et l'essai en bassin ce qui peut expliquer la différence de courbure de la chaîne.

En fin de compte, nous pouvons récapituler de la manière suivante :

1. Pour la maquette 1232 de référence, il y a accord approximatif entre mesures de bassin et simulation en ce qui concerne la géométrie avec un excès aux alentours de 22% dans les efforts simulés par rapport à ceux mesurés.
2. Pour la maquette optimisée, il y a une différence entre la géométrie observée et celle obtenue par simulation : la chaîne simulée a une forme anguleuse alors qu'en

bassin elle a une forme arrondie non singulière. D'autre part, nous constatons un gonflement du chalut dans le bassin (près de la chaîne) qui n'est pas observé en simulation. Ceci est probablement dû à une différence entre les conditions de bord entre bassin et simulation. Finalement il y a un déficit (-40%) entre les efforts simulés par rapport à ceux mesurés.

3. Pour la maquette témoin qui a été mesurée à deux instants différents (à un mois d'écart), les mesures d'effort diffèrent de 7% et il y a aussi un petit écart dans les résultats géométriques (tab. VI.1).

Chapitre VII

Discussion et conclusion

Ce travail de thèse est consacré à l'optimisation des chaluts de pêche (pélagique et de fond), afin d'améliorer leur efficacité énergétique. Ceci se traduit par la minimisation du ratio traînée du chalut sur la surface de la gueule. Nous avons fait une évaluation des méthodes d'optimisation applicables à ce type de problème (chapitre III) puis, dans le but de les comparer, nous avons adapté certaines de ces méthodes à un exemple simple de filet triangulaire. Cette comparaison porte sur la convergence vers l'optimum global et sur la vitesse de convergence. Le choix de la méthode doit prendre en compte à la fois ses performances mais aussi sa capacité à intégrer les contraintes propres à la conception d'un chalut. Ce choix nous a conduit à développer et appliquer, sur deux types de chaluts, les méthodes SOT, RS et SRT. L'utilisation des méthodes d'optimisation a été validée par des essais en bassin.

Dans les paragraphes suivants, nous allons synthétiser notre travail par des discussions concernant les méthodes d'optimisation et nous terminerons par la conclusion générale et les perspectives.

VII.1 Discussion

VII.1.1 Application de SOT aux chaluts pélagiques

L'efficacité énergétique des chaluts est grandement affectée par la traînée du chalut, ainsi que par la surface balayée. La traînée entraine une augmentation de la consommation d'énergie et la surface balayée par la gueule dans le cas de chaluts pélagiques affecte la

capture de poisson. Pour améliorer l'efficacité énergétique des chaluts de pêche, nous avons développé une méthode d'optimisation appelée SOT applicable aux chaluts pélagiques, en minimisant une fonction objectif formée par le ratio de la traînée du chalut sur sa surface balayée qui sont calculés par un modèle d'éléments finis.

Afin d'estimer l'efficacité de cette méthode déterministe d'optimisation (SOT), nous avons implémenté une méthode aléatoire appelée RS afin de comparer les résultats obtenus.

VII.1.1.1 Comparaison avec la méthode RS

La méthode SOT donne un meilleur résultat (réduction de 54% pour PR égal à 8%) que celle fondée sur la recherche aléatoire RS (réduction de 33% pour PR égal à 16%). La forme du chalut obtenue par la première méthode semble également meilleure que celle obtenue par la seconde méthode, surtout dans la partie arrière du chalut, qui est plus régulière avec la première méthode. La méthode RS modifie aléatoirement toutes les pièces du filet alors que nous avons vu que les pièces situées dans la gueule du chalut avait une importance prédominante sur la traînée globale de l'engin. Cette méthode induit éventuellement des modifications géométriques importantes ce qui n'est pas le cas de la méthode déterministe de par sa spécificité (d'où la notion de démarcation entre les deux méthodes RS et SOT).

Ce travail a fait l'objet d'un article pour une conférence internationale en Turquie (2009) que j'ai présenté : "*Comparison between two methods of trawl optimisation*", D. PRIOUR & R. KHALED. 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean. IMAM 2009, Istanbul, Turkey, 12-15 Oct. 2009.

VII.1.1.2 Application du principe d'homothétie

Le processus d'optimisation seul donne une amélioration de 54% de la consommation de carburant par application de la méthode SOT. Cette amélioration s'accompagne d'une forte augmentation de la surface de la gueule donc du potentiel de l'effort de pêche. Pour conserver la surface de la gueule, nous avons appliqué le principe d'homothétie. Celle a réduit l'amélioration à 39%. Cela signifie que la réglementation de l'effort de pêche par la limitation de la surface de la gueule peut conduire à des engins de pêche moins efficaces.

Une autre alternative pour réduire l'effort de pêche est de réduire le temps passé en mer afin d'avoir le même volume filtré par an entre le chalut de référence et l'optimisé.

Ce travail a fait l'objet d'une présentation et d'un article pour une conférence internationale au Japon (2009) : "*Optimisation of trawl energy efficiency under fishing effort constraint*", D. PRIOUR & R. KHALED. The nineth international workshop on methods for the development and evaluation of marine technologies, Japan, Nara, November 5-7, 2009.

VII.1.2 Application de SOT sur les pièces de filet d'un chalut de fond sans tenir compte de la distribution de poisson

Dans ce cas, nous avons appliqué l'outil d'optimisation SOT sur un chalut de fond. L'objectif était de minimiser la fonction objectif formée par le rapport de la traînée du chalut sur la largeur balayée.

Nous avons montré que la meilleure réduction est de 38% pour un pourcentage de modification (PR) de 32%. Par contre, nous avons observé que l'ouverture verticale de la gueule est passée de 3,6 m (chalut référence) à 1,8 m (optimisé) ce qui peut provoquer une diminution de la capture. Nous avons alors choisi le pourcentage de modification 8% qui satisfait une bonne réduction de la fonction objectif (17%) et qui garantit au moins la même ouverture verticale. Dans ces conditions l'ouverture horizontale augmente de 21%, ce qui affecte d'autant le potentiel de capture.

Dans le cas de réglementations de la pêche qui imposent des quotas de capture l'outil d'optimisation (SOT) conduit à réduire le nombre de jours de pêche de 260 à 215 jours, afin de garder la même surface balayée annuelle.

Le problème de l'influence de l'optimisation sur l'ouverture verticale lorsque la fonction objectif égale à la traînée sur la largeur balayée nous a amené au choix d'une fonction objectif dépendante de la distribution verticale de poisson.

Nous avons présenté ce travail dans deux articles (un comme résumé étendu) pour deux conférences internationales en Espagne (2010) et au Etats Unis (2010) : "*Numerical method for energy optimisation of bottom trawl*", R. KHALED & D. PRIOUR.
a- First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency. e-fishing, Vigo, Spain, May 2010 ;

b- Energy Use in Fisheries Congress, Seattle, USA, November 2010.

VII.1.3 Application de SOT sur les pièces de filet d'un chalut de fond en tenant compte de la distribution de poisson

Dans cette partie, nous avons étudié l'optimisation SOT, appliquée sur les pièces du filet. Cette application a conduit à une amélioration substantielle en terme d'économie d'efficacité énergétique pour le chalut de fond (16% à 52%). Cette amélioration significative dépend de la distribution spatiale des poissons.

Cette méthode d'optimisation met en œuvre une fonction objectif égale au rapport de la traînée sur la surface balayée effective. Cette surface balayée effective est égale à la surface d'intersection entre la gueule et la distribution de poisson. Des distributions uniformes (jusqu'à 3 et 6 mètres de hauteur) et une troisième non uniforme (variation spatiale linéaire jusqu'à 6 m de hauteur) ont été considérées dans notre étude.

Nous avons soumis ce travail au journal "Ocean Engineering - Elsevier" : "*Numerical optimization of trawl energy efficiency dependent of fish distribution*", Ramez KHALED, Daniel PRIOUR & Jean-Yves BILLARD.

VII.1.4 Influence d'une prise de poisson sur l'efficacité du chalut

Le but de cette étude est de vérifier si le chalut optimisé maintient sa capacité de capture et d'économie de carburant, et par conséquent, de vérifier l'efficacité de la méthode d'optimisation.

Cette étude montre que le volume de poisson pris dans le chalut a peu d'influence sur la traînée. Une augmentation de 2% est observée pour deux distributions de poisson : constante jusqu'à 3 m de hauteur et linéaire jusqu'à 6 m de hauteur. Par contre aucune augmentation n'a été observée pour la troisième (constante jusqu'à 6 m de hauteur). L'influence de la prise est plus significative sur la surface de la gueule : elle est diminuée de 28% pour la distribution constante de poisson jusqu'à 6 m de hauteur. Pour les deux autres distributions, la surface balayée est diminuée de 22%.

La prise de poisson dégrade la réduction de la fonction objectif. Cette réduction passe de 52%, 16% et 33% pour un chalut sans prise à 37%, 15% et 22% avec prise pour

trois distributions de poisson respectivement (6m, 3m et linéaire). Cette dégradation de l'amélioration de la fonction objectif vient du rétrécissement de la surface balayée.

VII.1.5 Application de SRT sur les pièces de filet d'un chalut de fond en tenant compte de la distribution de poisson

L'approche d'optimisation SRT développée conduit à une amélioration substantielle en termes d'efficacité énergétique à l'égard de la méthode SOT. Toutefois, dans certains cas, elle conduit à des altérations importantes dans le plan du chalut. Cela est dû au fait que la méthode SRT diffère de SOT de la façon suivante : SOT se réfère toujours au chalut référence pour chaque pourcentage de modification (PR). Par contre SRT, à chaque modification du PR, se réfère au chalut optimisé généré par l'optimisation avec le pourcentage de modification précédent. En fait, c'est l'un des facteurs induisant la grande déformation géométrique dans le plan de certaines pièces du filet. D'où la nécessité d'intégration d'un système de contraintes géométriques locales au processus de l'optimisation pour restreindre dans certaines limites la déformation des pièces du filet. Cette procédure n'a pas été réalisée.

VII.1.6 Application de SOT sur les câbles d'un chalut de fond

L'optimisation basée sur la modification des longueurs des câbles est bénéfique pour la consommation de carburant. Ici, nous modifions les longueurs des câbles du chalut, tout en maintenant les pièces de filet inchangées. Une modification de longueurs des câbles sans changement du plan des pièces du filet est moins onéreuse pour les pêcheurs que la modification des pièces du filet.

Cette optimisation donne une amélioration substantielle en termes d'économies d'efficacité énergétique pour le chalut de fond (environ 49% pour la distribution constante jusqu'à 6 m de hauteur). Il apparaît que l'amélioration est principalement due à l'augmentation de la surface effective (97%) et non à la traînée (augmentation de 1%).

Nous avons soumis ce travail dans un article journal pour "Ocean Engineering - Elsevier" : "*Cable length based optimization for reduction of trawl fuel consumption*", Ramez KHALED, Daniel PRIOUR & Jean-Yves BILLARD.

VII.2 Conclusion générale

L'industrie de la pêche est confrontée à plusieurs contraintes comme l'augmentation du prix du carburant et la diminution des stocks de poisson. Afin d'explorer des voies d'amélioration de la rentabilité de cette industrie, nous avons étudié l'optimisation des chaluts pour améliorer leur efficacité énergétique. Deux facteurs principaux ont été utilisés pour la fonction objectif : la traînée du chalut et la surface balayée. Selon la distance parcourue la traînée entraine une consommation d'énergie et la surface balayée impacte la capture de poisson.

Dans la littérature il existe des travaux ciblant l'économie d'énergie du chalut par exemple par modification du diamètre des fils du filet ou de la taille des mailles des pièces du filet. Notre travail se concentre sur l'optimisation du plan du chalut par modification du nombre de mailles des pièces du filet et par changement de la longueur des câbles du chalut. La variation dans notre outil d'optimisation dépend d'un pourcentage de modification appelé PR exprimé en nombre de mailles ou en longueur de câbles.

– Dans un premier temps, nous avons développé une méthode d'optimisation de recherche successive par paramètre appelée SOT pour l'appliquer au chalut pélagique et nous l'avons comparée à une méthode de recherche aléatoire, l'objectif étant de minimiser le rapport de la traînée sur la surface balayée en modifiant le nombre de mailles par pièce du filet.

La méthode SOT a donné de meilleurs résultats que la méthode aléatoire : d'une part, 54% d'amélioration d'efficacité contre 33% et d'autre part un plan de chalut moins perturbé donc plus facilement accepté par les professionnels.

Afin de conserver la même capacité de capture, ce qui peut être imposée sur certaines pêcheries, nous avons appliqué une technique d'homothétie pour réduire simultanément la surface de la gueule (la capacité de capture) et la traînée (la consommation d'énergie). L'amélioration de l'efficacité énergétique est dans ce cas de 39%, c'est à dire une dégradation par rapport à une optimisation seule (54%). Une autre technique pour conserver la capacité de capture du chalut optimisé est de réduire le nombre de jours de pêche par an, dans ce cas l'amélioration de l'efficacité énergétique n'est pas dégradée.

– Dans un deuxième temps, nous avons appliqué cette méthode (SOT) pour optimiser le plan des pièces du filet d'un chalut de fond. Dans ce cas l'objectif est le rapport de la

traînée du chalut sur la largeur balayée. Une amélioration de l'efficacité énergétique de 38% a été obtenue, ainsi qu'un gain de 45 jours de pêche pour conserver la même surface balayée de fond de mer entre les chaluts référence et optimisé.

Par contre nous observons dans certaines conditions d'optimisation une réduction de l'ouverture verticale du chalut et par conséquent un risque de dégradation de la capturabilité. Ce qui nous a amené (dans un $3^{\text{ème}}$ temps) vers une autre fonction objectif.

– Dans un troisième temps, nous avons développé une fonction objectif qui dépend maintenant de la distribution de poisson au fond de la mer, ainsi l'optimisation ne dégrade pas l'ouverture verticale. Trois distributions de même densité surfacique ont été testées : constante jusqu'à 6 m de hauteur, constante jusqu'à 3 m de hauteur et linéaire jusqu'à 6 m de hauteur. L'amélioration de l'efficacité énergétique calculée par la méthode SOT sur un chalut de fond est respectivement de 52%, 16% et 32% selon les trois distributions.

Cependant, la surface de la gueule (pondérée par la distribution) s'en trouve considérablement augmentée jusqu'à 107%, 14% et 44% pour les trois distributions. Une diminution du nombre de jours de pêche de 135, 32 et 79 jours est donc proposée pour garantir le même volume d'eau filtré annuel et donc le même effort de pêche.

Nous observons que certaines modifications du plan sont identiques quelle que soit la distribution de poisson (cas du milieu du carré). L'explication tient au fait que la pièce de filet enlevée génère une traînée supplémentaire sans augmenter la surface de gueule du chalut.

– Dans un quatrième temps, nous avons développé la méthode d'optimisation SRT. Nous avons appliqué cette méthode au chalut de fond selon les trois cas de distribution de poisson (précédemment définis). Nous obtenons des réductions d'objectifs de 56%, 30% et 39% respectivement pour les distributions constante sur 6 m, constante sur 3 m et linéaire sur 6 m. Cependant les plans sont fortement altérés, ce qui peut ne pas être acceptables par les professionnels. Nous avons toujours la possibilité de choisir un compromis entre des améliorations significatives et un plan de chalut peu altéré.

– Finalement nous avons adapté la méthode SOT pour optimiser les longueurs des câbles du chalut, pour les trois distributions de poissons précédemment décrites.

Nous obtenons une amélioration de l'efficacité énergétique de 49%, dans le cas d'une distribution uniforme sur 6 m. Nous remarquons d'une part que seulement quelques câbles

(~ 3) participent significativement à cette amélioration, et d'autre part cette amélioration est essentiellement liée à l'augmentation de la surface balayée (+97%) et non à la traînée (+1%). Cette amélioration est très dépendante de la distribution de poisson, d'où l'importance de sa quantification avec les professionnels et les biologistes.

VII.3 Perspectives

La distribution de poisson influe sur le processus d'optimisation comme nous l'avons vu. C'est pourquoi il est d'une importance capitale de discuter de la distribution de poisson avec les biologistes et les pêcheurs. Nous avons vu également dans les plans des chaluts que l'optimisation conduit parfois à des coupures de pièces qui ne sont pas droites. Une coupe non droite pourrait être inacceptable pour les pêcheurs. C'est pourquoi nous devons introduire de nouvelles contraintes géométriques sur les coupes de pièces de filet afin d'éviter les coupes non droites, ou du moins être en mesure de prendre en compte les demandes des pêcheurs.

Notons que les résultats de l'optimisation montrent parfois une variation de traînée pour les chaluts optimisés. Cette variation pourrait conduire à des discussions avec les pêcheurs au sujet de la possibilité d'ajuster les surfaces des panneaux ou de l'efficacité de l'hélice du bateau. Dans notre étude, ces paramètres sont constants par hypothèse. Dès lors, si ces paramètres (surface des panneaux et efficacité de l'hélice) devaient être inclus dans le processus d'optimisation, et si la relation entre la traînée et ces paramètres est connue alors ils pourraient être pris en compte dans les études futures.

L'optimisation ne prend pas en compte le fait que les câbles doivent avoir leurs longueurs plus petites que celles des côtés de pièces de filet sur lesquels ils sont cousus. Nous pouvons introduire ces contraintes dans l'algorithme pour résoudre ce problème. Nous appelons ces contraintes locales en contraste avec celles considérées comme globales dans la simulation impliquant le plan entier du chalut. Rappelons que nous avions optimisé précédemment la géométrie des pièces de filet en nombre de mailles sans la contrainte exprimant le fait que la longueur du côté de la pièce doit être plus grande que la longueur du câble sur lequel elle est cousue.

Cet ensemble de contraintes géométriques seront traitées dans de futurs travaux ainsi

que l'optimisation simultanée des pièces de filet et des câbles.

Toutes ces remarques nous conduisent à favoriser parmi les différentes approches d'optimisation que nous avons adaptées auparavant (au cas du filet simple, cf. chapitre III) celle qui tiendrait compte des contraintes géométriques spécifiques locales et globales et des desiderata des pêcheurs. D'après nos travaux, la plus prometteuse, et celle que nous préconisons pour le futur est la méthode mixte (recuit simulé avec simplex).

Le travail numérique entrepris a été en partie validé par des essais sur des maquettes. Il a montré qu'il y avait dans certains cas une différence, jusqu'à 30%, entre les efforts mesurés et ceux calculés par simulation.

Les modèles de traînée de filet sont principalement mis en cause, en effet, à présent les modèles ne prennent en compte que la vitesse d'eau à l'amont et l'angle d'attaque vis à vis des fils. A l'avenir ces modèles devront prendre en compte l'écoulement perturbé par la structure, la solidité du filet (rapport entre la surface de fils et la surface du filet) et l'angle d'attaque.

Dans notre approche nous avons opté pour optimiser la structure en minimisant un objectif constitué du rapport T/S, T est la traînée de la structure et S est une surface de capture. Nous pourrions aborder cette étude comme un problème d'optimisation multiobjectif. Il s'agit alors d'atteindre plusieurs objectifs qui peuvent être contradictoires. Dans notre cas ces objectifs seraient la traînée et la surface de capture.

L'optimisation consiste alors non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima constituant une surface de compromis du problème équivalent. Ceci est appelé optimisation au sens de Pareto.

Publications

PAPIERS JOURNAL

1. "Numerical optimization of trawl energy efficiency dependent of fish distribution", Ramez KHALED, Daniel PRIOUR & Jean-Yves BILLARD. *Soumis à Ocean Engineering - Elsevier.*

2. "Cable length based optimization for reduction of trawl fuel consumption", Ramez KHALED, Daniel PRIOUR & Jean-Yves BILLARD. *Soumis à Ocean Engineering - Elsevier.*

PAPIERS CONFERENCE

1. "Comparison between two methods of trawl optimisation", D. PRIOUR & R. KHALED. *13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean (IMAM 2009)*, Istanbul, Turkey, 12-15 Oct. 2009.

2. "Optimisation of trawl energy efficiency under fishing effort constraint", D. PRIOUR & R. KHALED. *The nineth international workshop on methods for the development and evaluation of marine technologies (DEMAT 2009)*, Nara, Japan, November 5-7, 2009.

3. "Numerical method for energy optimisation of bottom trawl", R. KHALED & D. PRIOUR.
   - *First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency (e-fishing)*, Vigo, Spain, May 2010.
   - *Energy Use in Fisheries Congress*, Seattle, USA, November 2010.

4. "Energy efficient optimisation method for bottom trawl", D. PRIOUR & R. KHALED. *French-Japanese Symposium*, Ifremer, Sête, France, 1-3 September 2010.
5. "HydroPêche : results of a three years project carried out to improve energy efficiency of fishing devices", G. Germain, E. Bouhoubeiny, P. Druault, D. Priour, R. Khaled, J-Y Billard, B. Vincent & I. Mnassri. *2nd International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency (e-fishing)*, Vigo, Spain, May 2012.

Annexes

Annexe A

Méthode de Newton-Raphson

L'objectif de cette méthode est d'estimer la position d'équilibre ($\mathbf{X}_{final}$), c'est-à-dire telle que la somme des efforts à cette position soit nulle :

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_{final}) = \mathbf{0} \tag{A.1}$$

$\mathbf{X}$: Vecteur des coordonnées des nœuds (m),
$\mathbf{F}$: Vecteur des efforts sur les nœuds (N).

La méthode de Newton-Raphson est utilisée pour obtenir cette position ($\mathbf{X}_{final}$) à partir d'une position initiale non équilibrée ($\mathbf{X}_{initial}$). Cette méthode itérative repose sur la définition de la dérivée :

$$F'(\mathbf{X}) = \lim_{\mathbf{h}\to\mathbf{0}} \frac{\mathbf{F}(\mathbf{X}+\mathbf{h}) - \mathbf{F}(\mathbf{X})}{\mathbf{h}} \tag{A.2}$$

F' : Dérivées des efforts relativement aux positions (N/m),
$\mathbf{h}$: Vecteur déplacements des nœuds (m).

Le déplacement $\mathbf{h}$ est recherché tel que $\mathbf{X}+\mathbf{h}$ soit à l'équilibre. Dans ces conditions :

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}+\mathbf{h}) = \mathbf{0} \tag{A.3}$$

La définition de la dérivée donne alors :

$$\mathbf{h} = \mathbf{F}(\mathbf{X})(-F'(\mathbf{X}))^{-1} \tag{A.4}$$

Le terme $-F'(\mathbf{X})$ est appelé matrice raideur de la structure. Bien évidemment $\mathbf{h}$ peut être grand ce qui signifie que la définition de la dérivée n'est pas parfaitement respectée. Un calcul itératif est donc nécessaire :

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_k &= \mathbf{F}(\mathbf{X}_k)(-F'(\mathbf{X}_k))^{-1}, \\ X_{k+1} &= \mathbf{X}_k + \mathbf{h}_k. \end{aligned} \tag{A.5}$$

avec k l'itération.

En d'autres termes, partant d'une position $\mathbf{X}_k$, $\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$ et $F'(\mathbf{X}_k)$ sont calculés, ensuite le déplacement $\mathbf{h}_k$ en est déduit et enfin la position suivante $\mathbf{X}_{k+1}$. Le calcul itératif est arrêté lorsque la convergence est atteinte par exemple lorsque l'effort $\mathbf{F}(\mathbf{X}_k)$ tend vers $\mathbf{0}$.

Bibliographie

[Bas] Bastardie F., Nielsen J. R., Andersen B. S., Eigaard O. R., 2010. Effects of fishing effort allocation scenarios on energy efficiency profitability : An individual-based model applied to Danish fisheries, Fisheries Research, Volume 106, Issue 3, Pages 501-516. 3

[Bes] Bessonneau J. S., 1997. Etude dynamique de surfaces réticulées souples et immergées. Thèse No.ED 82-264, Nantes : Ecole Centrale de Nantes. 11

[Bro] Brooks S. H., 1958. A Discussion of Random Methods for Seeking Maxima, The Computer Journal, Vol. 6, No. 2. 29

[Cle] Cleach M. P., Rapport sur l'apport de la recherche à l'évaluation des ressources halieutiques et à la gestion des pêches, Senat no 132, 11 décembre 2008. 5

[Des] Desai C. S., Abel J. F., 1972. Introduction to the finite element method, Van Nostrand Reinhold Compagny. 15

[Fer] Ferro R. S. T., 1988. Computer simulation of trawl gear shape and loading, Proceedings of word symposium on fishing gear and fishing vessel design, Pages 259-262. 13, 14

[Hoo] Hooke R., Jeeves T. A., 1961. ""Direct search" solution of numerical and statistical problems, Journal of the Association for Computing Machinery, vol. 8, No. 2, Pages 212-229. 34

[Huy] Huyer W., Neumaier A., 1999. Global optimization by multilevel coordinate search, J. Global Optimization, Vol. 14, Pages 331-355. 32, 69

[Iea] International Energy Agency, Oil Market Report : http ://omrpublic.iea.org. 2

[Ifr] Rapport de l'Ifremer sur l'économie d'énergie à la pêche : http ://wwz.ifremer.fr/peche/Les-defis. 2

[Kha] Khaled R., Priour D., Billard J-Y, 2011. Numerical optimization of trawl energy efficiency dependent of fish distribution (Submitted to Ocean Engineering). 66

[Kim] Kim H. Y., Lee C. W., Shin J. K., Kim H. S., Cha B. J., Lee G. H., 2007. Dynamic simulation of the behavior of purse seine gear and sea-trial verification, Fisheries Research, Volume 88, Issues 1-3, 109. 3

[Kir] Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Vecchi M. P., 1983. Optimization by Simulated Annealing, Science, Vol. 220, No. 4598, Pages 671-680. 42, 43, 45

[Led] Le Dret H., Lewandowski R., Priour D., Chagneau F., 2004. Numerical simulation of a cod-end net. part 1 : Equilibrium in a uniform flow, Journal of Elasticity, Vol. 76, No. 2, Pages 139-162. 10

[Lee] Lee C. W, Lee J. H, Cha B. J, Kim H. Y, Lee J. H, 2004. Modeling of underwater flexible structures and its application to the fishing gear system simulation, 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 20-25 2004, Vancouver. 11

[Mac] Macdonald P., Laurenson C., Johnson A., Tait L., 2007. Jig Fishing Pilot Study in Shetland Coastal Waters. NAFC Marine Centre, Fisheries development note N. 3

[Mas] Massé J., Koutsikopoulos C., Patty W., 1996. The structure and spatial distribution of pelagic fish schools in multispecies clusters : an acoustic study, ICES Journal of Marine Science, 53, 155-160. 54

[Met] Metropolis N., Rosenbluth A. W., Rosenbluth M. N., Teller A. H., Teller E., 1953. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, J. of Chem. Phys., Vol. 21, Pages 1087-1092. 42, 46

[Nel] Nelder J. A., Mead R., 1965. A Simplex Method for Function Minimization, Computer Journal, Vol. 7, Pages 308-313. 39, 45

[Nie] Niedzwiedz G., 2001. Model specification and further applications of the calculation of rope systems, contributions on the theory of fishing gears and related Marine systems, V IBSN 3-935319-88-6. 11, 13

[Par] Parente J., Fonseca P., Henriques V., Campos A., 2008. Strategies for improving fuel efficiency in the Portuguese trawl fishery, Fisheries Research 93 117-124. 4

[Pre] Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., 1992. Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge. 45, 46

[Pria] Priour D., 1999. Calculation of net shapes by the finite element method with triangular elements. Communications in Numerical Methods in Engineering, 15(10), 755-763. 9, 19, 24, 59

[Prib] Priour D., 1999. Study of a grid in a cod-end : numerical simulations, Proceedings of the fourth International Workshop on Methods for the development and Evaluation of Marine Technologies, Rostock, November, Pages 163-167. 14

[Pric] Priour D., 2005. FEM modeling of flexible structures made of cables, bars and nets, Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources - Guedes Soares, Garbatov & Fonseca (eds) 2005, Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 39036 2. 19

[Prid] Priour D., 2009. Numerical optimisation of trawls design to improve their energy efficiency, Fisheries Research, Vol. 98, Issues 1-3, Pages40-50. 58, 59, 66

[Prie] Priour D., Khaled R., 2009. Comparison between two methods of trawl optimisation, 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean, IMAM 2009, Istanbul, Turkey. 66

[Rep] Development of predictive model of cod-end selectivity, 2000. Final report to the European commission of the RTD project Fair Program, No. CT96 1555, Anonymous. 55, 83

[Rih] Rihan D., 2005. A comparison of twin-rig single-rig trawling in terms of relative fishing efficiency, in economic performance fishing efficiency of marine capture fisheries, FAO Fisheries Technical Paper 482, ISSN 0429-9345. 3

[Sal] Sala A., De Carlo F., Buglioni G., Lucchetti A., 2011. Energy performance evaluation of fishing vessels by fuel mass flow measuring system, Ocean Engineering, Article in Press. 3

[Sch] Schau E. M., Ellingsen H., Endal A., Aanondsen S. A., 2009. Energy consumption in the Norwegian fisheries, Journal of Cleaner Production, Volume 17, Issue 3, Pages 325-334. 3

[Stu] Study of factors affecting the variability of cod-end selectivity, 1998. Final Report of EC Contract No AIR2-CT94-1544, FRS Marine Laboratory, Aberdenn, Scotland. 55

[Tak] Takagi T., Shimizu T., Suzuki K., Korte H., 2007. Using a Netting Geometry Simulator to Develop Smart Fishing and Smart Gear, ASME 2007, 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2007) June 10-15 2007. 11

[The] Theret F., 1993. Etude de l'équilibre de surfaces réticulées placées dans un courant uniforme ; application aux chaluts, Thèse No. ED 82-31, Nantes : Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes. 11, 13

[Tho] Thomsen B., 2005. Efficiency changes in the Faeroese pair-trawler fleet, in Economic performance fishing efficiency of marine capture fisheries, FAO fisheries technical paper 482, ISSN 0429-9345. 3

[Troa] Tronstad H., Larsen C.M., Enerhaug B., 1997. Hydroelastic analysis of cable net tension structures based on FEM, International workshop on hydrodynamic aspects of fishing gear, Lorient, France, September. 14

[Trob] Tronstad H., Larsen C.M., Enerhaug B., Abderrahmane H., 1998. FEM in Multiobjective Design Optimization of Cable Net Structures, OMAE, Lisboa. 14

[Tsu] Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, Swift M. R., Celokkol B, 2003. Finite element modeling of net panels using a consistent net element, Ocean Engineering 30 (2003) p 251-270. 11

[Tye] Tyedmers P. H., Watson R., Pauly D., 2005. Fueling Global Fishing Fleets, Royal Swedish Academy of Sciences, Ambio Vol. 34, No. 8. 2

[Van] Vandekerckhove J., 2006. Simulated Annealing Code for MATLAB, Ver. 1.13, joachim.vandekerckhove@psy.kuleuven.be. 43

[War] Ward N., Montgomerie M., Lart W., 2005. Fuel efficiency trials using Jackson trawls with reduced twine diameter on MFV Challenge II Seafish Report No. SR578, p.31. 4

[Zie] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., 1991. The finite element method, McGraw-Hill Book Compagny, Fourth edition, Vol. 1 & 2. 15

Optimisation des engins de pêche en terme d'économie de carburant

Résumé : L'industrie de la pêche est confrontée à plusieurs contraintes comme l'augmentation du prix du carburant et la diminution des stocks de poisson. Pour améliorer la rentabilité, nous avons fait l'optimisation des chaluts de pêche (pélagique et de fond) afin d'augmenter leurs efficacités énergétiques. Deux facteurs principaux ont été utilisés : la traînée du chalut et sa surface balayée. Notre travail porte sur l'optimisation du plan du chalut par modification du nombre de mailles des pièces du filet et par changement de la longueur des câbles. Nous avons développé une méthode de recherche successive appelée SOT et nous l'avons comparée à une méthode de recherche aléatoire dans le cas d'un chalut pélagique avec un gain net de 54%. La SOT a été utilisée pour optimiser le plan des pièces du filet d'un chalut de fond. Une amélioration du gain énergétique de 38% a été obtenue, ainsi qu'une réduction de 45 jours de pêche. Par souci de risque de baisse de capturabilité, nous avons développé une fonction objectif qui dépend de la distribution de poisson. Trois fonctions de même densité surfacique ont été testées. L'amélioration de l'efficacité énergétique calculée par la méthode SOT sur un chalut de fond est respectivement de 52%, 16% et 32% selon les trois distributions. Avec la méthode SRT (méthode de raffinement séquentiel), nous obtenons des réductions de 56%, 30% et 39% pour les trois distributions. Finalement nous avons adapté la méthode SOT pour optimiser les longueurs des câbles du chalut. Nous obtenons dans un cas une amélioration de l'efficacité énergétique de 49%. L'utilité de ce travail devrait être étendue hors de la pêche comme l'écologie en général.

Mots-clés : optimisation, éléments finis, chalut pélagique, chalut de fond, économie d'énergie.

Optimization of fishing gear in terms of fuel consumption

Abstract : Nowadays, fishing industry is facing several constraints such as increased fuel prices and declining fish stocks. In this work, we perform optimization of fishing trawls (pelagic and bottom) in order to improve their energy efficiencies. Two main factors were used : the trawl drag and its mouth swept area. Our work focuses on optimizing trawl design by altering mesh numbers and changing cable length. We have developed a method called SOT and compared it to a random search method in the pelagic trawl case

with a net energy gain of 54%. The SOT was used in design optimization of bottom trawl panels. Improved energy gain of 38% was obtained and a reduction of 45 total number of fishing days. In order to bypass catchability reduction, we developed an objective function which depends on fish distribution. Three functions with same bottom surface density were tested. Improving energy efficiency calculated by the SOT method on a bottom trawl is respectively 52%, 16% and 32% for the three distributions. With the SRT method (sequential refinement), we obtain reductions of 56%, 30% and 39% for the three aforementioned distributions. Finally we adapted the SOT method to optimize trawl cable lengths. In one case, we obtain energy efficiency improved by 49%. The usefulness of this work should be extended beyond fishery to ecology in general.

Keywords : optimization, finite element, pelagic trawl, bottom trawl, energy saving.