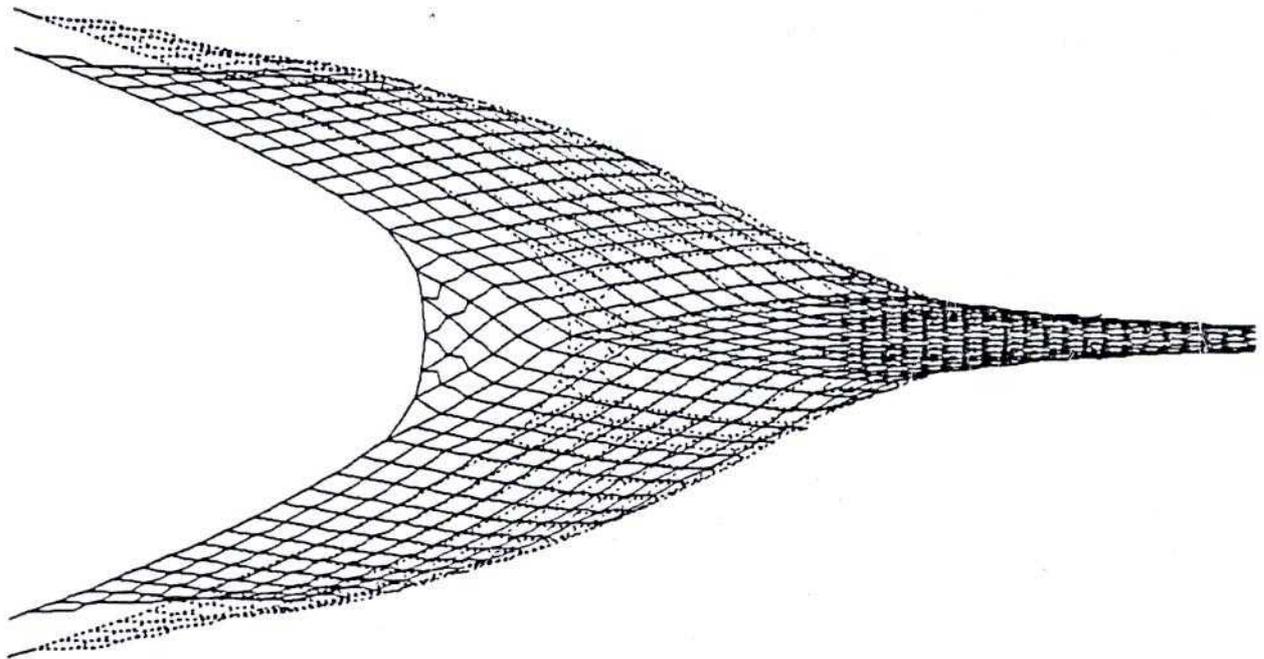


ETUDE DE L'EQUILIBRE DE SURFACES RETICULEES

PLACEES DANS UN COURANT UNIFORME

Application aux chaluts



François THERET

Station de LORIENT

8, rue François Toullec - 56100 LORIENT (France)

Téléphone : 97-87-73-10

Télex : 950 089

Télécopie : 97-83-41-06

Rapport numéro

DITI/GO/NPA/93.029

Titre : Etude de l'équilibre de surfaces réticulées placées dans un courant uniforme. Application aux chaluts.	Date : 08/07/93
Auteur : F. THERET	Nbre pages : 133
Origine : DITI/GO/NPA/TP/LORIENT	Nbre figures : 66
Contrat : IFREMER/CEE/FAR TE 2.543	N°analytique : 370111
Intitulé : C A T S	
Résumé : La détermination des formes et tensions d'une structure souple réticulée en équilibre dans un courant uniforme est un problème complexe. Dans cette étude, la structure considérée est un chalut dont seul le plan de coupe est, a priori, connu. La méthode itérative proposée permet de calculer les efforts hydrodynamiques exercés sur les côtés des mailles et la forme d'équilibre prise par le filet. Les difficultés de cette étude sont de trois ordres : <ul style="list-style-type: none">- le comportement hydrodynamique des mailles de filet est mal connu.- un chalut est une structure infiniment souple qui n'a pas de forme propre, seule l'action des forces extérieures lui permet de prendre une certaine configuration. Mais ces forces dépendent elles-mêmes de la forme prise par le filet; nous devons donc traiter un véritable problème de "couplage fluide-structure".- l'alèze d'un filet est un matériau anisotrope et discontinu. <p>Ce problème est résolu en écrivant les équations d'équilibre de tous les noeuds. On tient compte de la souplesse des côtés de mailles en introduisant des noeuds intermédiaires.</p>	
Mots clés : Surface réticulée - Couplage fluide-structure - Filet - Surface souple - Chalut - Maille - Efforts hydrodynamiques - Panneau .	

Ce document, propriété de l'IFREMER, ne peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation.

Diffusion

libre

Ce document est la reproduction d'une thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de L'Université de Nantes (N° ED 82-31) soutenue le 8 juillet 1993 à l'Ecole Centrale de Nantes.

SOMMAIRE

Avant-propos	5
INTRODUCTION	7
PARTIE 1 : PRESENTATION DU CHALUTAGE	11
1.1. Le chalut	13
1.1.1. Le chalut de fond	14
1.1.2. Le chalut pélagique	15
1.2. Le gréement	16
1.3. Les panneaux divergents	17
1.4. Les funes	17
1.5. Cas du chalutage en boeufs	17
1.6. Le plan d'un chalut	18
1.7. Sélectivité	19
PARTIE 2 : HYDRODYNAMIQUE GENERALE	21
2.1. Ecoulement dans un filet	23
2.1.1. Hypothèse d'uniformité de l'écoulement	23
2.1.2. Description du montage	24
2.1.3. Résultats	27
2.1.31. étude sans filet	27
2.1.32. étude avec filet ouvert	27
2.1.33. étude avec le filet "fermé"	28
2.1.34. analyse des résultats	29
2.1.4. Conclusion	30
2.2. Efforts hydrodynamiques pour un fil	32
2.2.1. Hypothèses mécaniques	32
2.2.2. Hypothèses de Landweber	33
2.3. Passage à une maille	35
2.3.1. Présentation des travaux de Langenbach	35

2.3.11. notation de Langenbach	35
2.3.12. résultats de Langenbach	37
2.3.2. Reconstitution avec les différentes hypothèses	38
2.3.3. Analyse de l'article du D.I.F.T.A	41
2.3.4. Conclusions, choix des hypothèses	42
2.4. Détermination des coefficients hydrodynamiques pour le filet	43
2.4.1. Montage expérimental	43
2.4.2. Résultats	44
2.5. Efforts hydrodynamiques sur les funes	45
2.5.1. Hypothèses	45
2.5.2. Valeur des coefficients de traînée et de frottement	45
2.6. Etude hydrodynamique des panneaux divergents	47
2.6.1. Définition et méthode de calcul des coefficients hydrodynamiques ..	47
2.6.2. Montage expérimental	49
2.6.3. Calcul des coefficients hydrodynamiques globaux	51
2.6.4. Résultats	53
2.6.5. Cas des panneaux pélagiques	54
2.7. Le frottement sur le fond	55
2.7.1. Cas des panneaux divergents	55
2.7.2. Cas du bourrelet	55
2.8. Les singularités du gréement	56
2.8.1. Définition	56
2.8.2. Les flotteurs	56
2.8.3. Les ailes	57
PARTIE 3 : PROGRAMME GENERAL	59
3.1 Description du chalut	61
3.1.1. Description des noeuds	61
3.1.2. Description des fils et des singularités	67
3.1.3. Description de la forme initiale	68

3.2. Les efforts	69
3.2.1. Les efforts hydrodynamiques	69
3.2.11. hypothèses de travail	69
3.2.12. repère lié au fil	70
3.2.13. forces de traînée de pression	72
3.2.14. forces de frottement	73
3.2.2. Efforts de pesanteur	74
3.2.3. Efforts dus aux singularités	74
3.3. Equilibre des noeuds	75
3.3.1. Noeuds à deux fils "supérieurs"	75
3.3.11. équations d'équilibre d'un noeud à quatre fils	75
3.3.12. remarque sur la méthode de résolution	77
3.3.121. <i>calcul des tensions</i>	78
3.3.122. <i>calcul des coordonnées</i>	78
3.3.13. autres noeuds à deux fils "supérieurs"	80
3.3.2. Noeuds à un fil "supérieur"	81
3.3.21. cas d'un noeud à quatre fils	81
3.3.211. <i>calcul des tensions</i>	81
3.3.212. <i>calcul des coordonnées</i>	82
3.3.23. autres noeuds à un fil "supérieur"	83
3.4. Méthode de résolution	84
3.4.1. La méthode itérative	84
3.4.2. Organigramme	86
3.4.3. Nombre d'inconnues	87
3.5. Prise en compte de la symétrie du chalut	87
3.6. Premiers résultats	89
3.6.1. Application au cas du chalut pélagique	89
3.6.11. le chalut étudié	89
3.6.12. résultats	92
3.6.121. <i>influence de la vitesse</i>	92
3.6.122. <i>prise en compte des mailles détendues</i>	96
3.6.2. Prise en compte des ralingues	97
3.6.21. définition	97
3.6.22. problèmes posés par les ralingues	98

3.6.23. solution proposée	99
3.6.231. méthode	99
3.6.232. résultats	99
3.6.3. Cas particulier du chalutage de fond	101
3.6.31. prise en compte du fond	101
3.6.311. forces de frottement	101
3.6.312. composante normale de la réaction du fond	101
3.6.32. application	102
3.6.321. chalut étudié	102
3.6.322. résultats	104
3.7. Difficulté de convergence - temps de calcul	106
PARTIE 4 : GLOBALISATION DU MAILLAGE	111
4.1. Filets dans un champ de force uniforme	113
4.1.1. Premières règles de globalisation	113
4.1.2. Essais systématiques	115
4.1.3. Problèmes de convergence	119
4.1.4. Conclusion des essais	121
4.2. Filets dans un champ de forces hydrodynamiques	121
4.2.1. Règles de globalisation	121
4.2.2. Résultats	122
CONCLUSION	127
Références bibliographiques	129
ANNEXE	131

AVANT-PROPOS

L'étude présentée ici est originale, au sens propre du terme. C'est, à notre connaissance, la première à aborder le problème de la détermination de la forme et des tensions de filets à l'équilibre dans un courant uniforme comme un vrai problème de couplage fluide structure, et à utiliser les outils de la mécanique classique et de l'hydrodynamique.

Quelques personnes ou équipes ont bien présenté des solutions à l'aide d'essais systématiques et de méthodes statistiques; mais on perçoit rapidement les limites de ce type d'études.

Etant à l'origine de l'étude, nous aurions dû commencer par déterminer l'existence et l'unicité de la solution de notre problème:

-- l'expérience "malheureuse" de millions de poissons depuis des siècles nous prouve l'existence d'une solution.

-- notre expérience d'essais sur modèles réduits de chaluts nous fait penser que cette solution est unique.

Cette boutade situe notre démarche. Devant la complexité du problème et la multiplicité de sous-études nécessaires, nous avons cherché à construire un prototype efficace de machine à calculer les chaluts. Nous avons recherché tous les rouages qui devaient intervenir. Puis, nous avons mené les études nécessaires pour définir une ébauche de chaque pièce qui permette à l'ensemble de fonctionner de la manière la plus satisfaisante possible, compte-tenu de nos possibilités (en temps, matérielles et théoriques...). L'amélioration d'un certain nombre d'éléments est maintenant possible et pourrait, généralement, constituer un sujet d'étude pour lui-même.

INTRODUCTION

L'exploitation des ressources maritimes, et particulièrement des ressources vivantes, nécessite souvent l'usage de structures réticulées. On pense premièrement aux filets utilisés pour la pêche tels que les chaluts, les sennes, les filets calés ou dérivants... Mais d'autres applications nécessitent aussi une amélioration des connaissances du comportement de ces structures par exemple en aquaculture (cages à poissons) et dans le domaine militaire pour les filets de protection ou les filets utilisés pour la récupération d'engins sous-marins.

L'objectif de ce travail est la mise au point d'un modèle numérique des chaluts qui doit répondre à deux besoins :

- d'une part, participer à la réalisation d'un véritable logiciel de conception assistée par ordinateur des chaluts;

- d'autre part, pouvoir étudier facilement et rapidement l'influence des différents paramètres de réglage modifiant la forme du chalut afin de pouvoir indiquer au patron pêcheur, si possible en temps réel, le réglage optimal dans les conditions qu'il rencontre. L'optimum serait qu'un patron détectant à l'aide de son sonar un banc de poissons puisse savoir immédiatement quel réglage adopter pour son chalut afin de le capturer (nous écrivons optimum et non pas idéal, car en "toile de fond" il faudra peut-être poser les problèmes de gestion des ressources et les éventuelles conséquences humaines d'un outil aussi performant).

Ce travail original, qui intéresse tous les technologistes des pêches, est pluridisciplinaire et couvre un vaste domaine de recherche. Parmi les disciplines qui interviennent nous pouvons citer au moins:

- l'hydrodynamique théorique: la présente étude s'inspire fortement des travaux déjà réalisés à propos des câbles sous-marins; d'autre part il est nécessaire de connaître l'écoulement à travers les mailles et les efforts agissant sur les côtés de celles-ci.

- la mécanique: étude du matériau constituant l'alèze, lois d'équilibre.

- les techniques expérimentales en bassin d'essais des carènes et canaux de circulation.

-- l'informatique, d'abord sur un gros système pour aboutir petit à petit à l'usage de la micro-informatique.

-- enfin, la biologie et la réglementation pour les contraintes qu'elles peuvent imposer pour la sauvegarde des espèces.

Au niveau international les quelques équipes qui ont travaillé sur ce sujet n'ont pas réussi à obtenir de solution générale car elles se sont essentiellement fondées sur des séries systématiques d'essais et des extrapolations; leurs résultats ne sont applicables qu'à des filets dont la forme est proche de ceux qui ont été utilisés pour les essais.

La complexité du problème nous a contraint à n'en étudier que l'aspect statique, le chalut étant remorqué à vitesse constante en eau calme. Même dans ces conditions, l'étude de la forme d'équilibre et des tensions du train de pêche reste difficile pour trois raisons principales:

- le comportement hydrodynamique de fils et de mailles assemblés pour constituer un filet est mal connu. Lors de son passage à travers les mailles, le courant d'eau est-il accéléré, ralenti, ou seulement dévié? Quelles sont les influences combinées de l'angle d'ouverture d'une maille et de l'angle d'attaque de la surface contenant cette maille sur les efforts hydrodynamiques qui lui sont appliqués? Quelle sorte d'interaction existe-t-il entre une maille et celles qui l'entourent? Les rares articles qui existent présentent des résultats différents. Ils ont été obtenus d'après des essais réalisés sur des pièces de filets rectangulaires ou des tronçons de cône. Ils ne sont pas généralisables.

- un filet est une structure infiniment souple sans forme définie, et seule l'action de forces extérieures lui permet de trouver une forme. Mais, ces forces extérieures dépendent elles-mêmes de la forme prise par le filet; nous avons donc à résoudre un véritable problème de couplage "fluide-structure". Avant la mise à l'eau, le chalut est stocké sur un enrouleur ou posé sur le pont. Au cours de sa mise à l'eau, le chalut atteint progressivement la forme d'équilibre que nous cherchons à déterminer. Ces changements de forme ne peuvent donc pas être assimilés à de petites déformations autour d'une forme donnée.

- un filet est une structure constituée d'un matériau anisotrope et discontinu. La façon d'assembler les mailles crée des directions préférentielles pour la propagation des contraintes et des déformations. A l'équilibre, certaines mailles peuvent être

complètement fermées et se comporter comme des cylindres rigides. D'autres peuvent être complètement détendues, sans forme géométrique définie.

La méthode que nous proposons consiste à écrire les équations d'équilibre en chacun des noeuds du chalut et de son gréement, puis à résoudre ce système par une méthode itérative.

Après une première phase effectuée sur ressources propres dans le cadre d'une collaboration entre l'IFREMER et l'ENSM, ce travail a fait l'objet d'un contrat européen réalisé avec deux équipes danoises : la première du DIFTA (Danish Institute for Fisheries Technology and Aquaculture) de Hirtshals chargée d'essais sur des modèles de chalut dans un canal à circulation d'eau, la deuxième du DMI (Danish Marine Institute) de Copenhague étant chargée d'effectuer des mesures de vitesse dans un chalut dans un bassin des carènes.

Après une présentation générale et rapide du chalutage destinée aux lecteurs non spécialisés, nous examinerons les problèmes d'hydrodynamique des câbles et du chalut. Puis nous exposerons notre méthode générale de mise en équations et de résolution. Enfin nous présenterons diverses applications, avec la résolution de certains cas particuliers.

PARTIE 1

PRESENTATION DU CHALUTAGE.

Une grande partie des techniques de pêche pratiquées dans le monde utilise pour la capture des animaux marins des engins constitués d'un ensemble de filets souples. On retiendra essentiellement la senne tournante, les filets calés ou dérivants, les filets soulevés, les pièges et les chaluts. L'engin le plus utilisé et le plus polyvalent aujourd'hui est le chalut, objet principal de notre étude. Les résultats obtenus pourront peut-être un jour être généralisés à d'autres techniques.

Nous allons présenter rapidement le train de pêche d'un chalutier qui comprend dans la plupart des cas un **chalut**, un **gréement**, des **panneaux divergents** et des **funes**.

1.1. Le chalut

Un chalut est un filet de forme très globalement conique, prolongé sur l'avant par des **ailes**. Il évolue soit sur le fond (chalutage de fond) soit en pleine eau (chalutage pélagique). Un tel filet est remorqué par un ou deux chalutiers.

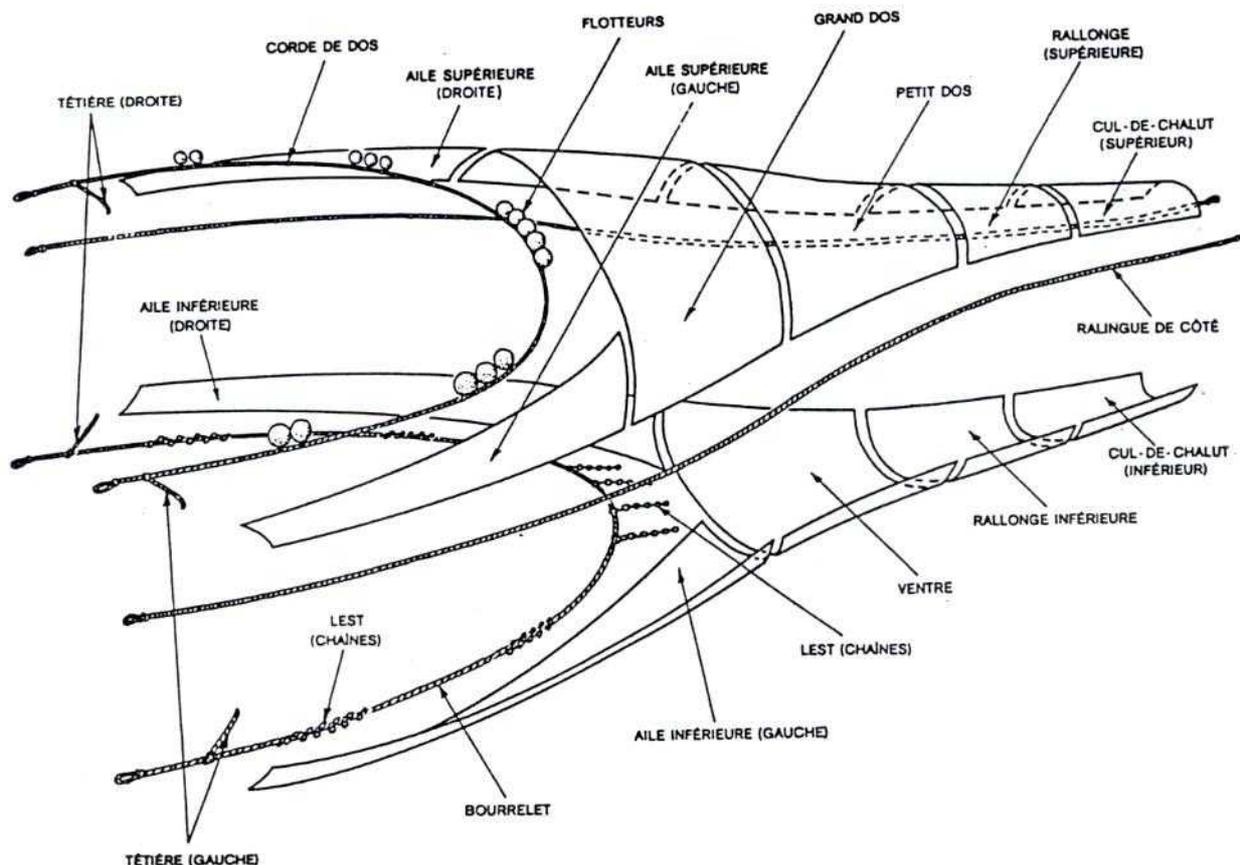


figure 1 : vocabulaire

note : dans ces paragraphes, les mots en gras sont propres au gens de la mer ou ont un sens particulier pour ceux-ci, ils renvoient généralement aux figure 1 et 2.

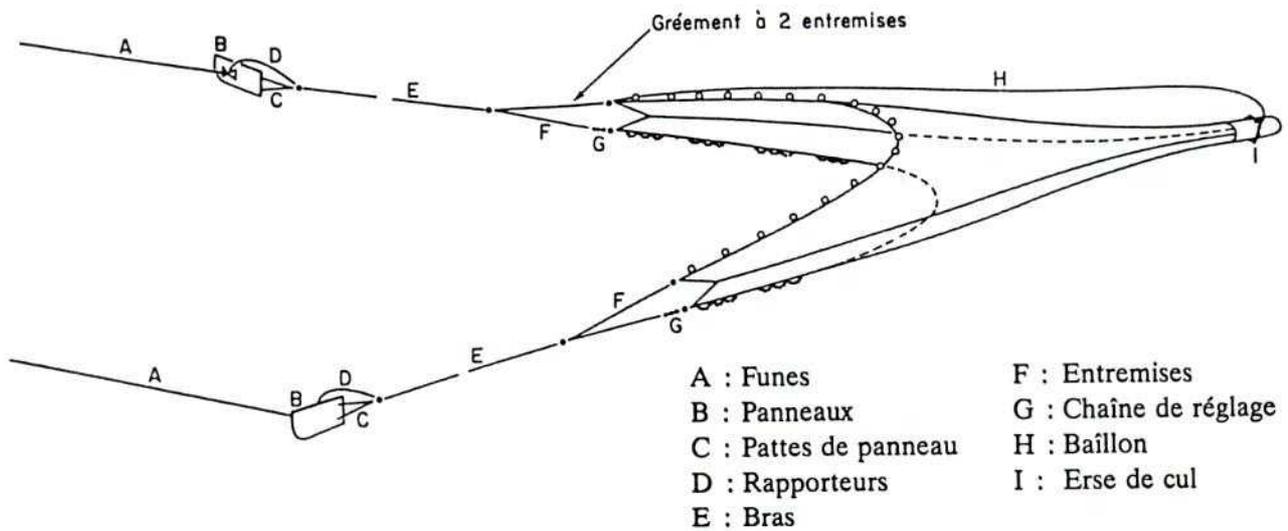


figure 2 : Chalut de fond à panneaux, à deux faces. Vue d'ensemble

1.1.1. Le chalut de fond.

Un chalut de fond est dissymétrique : sa face supérieure est plus grande que sa face inférieure, ceci pour piéger les poissons qui, lorsqu'ils rencontrent le **bourettelet**, ont tendance à fuir vers le haut. Son ouverture verticale est assurée généralement par des **flotteurs** situés sur la **corde de dos**, son ouverture horizontale provient des **panneaux divergents** positionnés en avant du **gréement**. Ces derniers, qui sont lestés pour rester en contact avec le fond, sont reliés au navire par l'intermédiaire de câbles appelés funes. Le filet doit être suffisamment lesté dans sa partie inférieure pour ne pas décoller du fond.

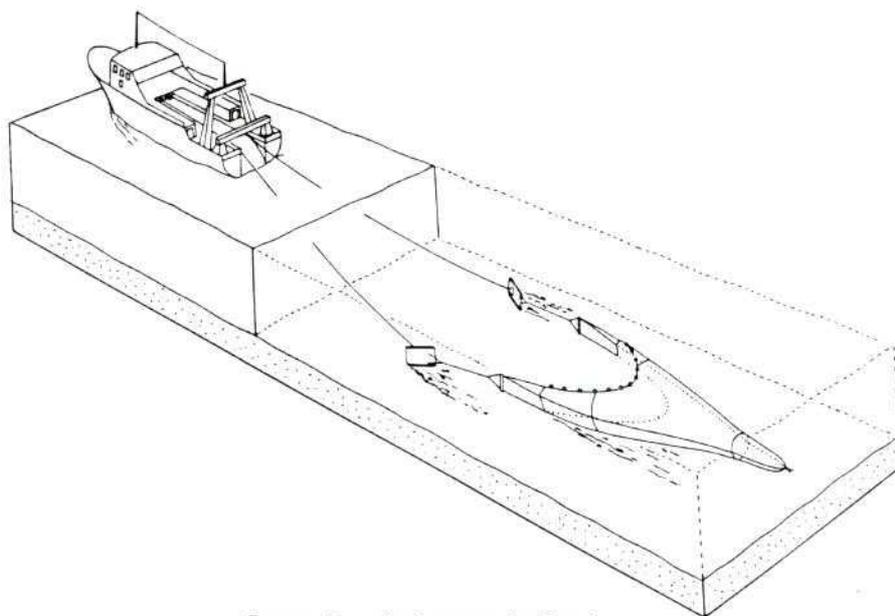


figure 3 : chalutage de fond.

Ce type de chalut est utilisé aujourd'hui dans des fonds de 30 à 1400 mètres. Des campagnes de prospection sont envisagées jusqu'à 1800 mètres.

L'ouverture verticale d'un chalut de fond varie selon les modèles de 2 à 15 m, la longueur peut atteindre de 60 à 100 m pour un navire d'une puissance de 1800 ch..

1.1.2. Le chalut pélagique.

Les quatre faces qui constituent le filet sont réalisées de manière symétrique deux à deux, lors de la coupe et de l'assemblage des pièces. Mis à l'eau, un chalut pélagique conserve sa symétrie par rapport au plan vertical. Par contre, la symétrie haut/bas est généralement perturbée par l'action des différents éléments du gréement.. L'ouverture verticale du chalut est assurée par des lests situés en avant de sa partie inférieure. L'ouverture horizontale est réalisée par deux panneaux divergents ou en utilisant deux bateaux.

L'ensemble du train de pêche évolue en pleine eau; la pêche peut s'effectuer avec des immersions proches de la surface jusqu'à des **sondes** (profondeur d'immersion) pouvant atteindre 800 mètres.

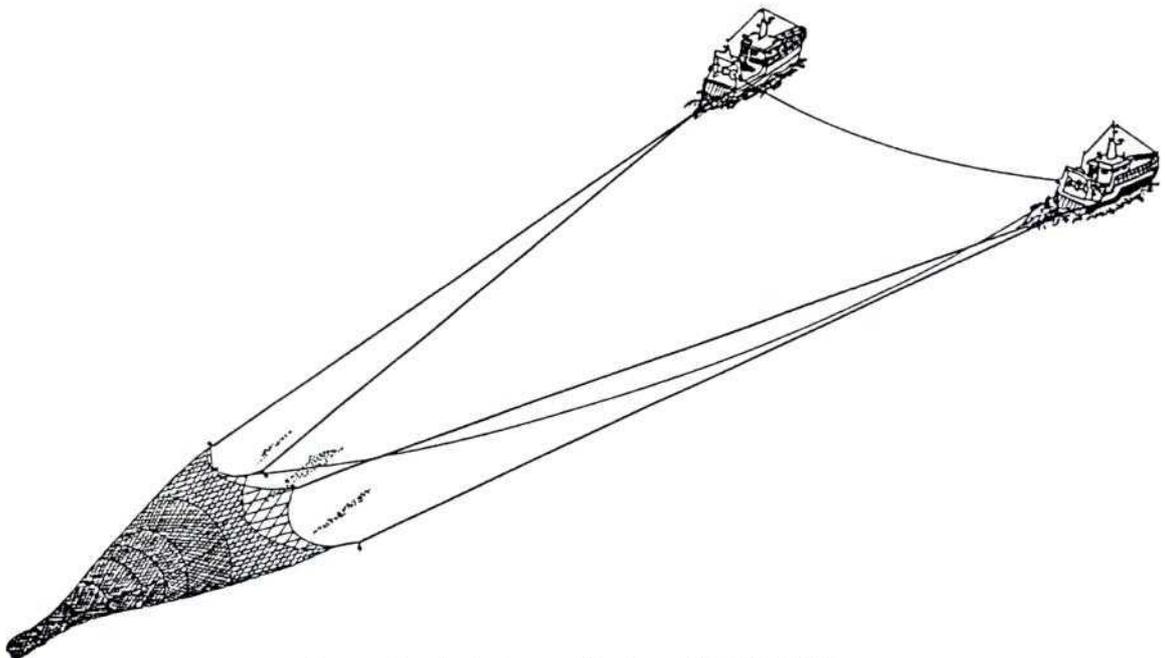


figure 4 : chalutage pélagique "en boeufs".

A titre d'exemple un chalut pélagique remorqué par un navire d'une puissance de 1800 Ch a les caractéristiques suivantes : ouverture verticale 60 m ; ouverture horizontale 120 m ; longueur 250 m.

1.2. Le gréement.

Le gréement est constitué de l'ensemble des câbles situés entre le chalut et les panneaux divergents. Il existe de nombreux types de gréements mais ils sont tous constitués d'éléments de câbles. Ils pourront tous être pris en compte par notre méthode.

Les deux principaux types sont le gréement à bras et entremises (deux ou trois) et le gréement à fourche plus complexe en ce qui concerne les manoeuvres mais qui permet d'utiliser des chaluts à grande ouverture verticale et de travailler dans des fonds accidentés.

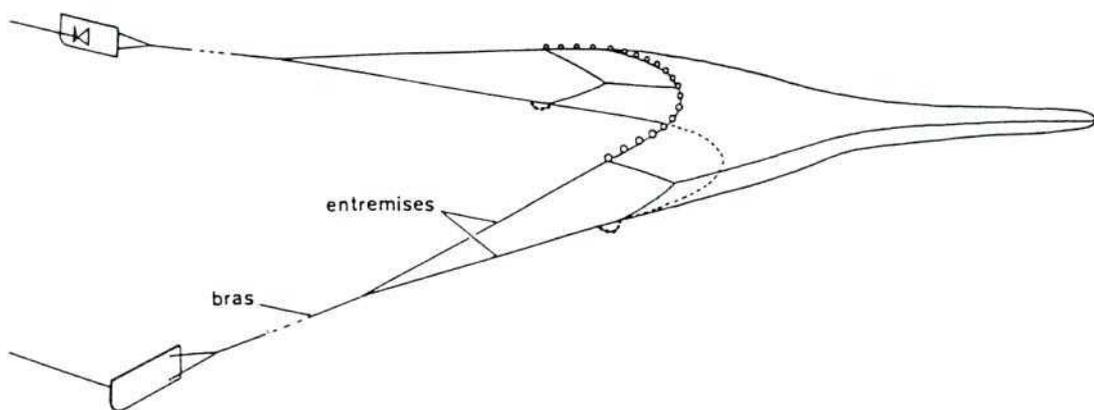


figure 5 : gréement à bras et entremises

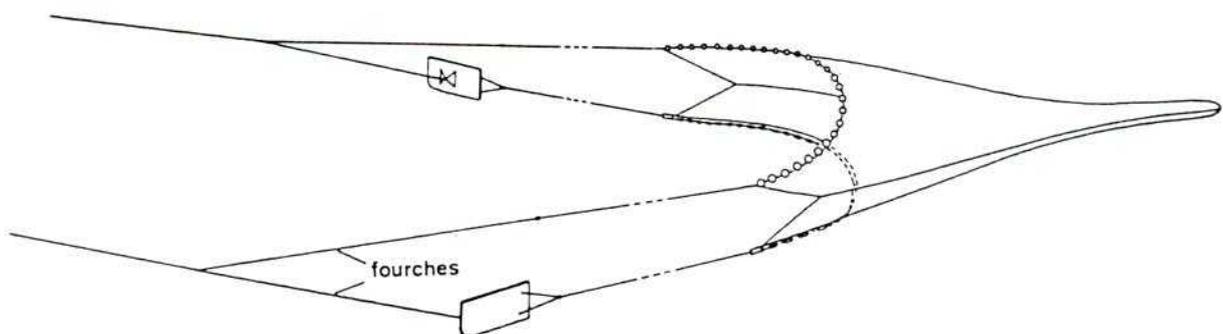


figure 6 : gréement à fourche

1.3. Les panneaux divergents.

Les panneaux divergents sont des surfaces portantes de formes très variées et adaptées au type de pêche pratiqué par le chalutier. En général, en chalutage de fond, leur angle d'attaque (incidence pour un hydrodynamicien) est compris entre 35 et 40 degrés (conditions hydrodynamiques défavorables). Dans ces conditions on comprend que leurs performances pourraient être améliorées. Cependant, en pêche, pour être efficaces, les panneaux doivent être très stables de comportement, ceci quels que soient: la nature du fond (vase, sable, roche,...), les conditions de pêche (mauvais temps, courants,...) et le travail effectué par le patron du chalutier (modification de la longueur des funes, demi-tour...). De plus, leur forme doit être telle que si par accident ils se couchaient sur le fond ils se redressent d'eux même. Ces différentes contraintes ont amené les fabricants à ne pas, jusqu'à ce jour, proposer de divergent du type aile.

Les panneaux pélagiques qui travaillent en pleine eau sont de conception plus élaborée. Leur angle d'attaque en pêche est voisin de 15 degrés. Leurs performances peuvent être considérées comme correctes.

1.4. les funes.

Les funes sont les câbles qui relient les panneaux divergents au chalutier. Leur prise en compte dans le calcul ne pose pas de problème particulier.

1.5. Cas du chalutage en boeufs

Parfois, qu'il s'agisse de chalutage de fond ou de chalutage pélagique, le chalut n'est plus remorqué par un mais par deux chalutiers. Cette technique s'appelle le chalutage en boeufs (voir figure 4).

L'ouverture horizontale du chalut est assurée par l'écartement entre les deux navires. Dans le train de pêche les panneaux sont remplacés par des lests qui assurent son immersion.

1.6. Le plan d'un chalut.

Le plan d'un chalut est au fabricant ce qu'un patron est pour une couturière. Sur un tel plan on trouve l'ensemble des données qui décrivent le chalut; ces plans sont toujours présentés sous une forme analogue.

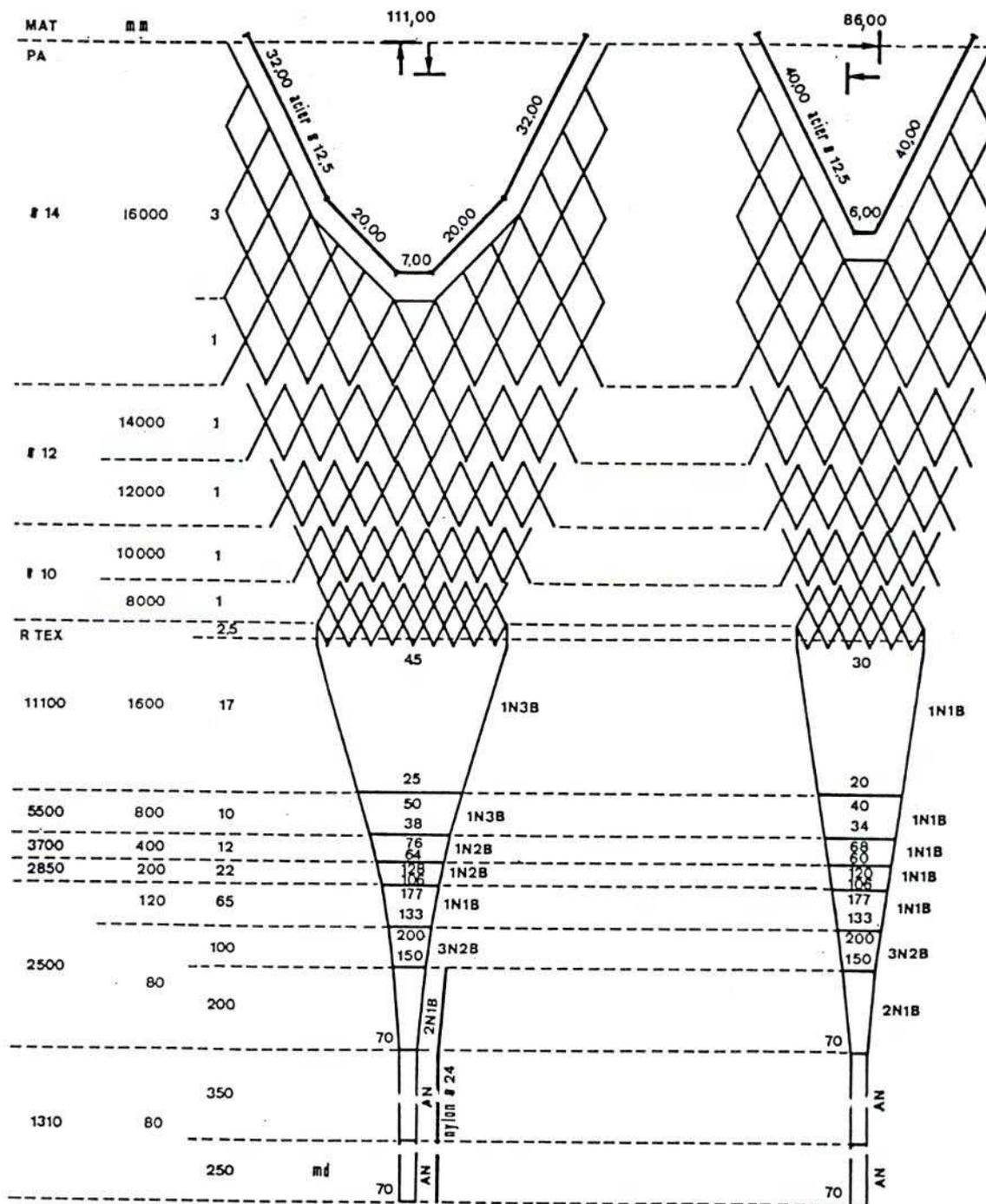


figure 7 : plan d'un chalut pélagique

Chaque face est décrite séparément. Elle comporte des pièces dont la forme est définie par le nombre de rangs de mailles et le nombre de mailles du bord supérieur et du bord inférieur. Le plan comporte des informations parfois redondantes: "la coupe" qui indique au fabriquant la manière d'obtenir la pente des côtés des pièces.

On trouve pour chaque pièce tous les renseignements concernant l'alèze (nappe de filet de base dans laquelle est taillée la pièce). Certains renseignements sont donnés de manière conventionnelle et peu commode. Ainsi, par exemple, les fils sont caractérisés par un "RTex": il est nécessaire d'utiliser une table de conversion pour en déterminer le diamètre et la masse.

1.7. Sélectivité

Une grande partie des travaux réalisés en technologie des engins de pêche est orientée vers une amélioration de la sélectivité. L'objectif est de sauvegarder une ressource aujourd'hui en difficulté.

Il s'agit de mettre au point des procédés qui permettent une amélioration soit de la sélectivité interspécifique (séparer les poissons d'espèces différentes) soit de la sélectivité intraspécifique (au sein d'une même espèce séparer les individus immatures des reproducteurs).

La mise au point de ces systèmes nécessite une connaissance du comportement des différentes espèces recherchées par les professionnels et une connaissance du fonctionnement des engins notamment de l'ouverture des mailles dans les différentes parties d'un chalut.

Notre logiciel devra permettre d'améliorer ces connaissances et de concevoir de nouveaux procédés (conçus à l'aide de filets) destinés à séparer les espèces à comportement différent.

PARTIE 2

HYDRODYNAMIQUE GENERALE

Dans cette partie nous allons introduire un certain nombre de coefficients hydrodynamiques dont il faudra identifier la valeur. Cette identification se fera par comparaison de résultats expérimentaux et de calculs sur des formes simples. Le travail d'identification suppose donc que nous ayons déjà écrit une grande partie de notre programme général (partie 3). Les travaux d'identification et de programmation ont donc été menés en parallèle. Mais pour des raisons de clarté de l'exposé nous les présentons séparément.

Pour réaliser cette étude nous avons considéré qu'un filet est constitué d'un ensemble de fils reliés les un aux autres, et nous avons cherché à appliquer les résultats des travaux réalisés sur les câbles sous-marins à chacun de ces fils élémentaires.

2.1. Ecoulement dans un filet

2.1.1. Hypothèse d'uniformité de l'écoulement

Parmi les hypothèses que nous avons été amenés à formuler, il en est une qui concerne particulièrement l'écoulement à l'intérieur du filet. Nous avons supposé que la présence du filet ne perturbait pas l'écoulement du fluide. Nous avons ainsi admis que **le champ de vitesse de l'écoulement relatif était uniforme** en tout point du système étudié. Nous avons été conduits à cette hypothèse pour différentes raisons :

- Les résultats expérimentaux que nous avons pu trouver en bibliographie sont peu précis et souvent contradictoires. Certains auteurs mettent en évidence une accélération du fluide, d'autres une décélération de l'écoulement pouvant même provoquer des refoulements à l'entrée du chalut. Le nombre très important de paramètres qui interviennent (forme du filet, forme des mailles, montage du filet sur les ralingues, diamètre des fils, longueur des cotés de maille, nature du fil, existence de noeuds, montage expérimental,...) font que tous ces auteurs ont certainement raison, mais chacun dans son cas particulier.

- Des essais de modélisation de l'écoulement à travers les mailles en introduisant des pertes de charge ont été réalisés par Dominique Marichal. Il a généralisé des travaux d'Idel'cick relatifs à l'écoulement au travers des grilles planes constituées de fils rigides et placés perpendiculairement à l'écoulement. Les accélérations des vitesses qu'il a obtenu étaient irréalistes.

- Les premiers essais que nous avons réalisés, pour comparer des résultats expérimentaux à des mesures au canal d'essais de Lorient, ont utilisé comme modèles des nappes rectangulaires (au moment de la coupe) de filet appuyées sur un cerceau rigide. Nous avons obtenus de bons résultats en supposant que l'écoulement restait uniforme à l'intérieur du filet.

- Enfin, pour débiter une étude aussi complexe que celle-ci, l'hypothèse de l'écoulement uniforme permet de simplifier un aspect du problème sans apparemment introduire des "erreurs inadmissibles". Il faut aussi faire la relation entre les conséquences d'une part de cette hypothèse et d'autre part de la mauvaise connaissance des coefficients hydrodynamiques que nous devons introduire.

Cependant, nous allons vérifier expérimentalement la validité de cette hypothèse en ce qui concerne les filets que nous utiliserons, en partie, pour valider notre code de calcul.

2.1.2. Description du montage

On se propose de remorquer un tronc de cône de filet dans le bassin des carènes de l'ECN (des mesures de variations de vitesse au canal de Lorient sont impossibles car les fluctuations spatiales et temporelles de la vitesse d'écoulement dans cette veine risquent d'être du même ordre de grandeur que celles que l'on cherche à mettre en évidence).

Ce tronc de cône est légèrement tendu par un bâti afin de lui permettre de prendre rapidement sa forme d'équilibre, mais le filet n'est pas rigidifié. Il prend une forme uniquement définie par les diamètres des cerceaux rigides d'entrée et de sortie, la distance qui sépare ces deux cerceaux et les efforts hydrodynamiques.

Le support est solidaire de la plate-forme de remorquage du bassin des carènes. On remorque donc le filet dans de l'eau calme (photo 1). On est ainsi assuré d'avoir un champ de vitesse relative uniforme, loin du filet.

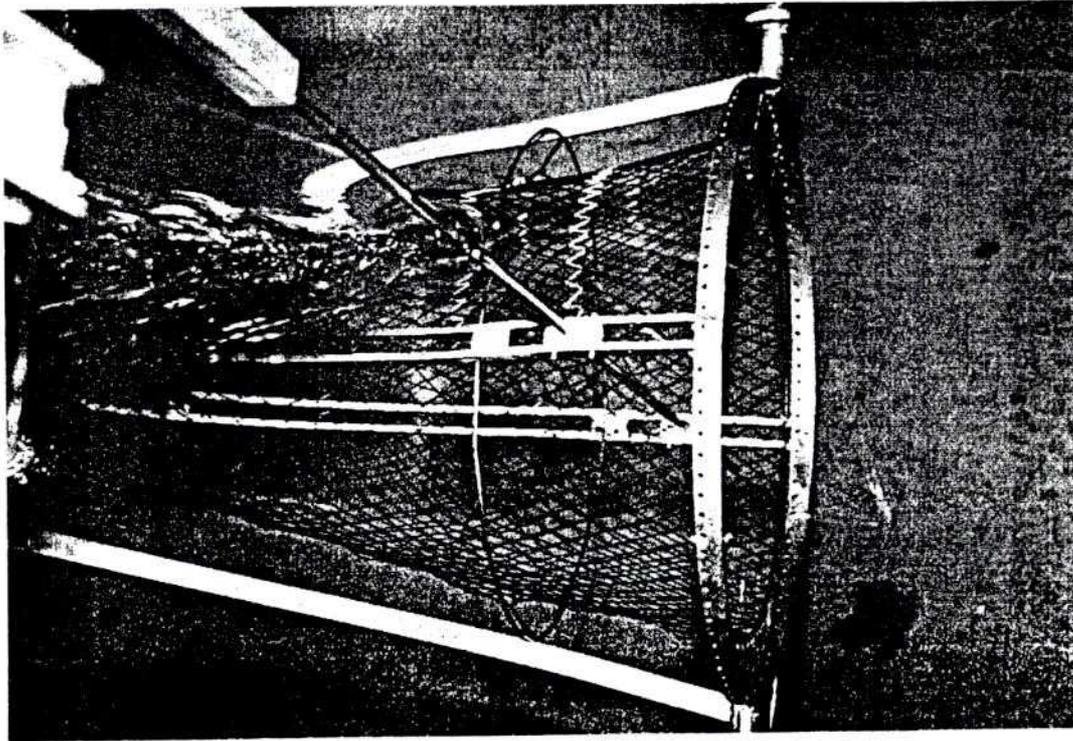


photo 1 : aspect du filet lorsqu'il est remorqué

Les mesures ont été réalisées dans quatre sections droites du filet à l'aide d'une sonde déprimogène. Elle utilise les variations de pression qui apparaissent dans l'écoulement autour d'un cylindre. On mesure la différence de pression entre le point d'arrêt et le sillage de l'écoulement autour d'un cylindre.

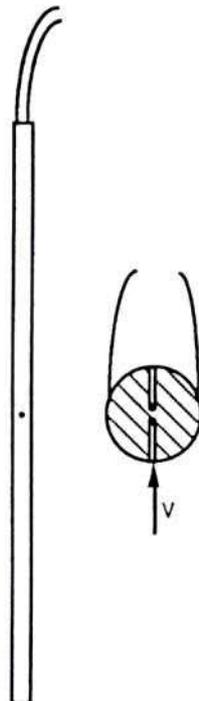


figure 8 : sonde déprimogène

Nous avons utilisé un capteur de pression différentielle Sedeme FAS63/50E. Son étendue de mesure est de 50mbar pour une tension de sortie de 5 V. Il est équipé d'une double entrée pour chaque chambre de mesure; ceci permet de faire des purges sans déconnecter la sonde.

La mesure de la tension de sortie est faite en "lissant" manuellement l'enregistrement des évolutions de celle-ci pendant le temps de remorquage. L'enregistrement est réalisé sur un enregistreur graphique potentiométrique Linséis.

La chaîne de mesure est étalonnée globalement. La sonde est placée sur l'axe du montage dans sa section d'entrée (sans le filet). On établit une correspondance directe entre la vitesse imposée et le déplacement de la plume de l'enregistreur graphique.

Seule la composante longitudinale de la vitesse est mesurée.

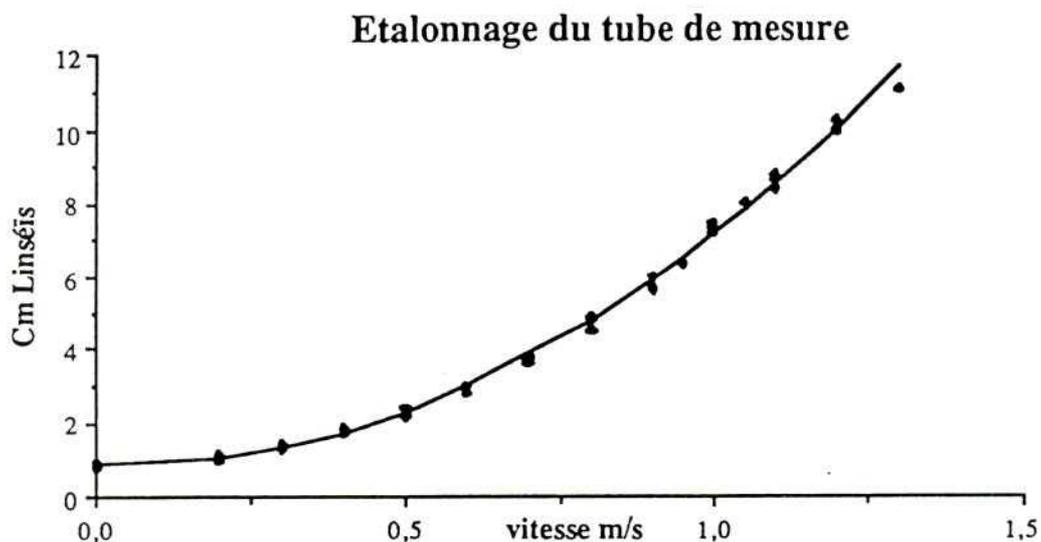


figure 9 : étalonnage du tube de mesure

La courbe précédente montre que ce système présente une sensibilité et une reproductibilité suffisantes dans la gamme de mesures qui nous intéresse. Il ne s'agit pas d'un instrument extrêmement précis mais nous cherchons surtout à faire une étude qualitative des variations de vitesse dans le filet.

L'usage d'un tube de Pitot classique aurait sûrement conduit à une mesure plus précise. Mais pour changer de section de mesure il aurait fallu sortir tout le montage à chaque fois. De plus, le filet n'étant pas rigide, on craignait que celui-ci se prenne dans la partie avant du tube de Pitot.

2.1.3. Résultats

Les essais ont été effectués à trois vitesses différentes: 0,8 m/s , 1 m/s et 1,2 m/s . Nous ne présenterons en détail que les résultats obtenus à 1 m/s, les autres sont comparables comme le montrera la présentation adimensionnelle.

2.1.31. étude sans filet

Avant de placer le filet, des mesures ont été réalisées avec le support seul afin de s'assurer que les variations de vitesse observées au voisinage du filet ne seront pas dues à l'influence du support.

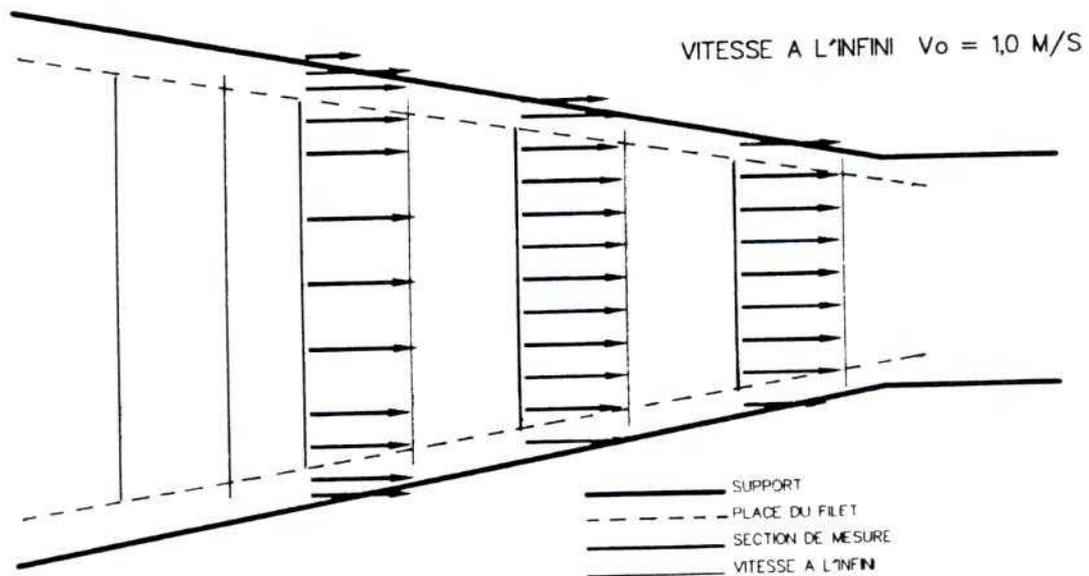


figure 10 : profil des vitesses sans le filet

On constate que l'écoulement est très peu perturbé dans la zone où sera placé le filet.

2.1.32. étude avec filet ouvert

Nous plaçons maintenant le filet de forme conique, sa section de sortie étant libre.

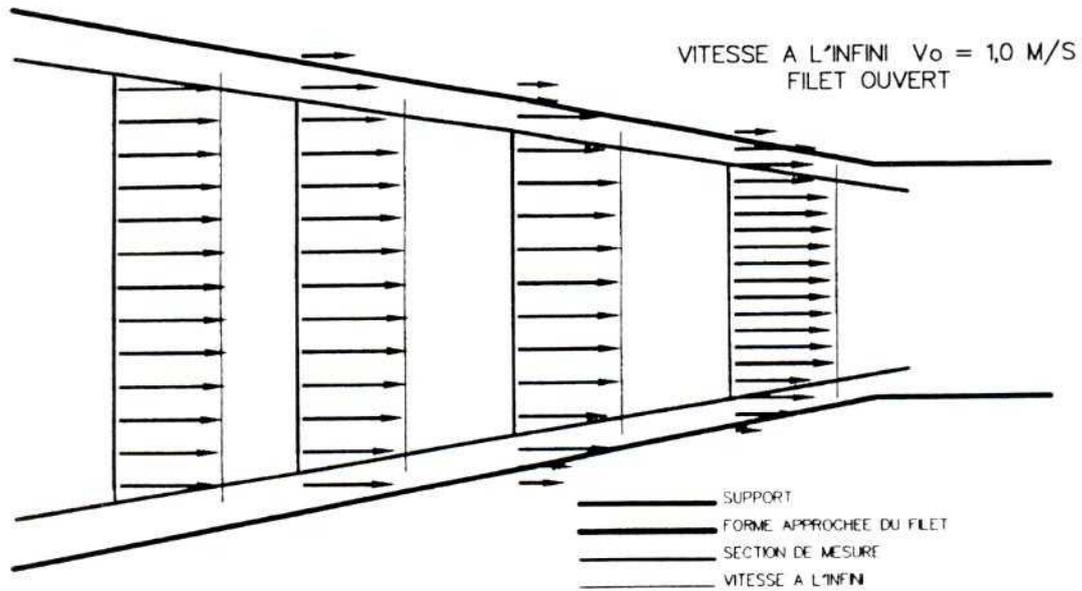


figure 11 : profil des vitesses dans le filet "ouvert"

On constate un ralentissement au voisinage du filet.

2.1.33. étude avec le filet "fermé"

Le filet est dans la même position, mais nous plaçons une pièce de filet dans la section de sortie. Cette pièce est suffisamment tendue afin qu'elle reste pratiquement plane sous l'action du courant. Son montage est tel que les mailles ont la forme d'un carré.

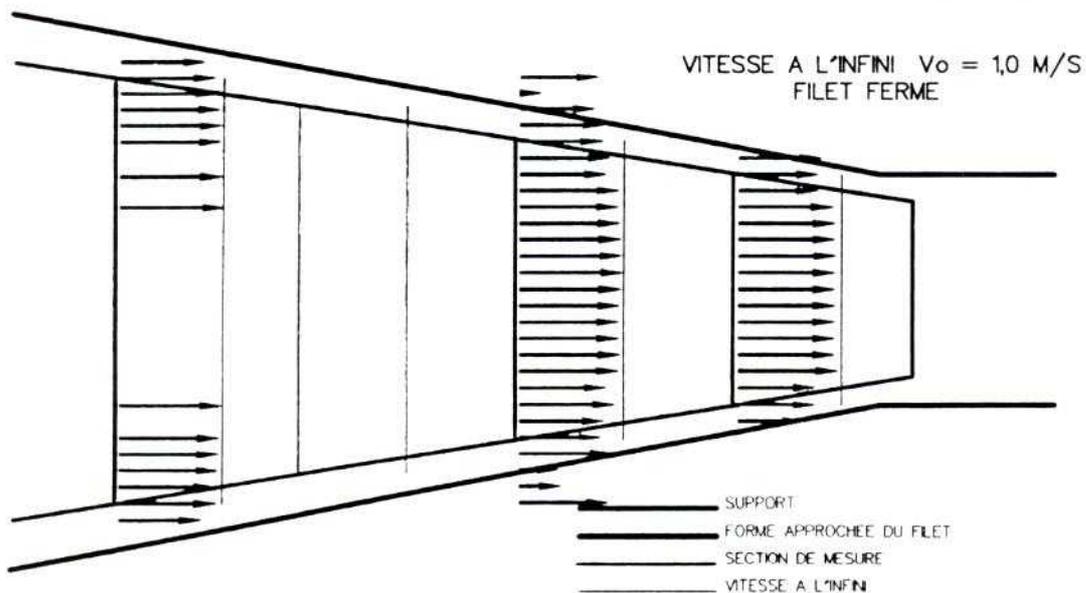


figure 12 : profil des vitesses dans le filet "fermé"

2.1.34. analyse des résultats

Les mesures ont montré que la présence d'un fond constitué d'un filet normal au courant ne modifie pas les vitesses mesurées. Le passage de l'eau à travers ce type de filet, placé perpendiculairement à l'écoulement, se fait sans interaction importante.

Dans les deux cas (filet "ouvert" et filet "fermé") on constate une diminution de la vitesse longitudinale au voisinage du filet.

La vitesse moyenne de l'écoulement diminue aussi.

Ces deux phénomènes sont bien mis en évidence sur la figure suivante où nous avons regroupé sous une forme adimensionnelle les résultats relatifs aux trois vitesses (0,8 m/s, 1 m/s et 1,2 m/s).

Dans la section 1 l'écoulement est pratiquement uniforme, dans la section 2 un ralentissement apparaît sur le bord, donnant au profil des vitesses une forme parabolique, ce phénomène s'accroît dans la section 3. Dans la section 4 tout l'écoulement est ralenti, mais la partie centrale semble uniformisée.

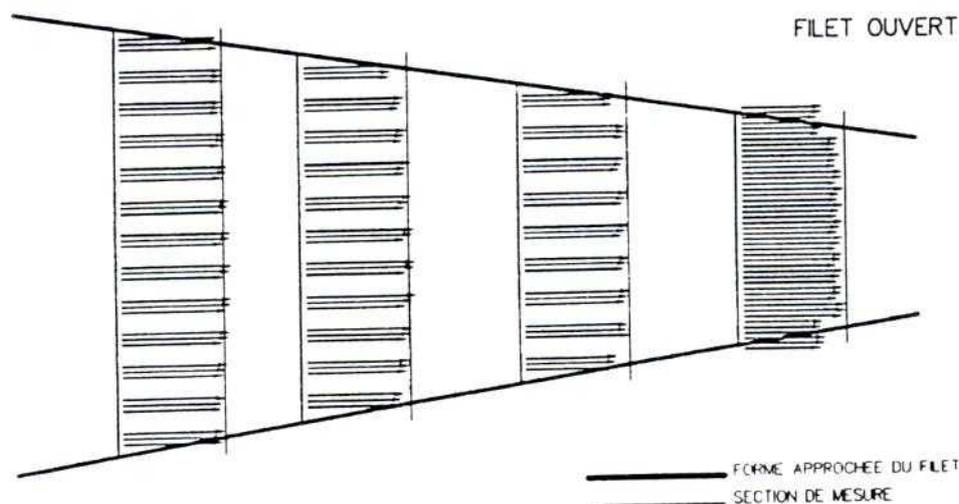


figure 13 : profil des vitesses adimensionnelles

On met ainsi en évidence un double phénomène:

- les frottements sur les mailles provoquent un ralentissement de l'écoulement longitudinal.

- la forme convergente du filet tend à uniformiser l'écoulement. Par contre, la diminution de la vitesse moyenne d'une section à l'autre fait qu'il ne passe pas dans la section de sortie le même débit que le débit théorique calculé avec sa surface et la vitesse de remorquage.

Il y a donc une "fuite" latérale, supérieure au débit de l'écoulement incident à travers la couronne comprise entre les cercles d'entrée et de sortie. Comme la composante longitudinale de la vitesse est très diminuée au voisinage du filet, cela implique l'apparition d'une composante de vitesse dirigée vers l'extérieur du cône. Ces expériences ne peuvent que mettre en évidence son existence, il n'a pas été possible de la mesurer.

2.1.4. Conclusion

Il a donc été mis en évidence une influence certaine des frottements tangentiels sur le champ des vitesses internes du filet. Cette influence est peut-être exagérée par la faible dimension relative des mailles par rapport au rayon du cercle au cours de nos essais. C'est pourquoi nous avons confié une étude analogue au DMI qui avait la possibilité de réaliser des mesures sur un filet d'une longueur de 30 mètres (échelle 1/2 du réel). Les mesures ont été faites à l'aide d'une sonde à cinq trous.

Ces mesures ont été réalisées de l'axe du filet (section **b** sur les figures) jusqu'à la "paroi" que constitue la nappe de filet (section **a** sur les figures) dans une zone située au tiers antérieur du chalut.

Les résultats, que nous présentons sur les figures 14 et 15, nous montrent que dans des conditions conformes au réel :

- les variations de vitesse longitudinale sont faibles sauf au voisinage du filet.

- au niveau du filet, on obtient une dispersion des mesures dont la valeur moyenne semble malgré tout encore voisine de la vitesse de remorquage.

-- le module de la vitesse radiale est de l'ordre du cm/s ; ce qui compte tenu de la surface importante du filet représente un débit de fuite significatif, mais n'a qu'une influence très faible sur les efforts hydrodynamiques.

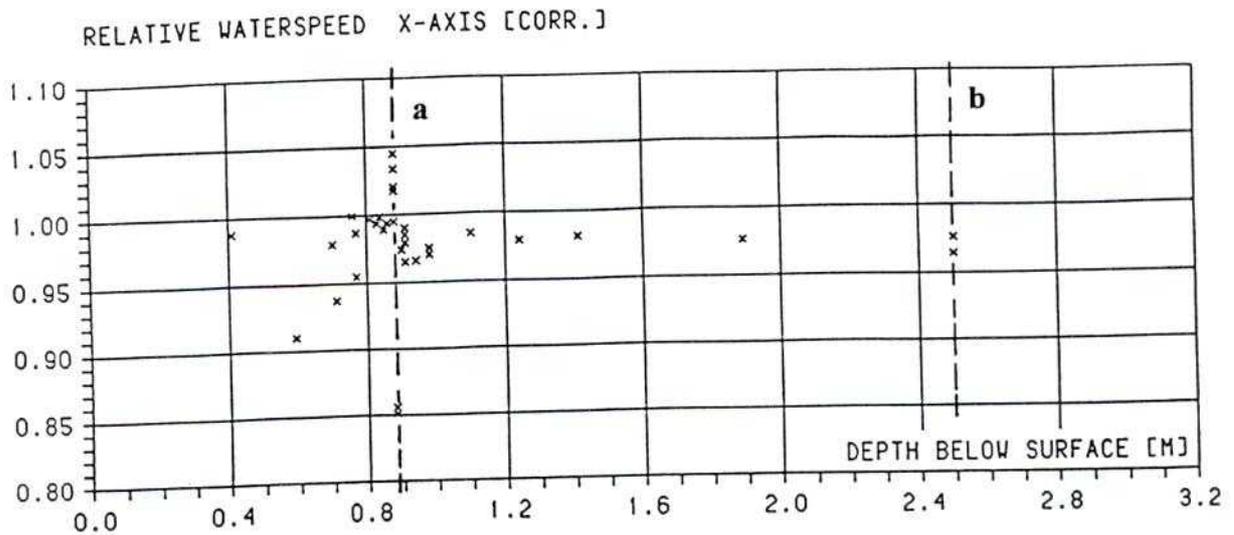


figure 14 : résultats du DMI. Composante axiale de la vitesse

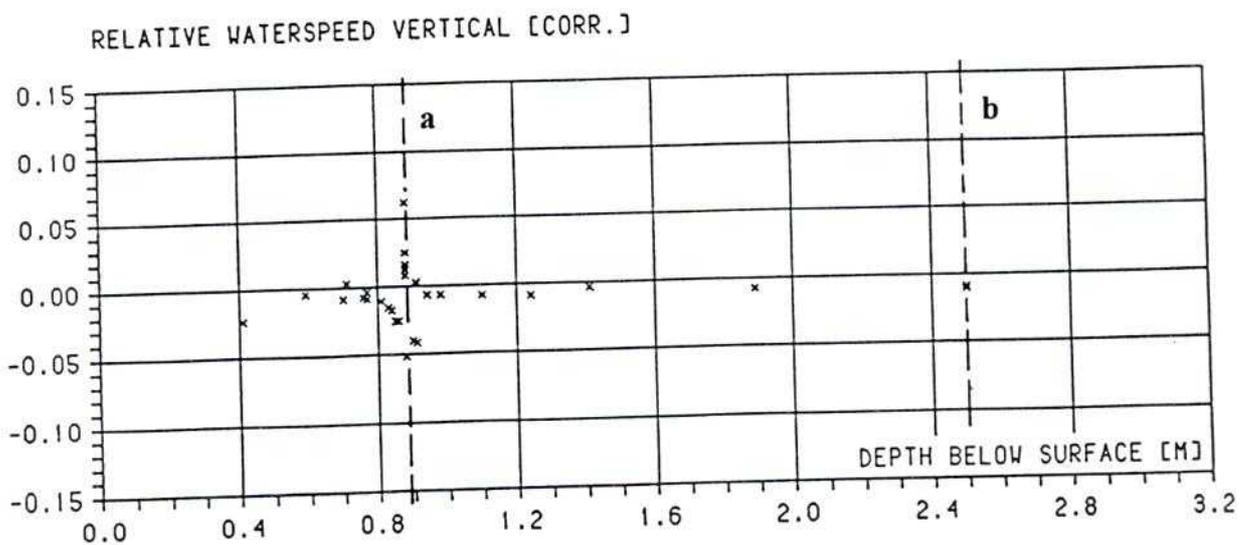


figure 15 : composante radiale de la vitesse

Ces expériences montrent qu'il faudra sans doute améliorer le schéma hydrodynamique que nous avons adopté pour nos calculs numériques. Mais elles sont insuffisamment précises et elles manquent de généralité pour nous indiquer un modèle meilleur, aussi nous considérerons que le champ de vitesse de l'écoulement est uniforme en tout point du filet.

2.2. Efforts hydrodynamiques sur un fil

Il nous faut maintenant préciser nos hypothèses de calcul des efforts hydrodynamiques qui agissent sur chacune des mailles.

Dans les quelques études concernant ces efforts, la maille est toujours considérée dans son ensemble. Nous nous proposons ici de considérer chaque côté de maille isolément. Il nous faut donc choisir une méthode de calcul des efforts et la justifier par des comparaisons avec quelques-uns des résultats disponibles en bibliographie et par des essais que nous avons effectués.

Dans les cas que nous traitons, le fluide est réel, incompressible et au repos à l'infini. Les vitesses relatives des câbles et du filet par rapport à l'eau sont donc leurs vitesses absolues.

L'action du fluide sur le système remorqué est décrite à l'aide de coefficients globaux de frottement et de traînée de pression, et fait intervenir la vitesse absolue du système.

2.2.1. Hypothèses mécaniques

Nous supposons que les fils constituant les mailles sont cylindriques, inextensibles, lisses et sans raideur.

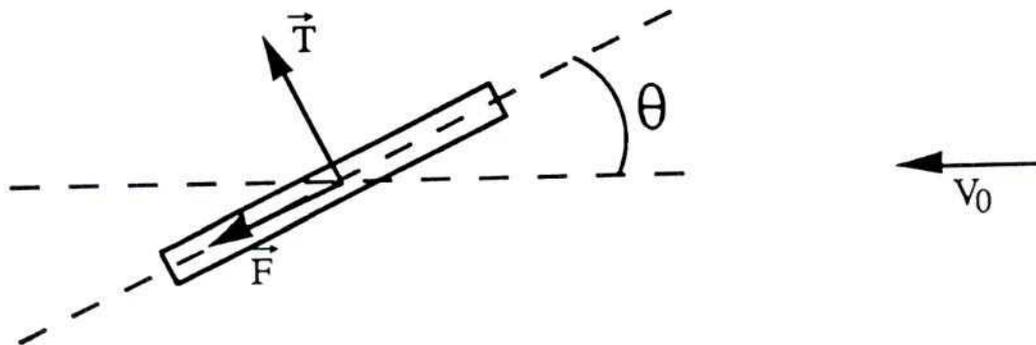
La rugosité éventuelle des fils sera prise en compte par un coefficient de frottement introduit dans les efforts hydrodynamiques.

L'inextensibilité n'est qu'approximative; il se produit, en réalité, sous l'action de tensions importantes une légère augmentation de la longueur des fils mais celle-ci reste constante au cours du remorquage. Il ne serait d'ailleurs pas compliqué d'introduire dans nos calculs une élasticité des fils. Mais cela ne nous a pas semblé justifié en regard des erreurs introduites par la mauvaise connaissance de nombreux autres paramètres.

2.2.2. Hypothèses de Landweber

Ces hypothèses sont généralement utilisées pour résoudre ce type de problème, en raison de leur simplicité et parce qu'elles donnent, dans le cas des câbles, des résultats en accord avec les résultats expérimentaux (moyennant quelques précautions relatives à la valeur du coefficient de traînée).

Les hypothèses de Landweber concernent les efforts hydrodynamiques stationnaires, le câble étant animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme dans le fluide au repos. On décompose les efforts hydrodynamiques agissant sur l'élément de câble en un effort de traînée normale à l'élément et un effort de frottement tangentiel.



Ces efforts sont exprimés sous la forme suivante:

$$T = \frac{1}{2} \rho C_d d l (V_0 \sin \theta)^2$$

$$F = f \frac{1}{2} \rho C_d d l V_0^2 = f R_u$$

où d et l sont respectivement le diamètre et la longueur de l'élément de câble

ρ est la masse volumique du fluide

$V_0 \sin \theta$ est la composante de la vitesse normale à l'élément

C_d est le coefficient de traînée du câble

f est le coefficient de frottement du câble

On constate que dans ce schéma le frottement tangentiel est une fraction constante de la traînée du fil lorsqu'il est placé perpendiculairement au courant. Dans les hypothèses de Landweber, au sens strict, la force de frottement est donc constante et indépendante de l'angle que fait l'élément de câble avec la direction du courant.

Landweber a adopté ce schéma simplifié des efforts de frottement pour diverses raisons:

-- la détermination exacte et générale de ces efforts est très complexe (les câbles étant réalisés selon divers principes et leurs états de surface étant différents).

-- dans la plupart des problèmes de remorquage d'engins sous-marins, la valeur de ces frottements n'intervient que peu dans les résultats, les efforts de traînée et de tensions aux extrémités du câble étant généralement prépondérants.

Il se trouve que dans le cas des chaluts, particulièrement pour les côtés de mailles du cul, les fils ont des incidences faibles. Les efforts de frottement sont alors prépondérants. Il est nécessaire d'en affiner la description. Nous examinerons dans le paragraphe suivant les effets de deux autres modèles souvent proposés pour modifier l'expression des forces de frottement dans le schéma de Landweber:

a. Hypothèses de O'hara

O'hara remplace le coefficient f par $f \cos\theta$.

On obtient ainsi:

$$F = f \cos\theta \frac{1}{2} \rho C_d d l V_0^2$$

b. Hypothèses de Richtmeyer

L'hypothèse de Richtmeyer consiste à prendre un coefficient de frottement f constant, mais à remplacer dans le calcul des efforts de frottement la vitesse V_0 par sa composante tangente au câble $V_0 \cos\theta$.

On exprime alors F sous la forme suivante:

$$F = f \frac{1}{2} \rho C_d d l (V_0 \cos\theta)^2 = f R_u \cos^2\theta$$

2.3. Passage à une maille

Nous allons présenter des résultats d'essais réalisés sur des mailles par Langenbach. Puis nous les comparerons aux résultats que nous pouvons obtenir en utilisant les différentes hypothèses décrites précédemment.

2.3.1. Présentation des travaux de Langenbach

L'article de Langenbach (cité par Blendermann [2]) nous est apparu comme l'un des plus "fiabes" trouvé en bibliographie. Il présente un certain nombre de résultats expérimentaux concernant les efforts hydrodynamiques qui s'exercent sur une nappe de filet.

2.3.1.1. notation de Langenbach

Les essais sont réalisés sur des nappes rectangulaires tendues en travers d'un courant sur un cadre rigide. Il est placé de façon à ce que l'une des diagonales de chaque maille soit horizontale et orthogonale au plan vertical contenant la vitesse de l'écoulement incident. L'autre diagonale est située dans un plan vertical et l'angle φ qu'elle fait avec la vitesse est réglable. Les mesures ont été effectuées pour différentes longueurs de côté et angles (β) d'ouverture de maille.

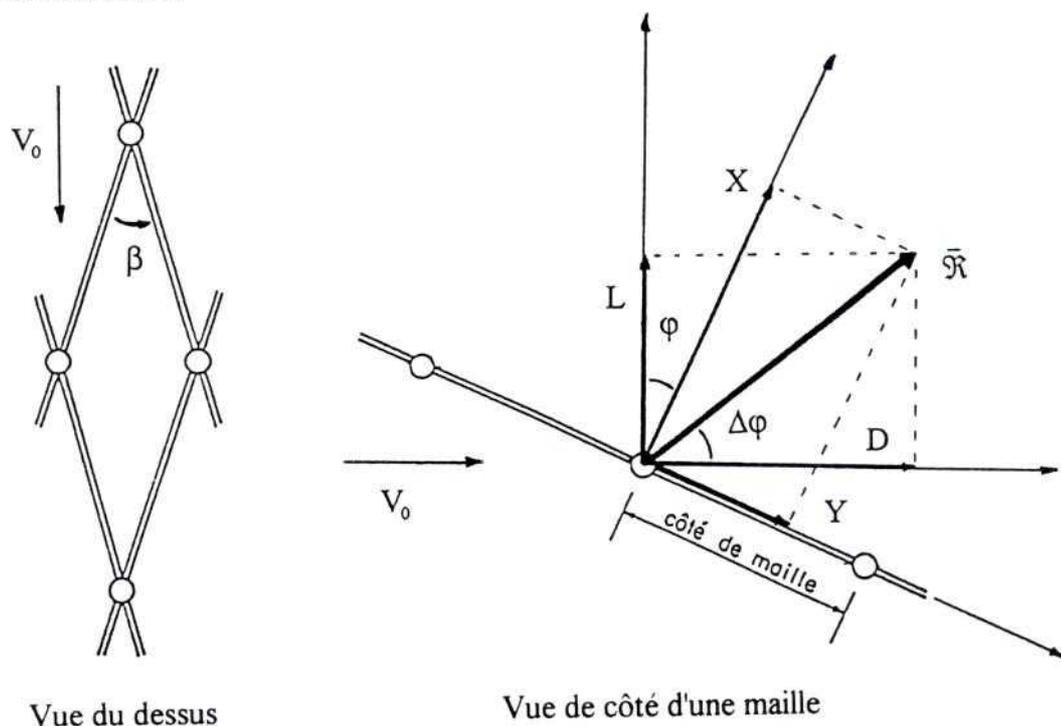


figure 16 : représentation des efforts sur une maille - notations

En étudiant les efforts hydrodynamiques qui s'exercent sur chacun des côtés de maille (les calculs seront développés dans la partie 3) on peut évaluer pour l'ensemble de la maille:

- la composante tangentielle de frottement Y qui par raison de symétrie est portée par la diagonale non horizontale.
- la composante normale due à la traînée de pression X qui est dirigée suivant la normale au plan de la maille.
- la composante suivant la diagonale horizontale qui est nulle par raison de symétrie.

Les deux premières composantes ont pour expression, en fonction de l'incidence de la maille φ , de son angle d'ouverture β , de la longueur l et du diamètre d du côté de maille:

$$X = 4 T$$

$$Y = 4 F \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

T et F étant respectivement les efforts de traînée (normale) et de frottement (tangential) sur un côté de maille (Landweber p.33).

Leur composition définit le vecteur \vec{R} résultante des efforts hydrodynamiques.

La méthode de présentation des résultats que Langenbach a adoptée semble s'inspirer d'une présentation usuelle en aérodynamique. Il décompose la résultante \vec{R} en une force de traînée D (parallèle à la vitesse du courant incident) et une force de portance L orthogonale au courant. Il appelle "déflexion" l'angle $\Delta\varphi$ que fait la résultante avec la vitesse incidente.

Il définit de manière classique un coefficient de traînée et un coefficient de portance :

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho S V_0^2}$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho S V_0^2}$$

S étant la surface frontale des fils constituant la maille ($S = 4 d l$)

Il vient alors :

$$\Delta\varphi = \text{arctg} \frac{C_L}{C_D}$$

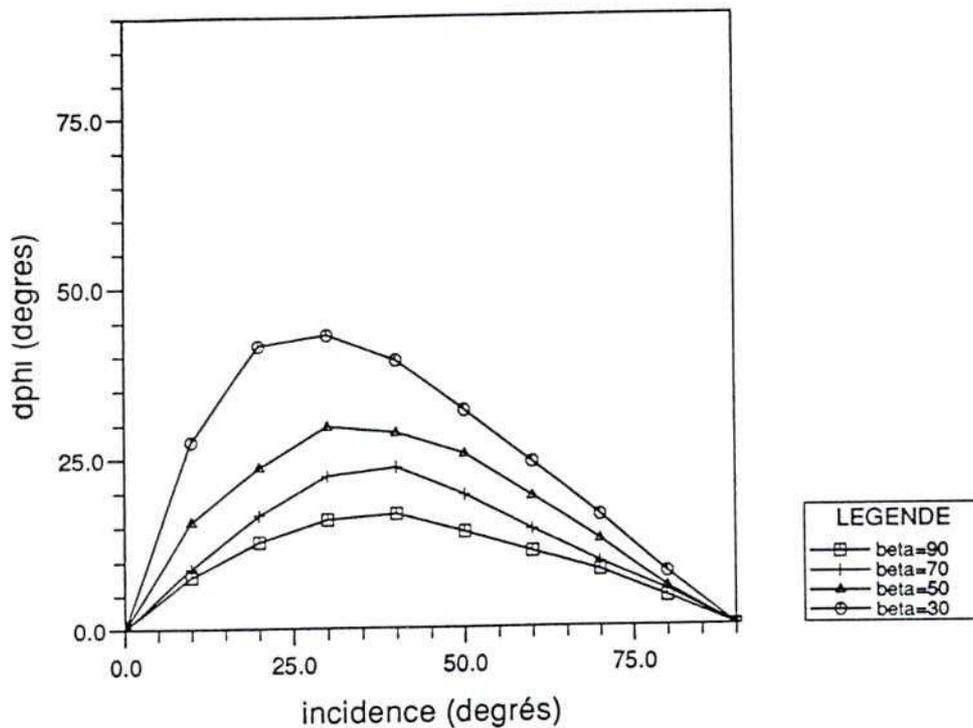
Il est aisé de passer d'une décomposition de la résultante à l'autre puisque:

$$D = X \sin\varphi + Y \cos\varphi$$

$$L = X \cos\varphi - Y \sin\varphi$$

2.3.12. résultats de Langenbach

Les résultats que nous présentons montrent les variations de $\Delta\varphi$ et du rapport C_L/C_{D0} (C_{D0} étant le coefficient de traînée mesuré lorsque la nappe est perpendiculaire au courant) en fonction de l'incidence de la maille.



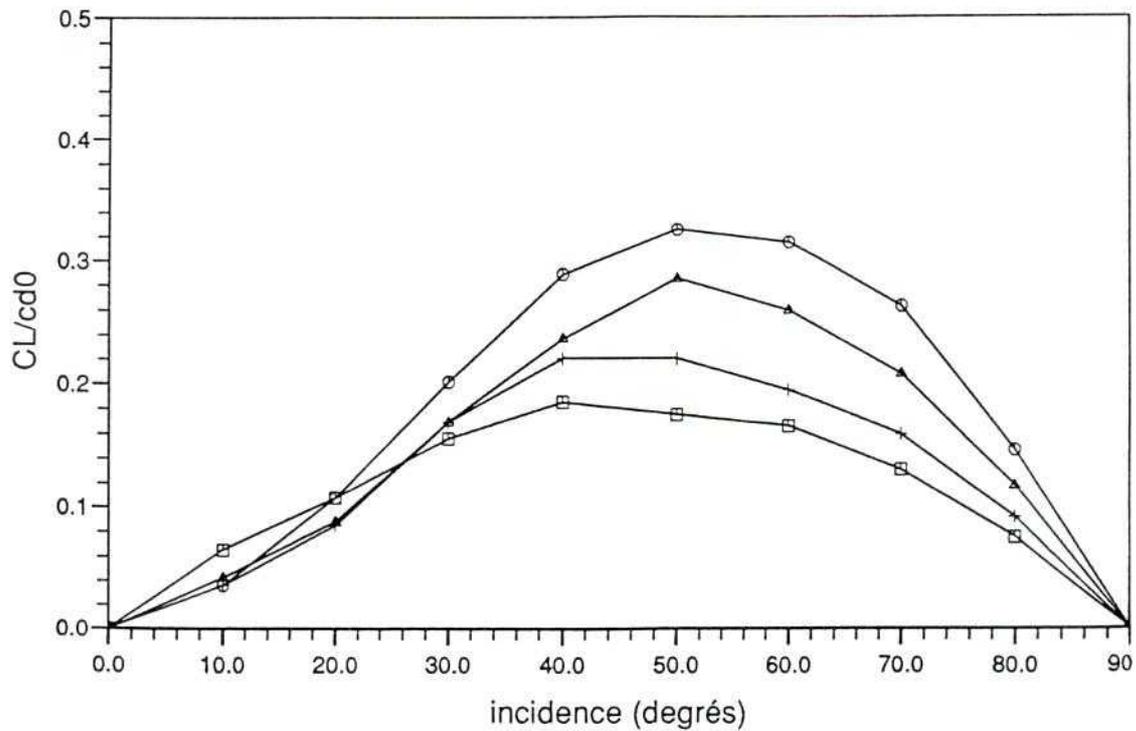


figure 17 : essais de Langenbach

Remarquons que :

1- le coefficient C_{D0} ainsi introduit par Langenbach dans le cas particulier de la nappe orthogonale au courant, est en fait égal au coefficient de traînée de pression que nous utilisons.

2- les grandeurs C_L/C_{D0} et $\Delta\phi$ sont indépendantes de la valeur de C_{D0} puisque ce coefficient intervient en facteur dans tous les termes de X, Y et donc de L et D.

2.3.2. Reconstitution avec les différentes hypothèses

Nous allons à l'aide de notre méthode de calcul tenter de reconstituer les résultats de Langenbach en utilisant successivement pour calculer les efforts hydrodynamiques les hypothèses de Landweber, O'hara et Richtmeyer.

Nous venons de signaler que la présentation de Langenbach était indépendante de la valeur de C_{D0} . La comparaison des résultats obtenus à partir de nos formules à ceux de Langenbach ne permet donc que de valider ou infirmer un schéma et amorcer l'identification de la valeur du coefficient de frottement. On ne peut pas en déduire une valeur de C_{D0} .

Dans un premier temps nous avons utilisé les hypothèses de **Landweber** (en donnant au coefficient f la valeur 0.1). Les résultats du calcul sont présentés sur la figure suivante:

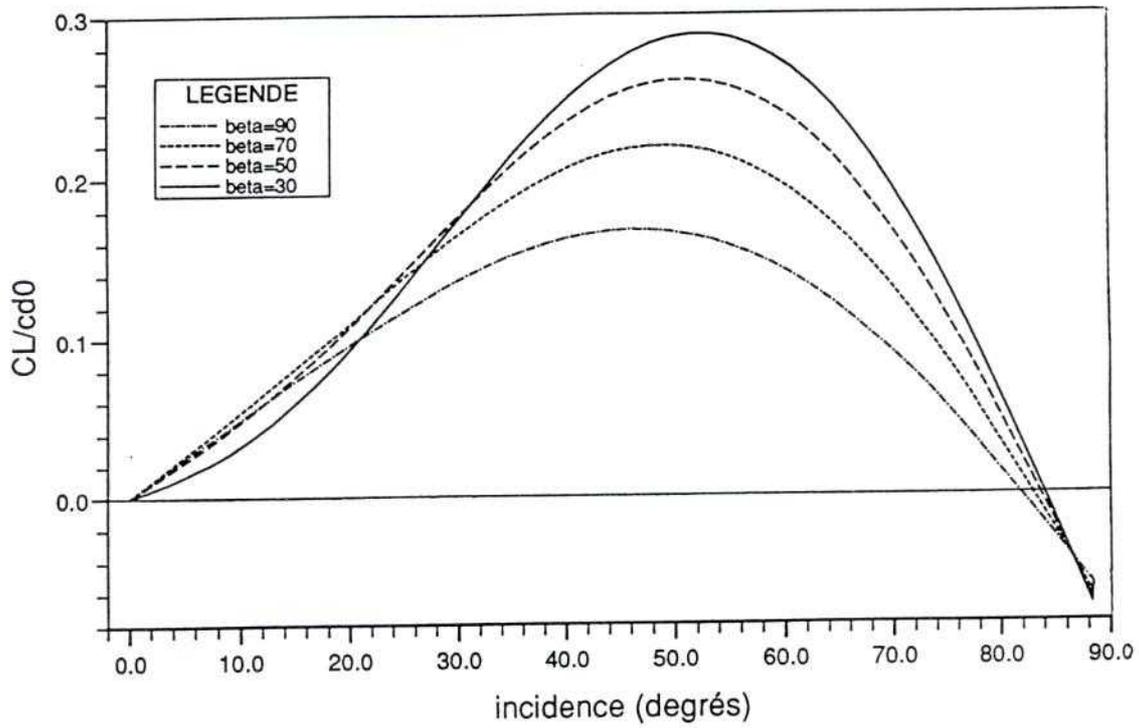


figure 18 : résultats obtenus avec les hypothèses de Landweber

On remarque immédiatement que si la portance, rapportée à la traînée normale, est représentée par une courbe dont l'allure est conforme à la courbe expérimentale pour les faibles valeurs de φ , elle atteint des valeurs négatives lorsque φ tend vers 90° ce qui n'est pas conforme à la réalité (il ne peut y avoir de composante tangente à la maille lorsqu'elle est placée perpendiculairement au courant).

Ceci est dû au fait que lorsque l'on utilise les hypothèses de Landweber on considère qu'il existe, quel que soit l'orientation du fil, une force de frottement qui est ici dirigée vers le bas. Lorsque la maille devient pratiquement perpendiculaire au courant cette composante subsiste.

On peut déduire de ces essais que les hypothèses de Landweber pourraient être acceptables pour les calculs de filet mais seulement lorsque l'incidence des nappes de filet reste faible.

L'application des hypothèses de **O'hara** donnerait des résultats plus proches de ceux de Langenbach. Mais en faisant varier l'angle β de 30° à 90° nous avons remarqué que, pour obtenir un bon ajustement avec les résultats expérimentaux, il était nécessaire de faire varier la valeur du coefficient de frottement f du simple au triple suivant l'ouverture de la maille (de $f = 0.06$ pour $\beta = 30^\circ$ à $f = 0.18$ pour $\beta = 70^\circ$ ou 90°). Nous n'avons pas trouvé d'explication physique à ces variations.

L'utilisation des hypothèses de **Richtmeyer** conduit aux résultats les plus proches des mesures de Langenbach. Les meilleurs résultats ont été obtenus en prenant un coefficient $f = 0.15$; ils sont présentés sur la figure suivante:

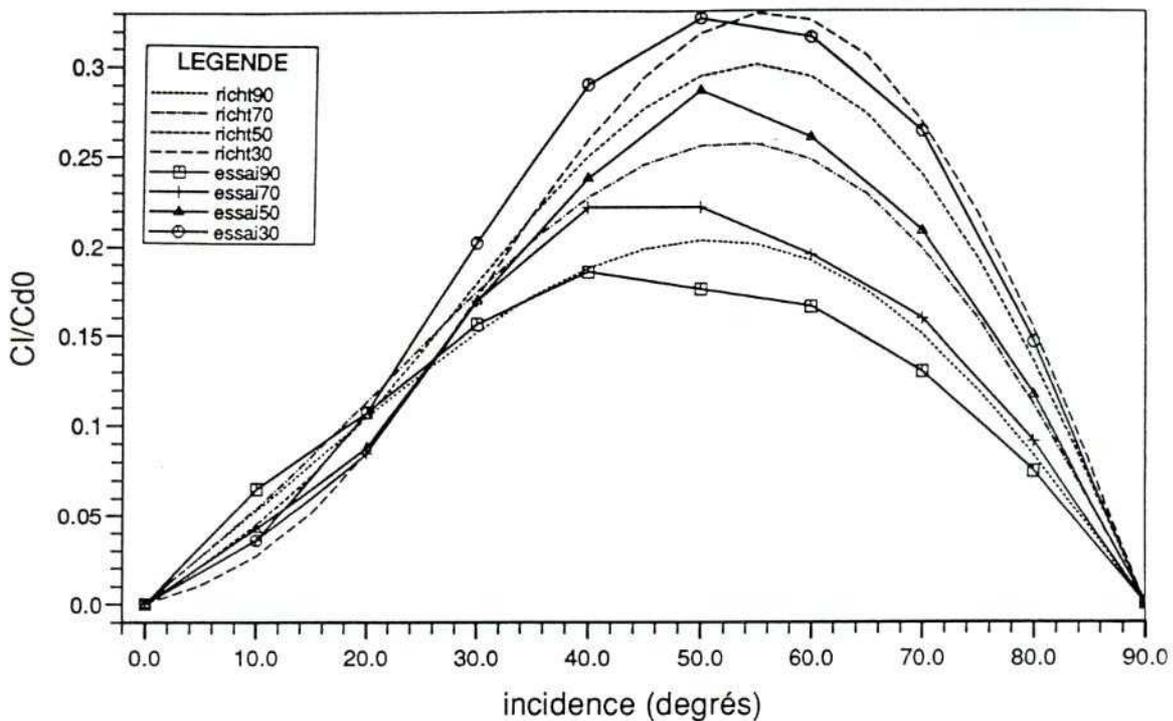


figure 19 : comparaison Richtmeyer/essais en faisant varier β de 30° à 90°

De cette analyse nous retiendrons que les hypothèses de Landweber modifiées selon la formule de Richtmeyer, en ce qui concerne le frottement, semblent les meilleures. Comme cette formulation n'apporte pas de complications importantes pour sa mise en oeuvre, c'est ce modèle que nous retiendrons.

Ces comparaisons ne nous ont apporté aucun renseignement en ce qui concerne le coefficient de traînée, par contre elles nous ont permis une première identification du coefficient de frottement; $f = 0,15$. On le trouve donc 10 fois plus grand que celui généralement proposé pour les câbles sous-marins (f voisin de 1 à 2 centièmes). On peut

sans doute trouver une partie d'explication de cette augmentation dans le fait que nous avons négligé dans ce calcul la présence des noeuds liant les fils entre eux.

2.3.3. Analyse de la formule du DIFTA

Nos partenaires danois (ce travail étant réalisé dans le cadre d'un contrat européen) souhaitent pouvoir introduire un schéma de calcul des efforts hydrodynamiques qu'ils ont établi. Nous avons donc analysé ce schéma.

Cette méthode est semi-empirique: elle utilise des coefficients calculés à partir d'expériences réalisées par le DIFTA.

Le fil est toujours considéré comme un câble, mais leurs hypothèses sont plus larges:

-- on tient compte des noeuds dont on calcule les efforts hydrodynamiques en les assimilant à des sphères, avec des modifications tenant compte de l'incidence du courant.

-- la force de frottement n'est pas tangentielle au fil mais parallèle à la vitesse du courant incident.

-- on tient compte de l'effet de masque que peuvent provoquer les fils et noeuds situés en avant du fil étudié.

Ainsi chaque fil n'est pas considéré du point de vue des efforts hydrodynamiques comme isolé dans un courant uniforme, mais réellement comme une partie élémentaire du filet.

On détermine ensuite des coefficients hydrodynamiques de traînée de pression et de frottement ainsi que le coefficient de traînée pour les noeuds. Ces coefficients sont multipliés par un terme correcteur S qui correspond à l'effet de masque. Ce facteur de réduction est exprimé de la façon suivante:

$$S = \left[1 - \frac{\sqrt{\frac{d}{1 + \sin^2 \theta \sin^2 \psi}}}{1 + \frac{1}{d} \operatorname{tg} \theta \cos \psi \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \psi}} \right]^2$$

Les angles θ et ψ correspondent aux angles d'Euler définis au paragraphe 3.2.12.

L'ensemble des coefficients a été déterminé expérimentalement, les essais étant encore réalisés sur des pièces de filet fixées sur un cadre rigide en faisant varier la vitesse du courant, l'incidence du cadre et l'angle d'ouverture des mailles.

Nous avons appliqué cette méthode pour encore reconstituer les résultats de Langenbach. Les courbes obtenues ont la même forme que celles de Langenbach, mais les valeurs sont plus élevées:

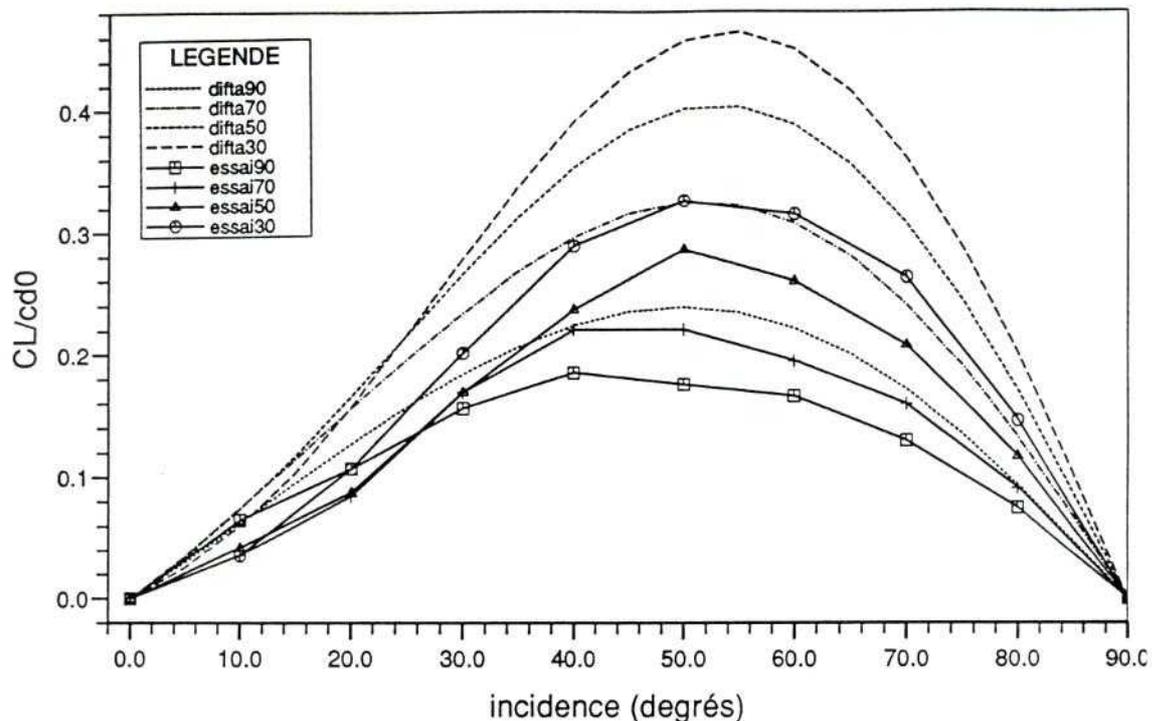


figure 20 : comparaison DIFTA/essais pour β variant de 30° à 90°

N'ayant pas de renseignements précis sur les alèzes utilisées par l'un et l'autre des laboratoires on ne peut pas conclure sur les valeurs effectives des coefficients.

2.3.4. Conclusion, choix des hypothèses

Les modèles qui semblent les mieux adaptés au calcul des efforts agissant sur les filets sont donc ceux de Richtmeyer et du DIFTA.

Les deux méthodes sont utilisables, nous préférons pour la suite de notre travail le **modèle de Richtmeyer** car les calculs sont très simples, qualité importante pour des

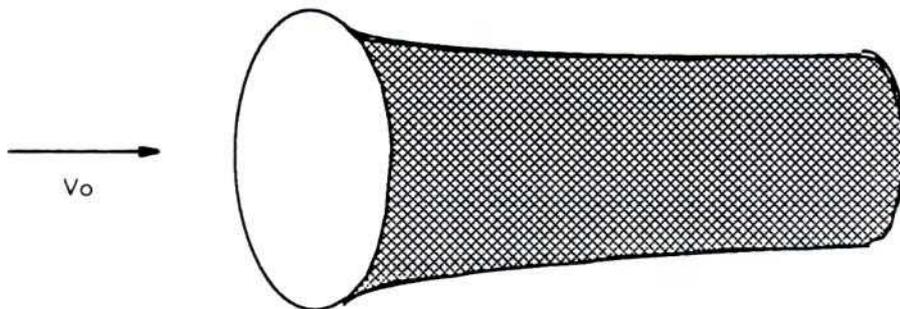
procédures itératives. Mais rien ne s'oppose à ce que nos partenaires modifient le sous programme de calcul des efforts hydrodynamiques pour introduire leur formulation.

2.4. Détermination des coefficients hydrodynamiques pour le filet

La partie précédente nous a permis de préciser le modèle à employer et de situer un ordre de grandeur du coefficient de frottement. Mais nous avons du procéder à quelques essais pour étudier le coefficient de traînée.

2.4.1. montage expérimental

Nous avons cherché à déterminer les coefficients hydrodynamiques en réalisant, au canal de Lorient, des essais sur une pièce de filet rectangulaire, lorsqu'elle est étirée à plat, cousue sur ses côtés et fixée sur un cerceau rigide. La forme d'équilibre est globalement comparable à un panier de basket dont l'axe de symétrie est horizontal.



Nous avons écrit un logiciel spécifique, inspiré de la méthode exposée plus loin, pour déterminer les tensions et forme de tels filets axisymétriques.

Les comparaisons ont porté sur la traînée totale du modèle et sur sa forme (relevé de la méridienne). La mesure de la traînée est obtenue en retranchant à la traînée totale la traînée du cerceau seul mesurée au préalable.

2.4.2. résultats

Nous avons réalisé une série de mesures au cours desquelles nous avons fait varier la vitesse, la longueur du filet ainsi que le montage (nombre de mailles montées sur le cerceau) donc l'angle d'ouverture des mailles. Puis nous avons procédé par identification pour déterminer les coefficients C_d et f qui introduits dans notre calcul donnaient les meilleurs résultats en forme et en tension (figure 21 et figure 22)

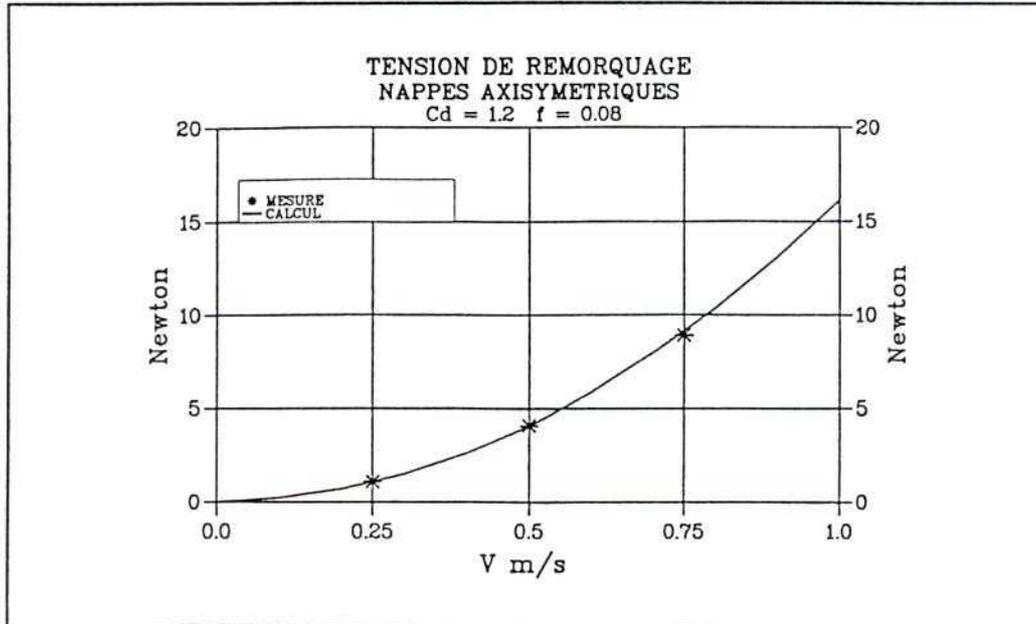


figure 21 : tension de remorquage

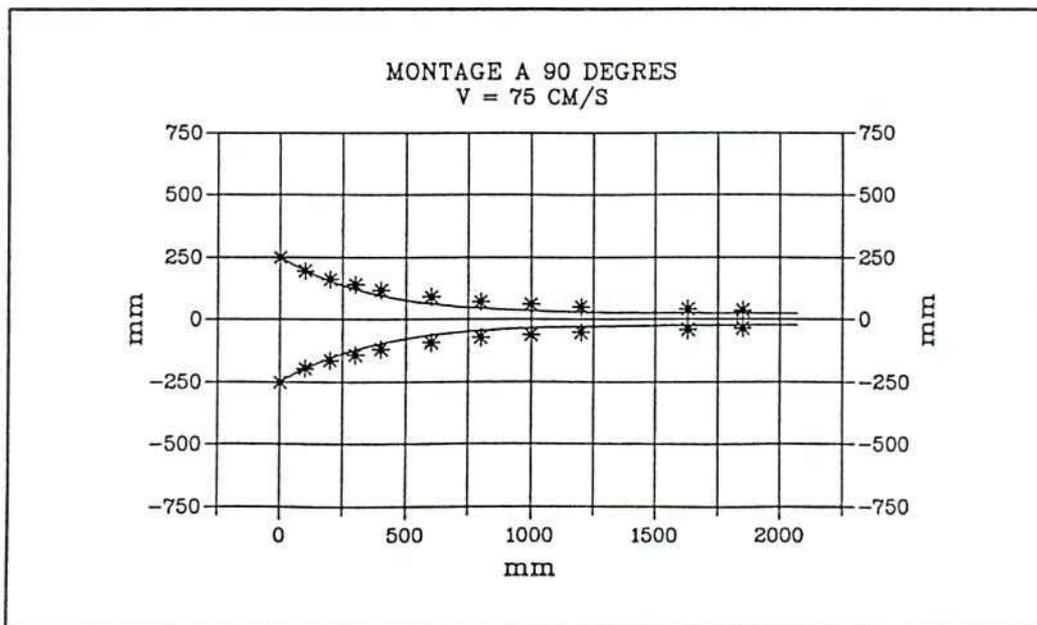


figure 22 : forme du filet fixé sur un cerceau

Nous avons obtenu $C_d = 1.2$ et $f = 0.08$. Cette valeur du C_d est celle qui est le plus souvent utilisée pour les cylindres rigides placés dans un écoulement uniforme pour le même nombre de Reynolds. La valeur du coefficient f est huit fois plus forte que celle couramment utilisée sur les câbles.

Les essais comparatifs avec ceux de Langenbach nous avaient donné une valeur de f égale à 0.15. Cette différence peut provenir de ce que les alèzes utilisées sont différentes. Celle de Lorient est du type "sans noeud", c'est-à-dire avec des liaisons présentant peu de surépaisseurs. C'est peut-être pour cela que nous trouvons une valeur inférieure.

2.5. Efforts hydrodynamiques sur les funes

2.5.1. Hypothèses

Les funes sont des câbles dont les calculs de formes et de tensions sont maintenant classique. Pour être homogènes dans nos modèles nous allons reprendre pour les câbles les hypothèses de Landweber en y apportant les modifications de Richtmeyer en ce qui concerne les efforts de frottement.

2.5.2. Valeur des coefficients de traînée et de frottement

Si ce schéma semble tout à fait justifié, l'expérience montre que la valeur usuelle $C_d = 1,2$ ne conduit pas à des résultats satisfaisants.

La figure 23 due à Pierre Loïc Bourget [3], montre l'influence du coefficient de traînée sur la forme calculée du câble ainsi que la bonne restitution d'un résultat expérimental lorsque l'on utilise la valeur $C_d = 1.8$.

Il semble que dans certaines conditions il soit même parfois nécessaire de prendre une valeur plus élevée. Cependant les travaux de l'équipe de Dominique Marichal montrent qu'en l'absence d'autres renseignements, la valeur $C_d = 1.8$ est la plus justifiée pour un câble de grande longueur.

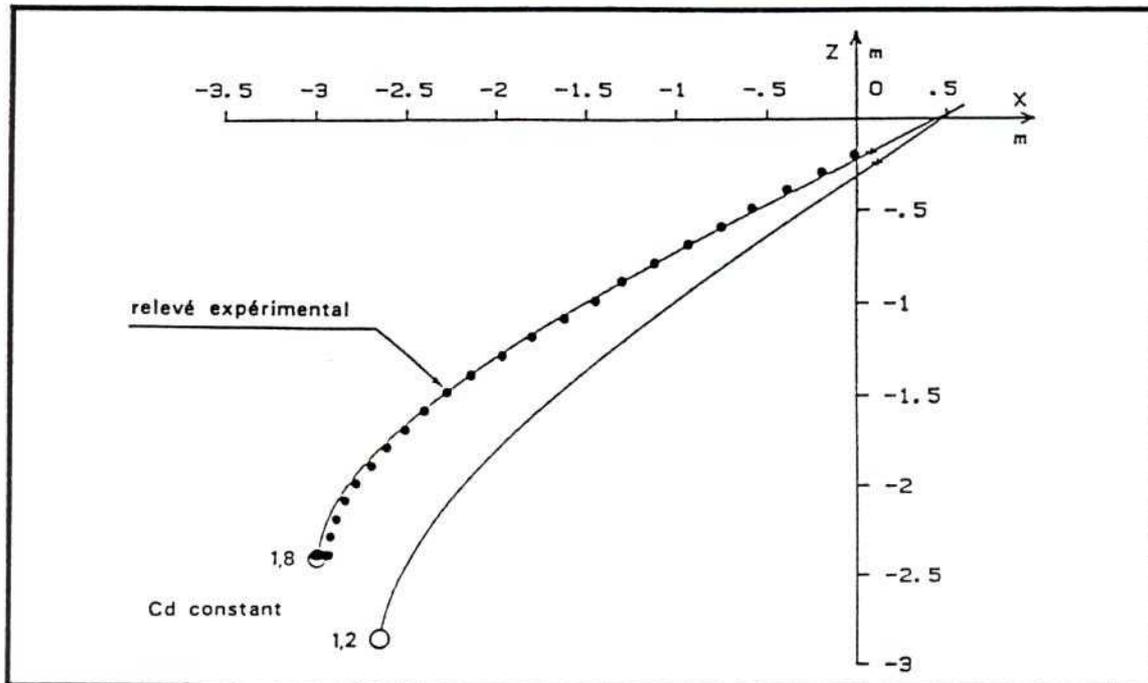


figure 23

Les auteurs sont unanimes pour attribuer cette augmentation du coefficient à l'influence des vibrations du câble [3].

On constate en effet que les câbles sont soumis à des vibrations provoquées par les lâchers de tourbillons alternés qui apparaissent derrière un cylindre circulaire en translation. Les mouvements latéraux, dont la vitesse peut devenir de l'ordre de grandeur de la vitesse d'avance, provoquent une augmentation de la traînée instantanée et dissipent donc une énergie importante. Cette dissipation est traduite par l'augmentation apparente du coefficient de traînée du cylindre ($C_d = 1.8$ ou plus). Ce coefficient n'est en fait plus vraiment le coefficient de traînée d'un cylindre mais une valeur moyenne dans le temps et dans l'espace (le long du câble).

Nous utiliserons pour le coefficient de frottement la valeur $f = 0.01$ couramment utilisée pour les câbles sous-marins (cf Landweber [8]).

Il est remarquable que pour les fils constituant les côtés de mailles notre identification nous a permis de retrouver la valeur $C_d = 1.2$, valeur usuellement attribuée au coefficient de traînée d'un cylindre rigide fixe placé dans un courant uniforme à des nombres de Reynolds comparables. Cela laisse sous entendre que les fils ne vibrent pas.

Cette absence de vibrations peut être observée lors des essais en bassin ou sur des films tournés par des plongeurs sur des engins réels en mer.

On peut expliquer cela en considérant que la présence de noeuds et le voisinage d'autres fils orientés de manière très différentes empêchent les tourbillons de s'organiser derrière un fil de côté de maille et donc de l'exciter. La structure même d'une nappe de filet joue donc le même rôle que celui des dispositifs réducteurs de traînée que l'on étudie pour les cylindres souples: rugosité de surface, rubans...

L'existence de ces deux cas extrêmes - câbles très longs (funes, bras...) et petits côtés de maille - laisse entrevoir une difficulté pour déterminer le coefficient de traînée des grandes mailles des chaluts pélagiques qui peuvent atteindre des longueurs supérieures à 8m.

Ici encore, en l'absence de critères plus précis, nous décidons d'attribuer la valeur

- 1.8 au coefficient de traînée des funes, des bras et des entremises
- 1.2 au coefficient de traînée des côtés de mailles et aux ralingues

2.6. Etude hydrodynamique des panneaux divergents

L'absence de données fiables concernant ces surfaces portantes nous a amenés à effectuer un travail expérimental afin de comparer les performances des principaux types de panneaux utilisés en pêche commerciale en Europe. Cette étude a été menée dans le cadre d'un contrat européen. Elle ne s'intéresse qu'aux panneaux de fond, les panneaux pélagiques existants ayant des performances déjà connues.

2.6.1. Définition et méthode de calcul des coefficients hydrodynamiques

Nous allons étudier les panneaux en déterminant pour chacun d'entre-eux un coefficient de portance et un coefficient de traînée définis de la manière suivante:

Soit \bar{R} la résultante des efforts extérieurs agissant sur le panneau autres que les efforts exercés par les funes et les bras. Le repère absolu est tel que l'axe Ox est orienté dans la même direction que l'écoulement, l'axe Oz vertical ascendant et l'axe Oy tel que le trièdre soit direct.

La résultante \vec{R} peut alors se décomposer en trois composantes: R_x , R_y et R_z

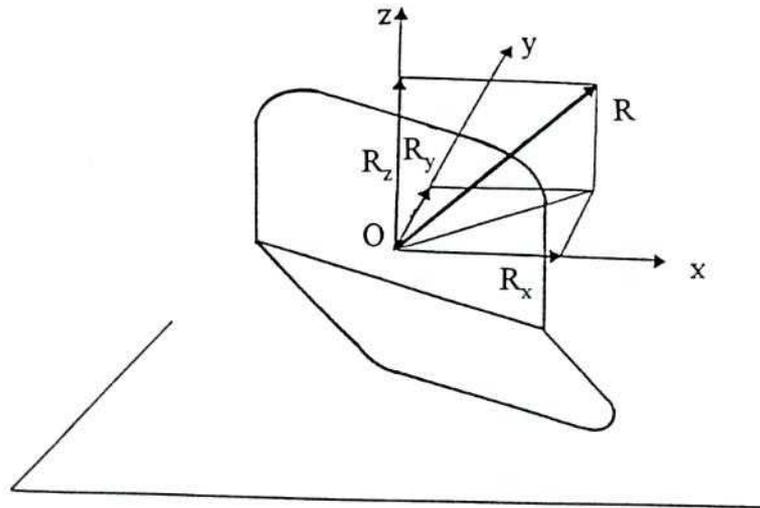


figure 24

La composante R_z est essentiellement due au poids du panneau et à la réaction verticale du sol, elle inclue également une partie des efforts hydrodynamiques que nous n'étudierons pas ici.

Les composantes R_x et R_y sont dues aux efforts hydrodynamiques et au frottement sur le fond, nous ne dissociérons pas, ici, ces deux types d'effort.

Nous définissons des coefficients adimensionnels de traînée et de portance globaux de la manière suivante:

$$C_d = \frac{R_x}{\frac{1}{2} \rho S V_0^2}$$

$$C_l = \frac{R_y}{\frac{1}{2} \rho S V_0^2}$$

où :

S est la surface "hors-tout" du panneau

V_0 est la vitesse du courant

ρ est la masse volumique de l'eau

La surface S "hors-tout" du panneau est égale au produit de sa longueur par sa hauteur.

Nous noterons r le rapport $\frac{C_l}{C_d}$ qui sera utilisé pour qualifier l'efficacité du panneau.

Nous allons étudier les variations des coefficients hydrodynamiques globaux en fonction de l'incidence du panneau.

2.6.2. Montage expérimental

Le montage expérimental (figures 25 et 26) a été réalisé de telle sorte que, sous l'action d'un courant uniforme, le panneau soit maintenu en équilibre par l'intermédiaire de trois câbles reliés à des "points fixes" du bassin. Les longueurs des câbles et les coordonnées des points "fixes" sont réglables afin de pouvoir modifier l'incidence du panneau.

Ce type de montage nous a été imposé par nos partenaires européens. Il est censé représenter, exactement, les conditions réelles de mise en oeuvre d'un panneau de fond. Il présente le grand inconvénient de rendre presque impossible la modification d'un paramètre sans modification des autres (on ne peut pas modifier l'incidence du panneau sans le déplacer dans le bassin ou modifier la longueur des funes...).

L'usage d'une véritable balance hydrodynamique, beaucoup plus coûteuse au départ, nous aurait, sans doute, évité bien des déboires. Mais, en tout état de cause, les résultats ainsi obtenus sont utilisables pour nos calculs.

Lorsque le panneau est en équilibre, la somme des forces extérieures agissant sur ce corps est nulle. Nous allons donc établir les équations d'équilibre en écrivant que la somme vectorielle des tensions des trois câbles est égale à la résultante \vec{R} des efforts hydrodynamiques, de frottement et de pesanteur s'exerçant sur le panneau.

Les modèles étudiés sont réalisés à l'échelle $1/4$ et essayés en mouvement relatif dans la veine du canal d'essais de chaluts de Lorient.

La zone d'observation a les caractéristiques suivantes: largeur 2,60 m, hauteur 1,50 m sur une distance d'observation de 4,50 m. La vitesse peut varier de 0,17 m/s à 1,2 m/s.

Il est équipé d'un tapis roulant, d'une longueur de 6 m, pour simuler le mouvement relatif du fond.

Les trois points fixes sont les points 1, 2 et 3 des figures suivantes:

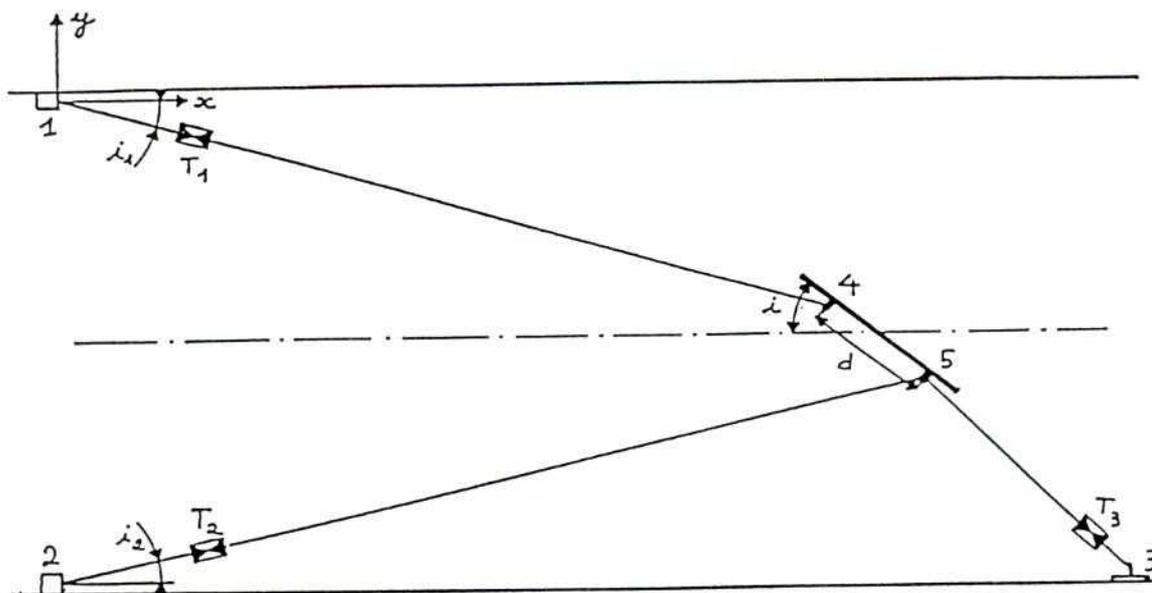


figure 25 : positionnement de la maquette (vue du dessus)

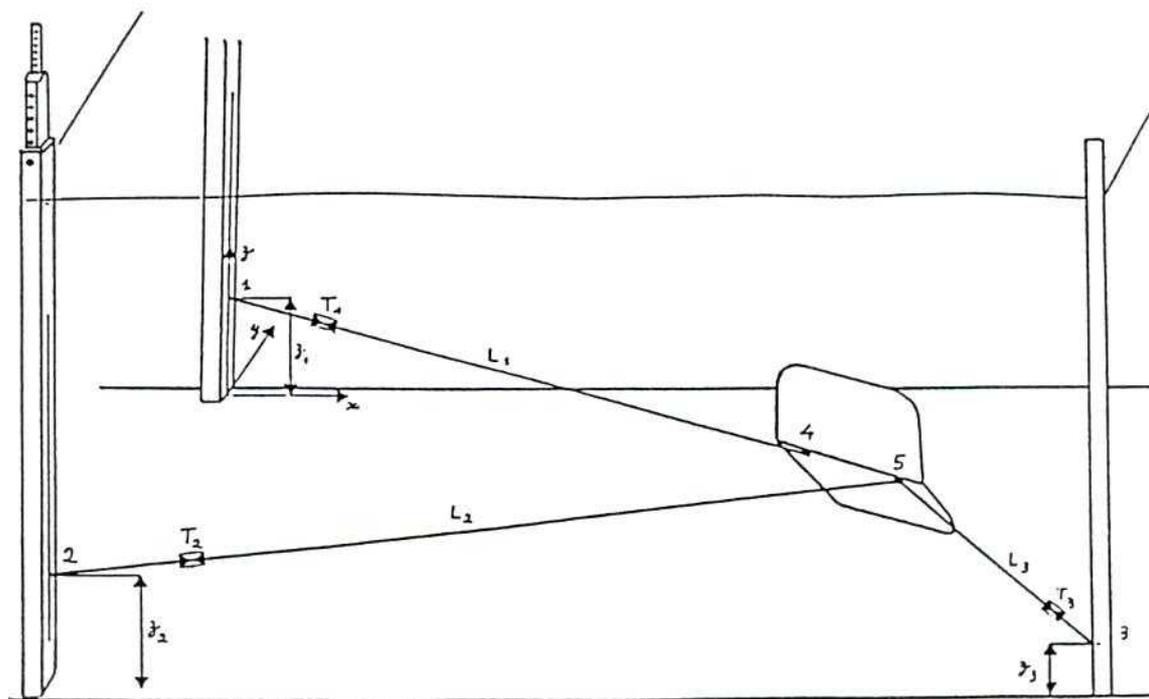


figure 26 : vue en perspective du montage

2.6.3. Calcul des coefficients hydrodynamiques globaux

Nous appellerons i le câble de longueur L_i issu du point i . Les points 4 et 5 sont situés sur la face avant du panneau.

Nous connaissons les coordonnées des points 1, 2 et 3 ainsi que les longueurs des câbles qui en sont issus. Nous mesurons l'incidence du panneau par visée optique et les tensions des câbles à l'aide de capteurs immergés à jauges de contrainte.

Les cotes z_4 et z_5 sont imposées par la géométrie du panneau. Nous allons calculer les coordonnées x_4, x_5, y_4 et y_5 en raisonnant en projection sur un plan horizontal. On notera L_i^* la projection de L_i . Ces longueurs projetées s'écrivent:

$$L_1^* = \sqrt{L_1^2 - (z_4 - z_1)^2}$$

$$L_2^* = \sqrt{L_2^2 - (z_5 - z_2)^2}$$

$$L_3^* = \sqrt{L_3^2 - (z_5 - z_3)^2}$$

la figure 28 montre que:

$$L_2^* \cos i_2 = L_1^* \cos i_1 + d \cos i$$

$$L_2^* \sin i_2 = -y_2 - L_1^* \sin i_1 - d \sin i$$

où d est la distance qui sépare les points 4 et 5.

posons

$$F = -y_2 - d \sin i$$

$$G = d \cos i$$

alors, en élevant au carré les deux équations et en les additionnant membre à membre:

$$L_2^{*2} = L_1^{*2} + 2GL_1^* \cos i_1 - 2FL_1^* \sin i_1 + G^2 + F^2$$

d'où

$$2GL_1^* \cos i_1 = L_2^{*2} - L_1^{*2} + 2FL_1^* \sin i_1 - G^2 - F^2$$

soit

$$2GL_1^* \sqrt{1 - \sin^2 i_1} = 2H + 2FL_1^* \sin i_1$$

avec

$$2H = L_2^{*2} - L_1^{*2} - G^2 - F^2$$

ce qui peut s'écrire:

$$AL_1^{\bullet 2} \sin^2 i_1 + BL_1^{\bullet} \sin i_1 + C = 0$$

avec

$$A = F^2 + G^2$$

$$B = 2HF$$

$$C = H^2 - G^2L_1^{\bullet 2}$$

or

$$y_4 = -L_1^{\bullet} \sin i_1$$

donc

$$Ay_4^2 - By_4 + C = 0$$

on choisit la valeur de y_4 qui permet de retrouver L_2 , puis on calcule:

$$x_4 = \sqrt{L_1^{\bullet 2} - y_4^2}$$

$$x_5 = x_4 + d \cos i$$

$$y_5 = y_4 - d \cos i$$

On écrit alors que la résultante R des efforts hydrodynamiques, de frottement et de pesanteur est égale et opposée à la somme vectorielle des trois tensions des câbles.

Soit:

$$R_x = \frac{x_4 - x_1}{L_1} T_1 + \frac{x_5 - x_2}{L_2} T_2 + \frac{x_5 - x_3}{L_3} T_3$$

$$R_y = \frac{y_4 - y_1}{L_1} T_1 + \frac{y_5 - y_2}{L_2} T_2 + \frac{y_5 - y_3}{L_3} T_3$$

On détermine ensuite les coefficients globaux qui caractériseront les panneaux:

$$C_d = \frac{2R_x}{\rho S V^2}$$

$$C_l = \frac{2R_y}{\rho S V^2}$$

$$r = \frac{C_l}{C_d}$$

2.6.4. Résultats

A titre d'exemple nous présentons les résultats que nous avons obtenus sur le premier panneau étudié dénommé "Vee door".

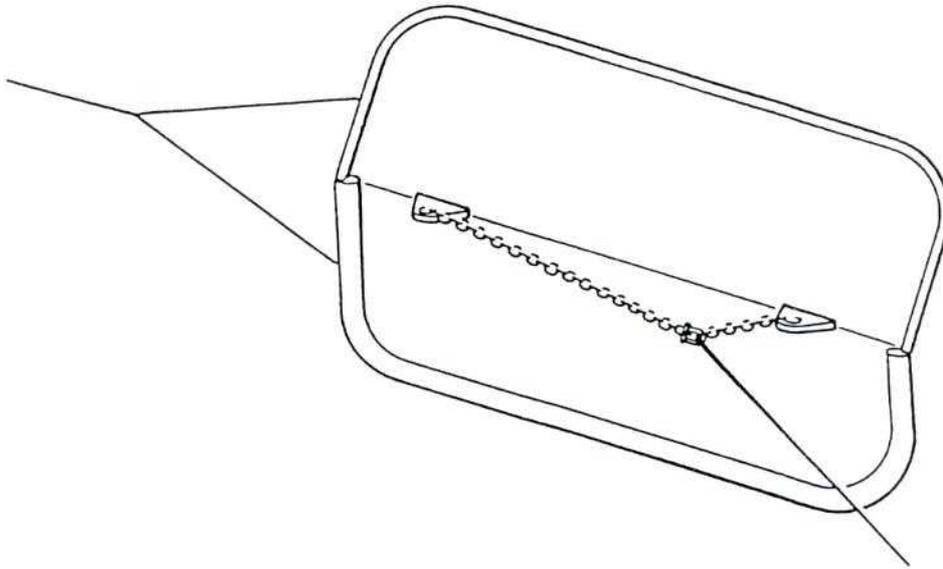


figure 27 : vue en perspective du modèle "Vee door"

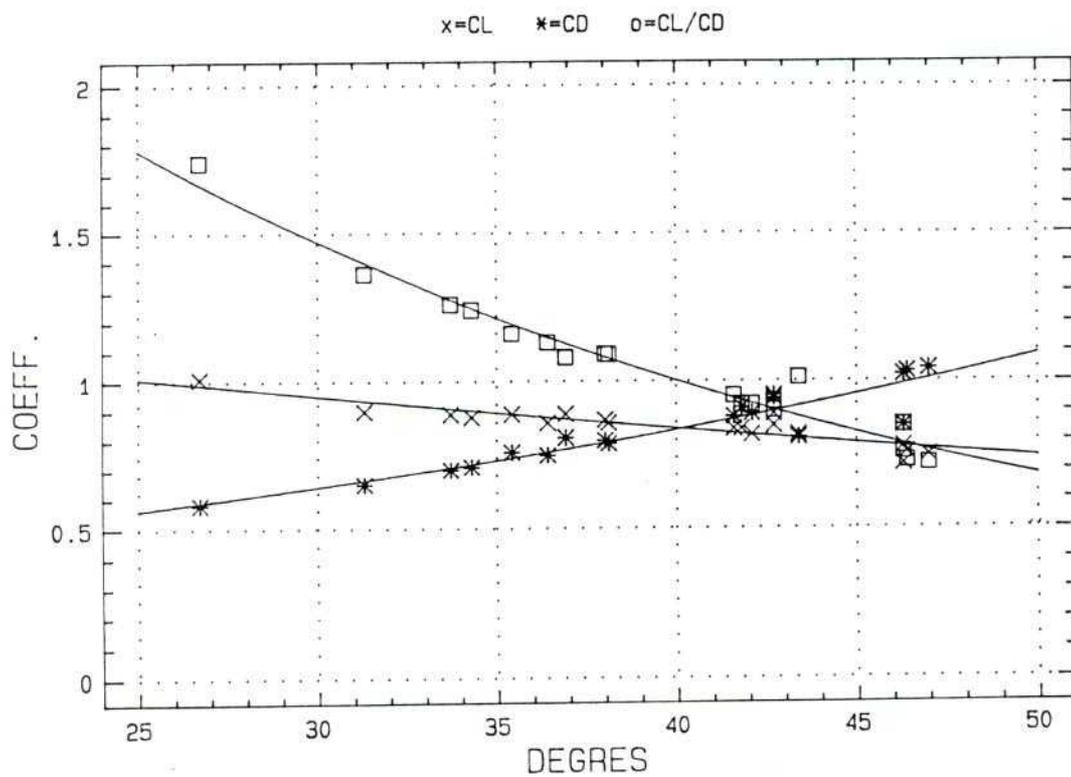


figure 28 : coefficients globaux du panneau "Vee door"

Les essais étaient réalisés à la vitesse de 0,70 m/s.

Une vingtaine de modèles ont été testés par les trois laboratoires afin de couvrir l'ensemble des panneaux utilisés en Europe.

Les panneaux de fond sont utilisés à un angle d'attaque habituel compris entre 35° et 40°, à l'exception des modèles à grand allongement vertical où cet angle est de l'ordre de 25°.

D'une manière générale, pour les panneaux de fond étudiés, le C_l varie de 0,80 à 1,25 tandis que le C_d varie de 0,65 à 0,80, le terme r étant compris entre 1,15 et 1,5.

En ce qui concerne le modèle rectangulaire à grand allongement vertical, le C_l est égal à 1,30, le C_d à 0,50 soit un terme r de 2,60. Ce type de panneau plus performant que les autres est peu utilisé en raison de sa grande instabilité, il tombe en effet souvent à plat lorsque le chalutier tourne.

2.6.5. Cas des panneaux pélagiques

Les panneaux utilisés en pélagique, c'est-à-dire en pleine eau, sont tous d'un même type: "Süberkrüb", et ont des performances bien meilleures que les modèles de fond.

Lorsqu'ils sont utilisés à leur angle d'attaque habituel, qui est 15°, le C_l est égal à 1,5 et le C_d à 0,25 soit un rapport r de 6.

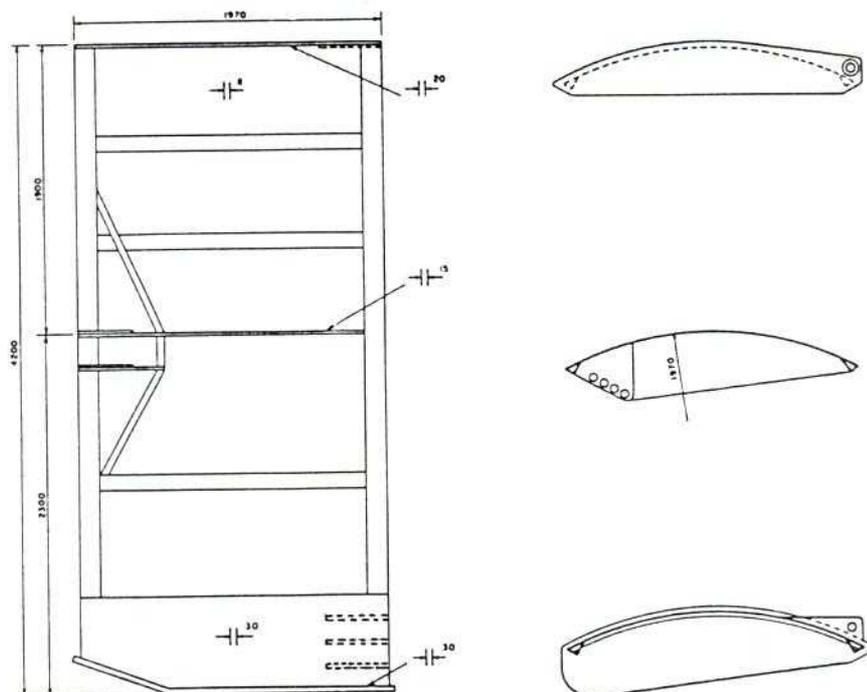


figure 29 : panneau pélagique Süberkrüb

2.7. Le frottement sur le fond

Nous n'aborderons ici que les éléments du train de pêche qui sont susceptibles de rester en contact avec le fond. Il s'agit des panneaux divergents et du bourrelet du chalut.

Pour des raisons d'usure et pour éviter les avaries les nappes de filet ne sont pas en contact avec le fond (sauf anomalie). Cette propriété est obtenue en jouant sur la forme du chalut lui-même; notre programme pourra permettre de la vérifier avant toute mise à l'eau.

2.7.1. Cas des panneaux divergents

Le frottement des panneaux n'est pas étudié séparément, car il est pris en compte dans la détermination des coefficients globaux C_1 et C_d . En utilisant ces coefficients nous tenons compte implicitement du frottement sur le fond.

Il sera, là encore, nécessaire d'améliorer notre connaissance. Les essais étant réalisés avec des tapis lisses, jusqu'à quelle limite sont ils représentatifs du frottement sur un sol réel et de nature variable (sable, vase, graviers...)?

2.7.2. Cas du bourrelet

Dans une thèse présentée à l'université d'Aberdeen, Lu Chi [9], après une étude bibliographique et des expériences en laboratoire, arrive à la conclusion suivante:

L'effort de frottement F_r peut s'écrire sous la forme classique:

$$F_r = f_r G$$

où f_r est le coefficient de friction et G le poids apparent dans l'eau du bourrelet.

Dans nos calculs le terme G sera calculé comme étant égal et opposé à la force de réaction du fond sur le bourrelet.

Ensuite, il a développé une méthode pour mesurer le frottement du bourrelet sur un fond de sable et sur un fond de vase. Il remorquait à l'aide d'une voiture tout-terrain

différents types de bourrelet sur une plage à marée basse et a ainsi réalisé des mesures de frottement en l'absence d'efforts hydrodynamiques.

Ses résultats ne semblent pas assez généraux pour être intégrés dans notre calcul. Il s'agit encore d'une amorce d'étude qui permet de mettre en évidence une autre difficulté de ce problème.

2.8. Les singularités du gréement

2.8.1. Définition

Nous appellerons singularité tout élément, autre que les câbles et le filet, qui introduit un effort ponctuel en un noeud du train de pêche.

Ces singularités pourront être par exemple les panneaux divergents (déjà étudiés), des flotteurs, des lests ou des surfaces portantes telles que des ailes souples.

2.8.2. Les flotteurs

Les flotteurs, généralement de forme sphérique, sont habituellement fixés sur la corde de dos d'un chalut de fond. Leur fonction est de produire la composante verticale nécessaire pour obtenir l'ouverture verticale souhaitée du chalut. Les efforts dus aux flotteurs peuvent se décomposer en deux composantes:

-- l'une verticale S_{y_f} , égale à la flottabilité du flotteur considéré et, donc, indépendante de la vitesse.

-- l'autre horizontale S_{z_f} , dirigée selon le courant, égale à la traînée du flotteur:

$$S_{z_f} = \frac{1}{2} \rho C_{df} S_f V_0^2$$

avec S_f qui est la surface projetée du flotteur soit πr^2 , r étant le rayon du flotteur, V_0 la vitesse du courant et C_{df} le coefficient de traînée du flotteur.

Nous prendrons $C_{df} = 0.5$ qui est la valeur utilisée pour les sphères dans la même gamme de nombre de Reynolds.

L'inconvénient de ces dispositifs très simples est que la force d'ouverture est constante alors que la traînée croît comme le carré de la vitesse. Leur efficacité diminue donc rapidement et pour maintenir l'ouverture aux vitesses élevées il faut en augmenter le nombre et donc la traînée totale.

2.8.3. Les ailes souples

Pour pallier le problème soulevé à la fin du paragraphe précédent nous avons imaginé une surface portante souple. Ce système présente d'autres avantages tels qu'un faible encombrement pour le stockage sur un enrouleur, il n'est pas sensible à la pression (travail en grande profondeur) et il présente une bonne stabilité en pêche.

Le modèle retenu a été un biplan souple alvéolé fixé au milieu de la corde de dos du chalut. Il a été inspiré des ailes de parachute ascensionnel:

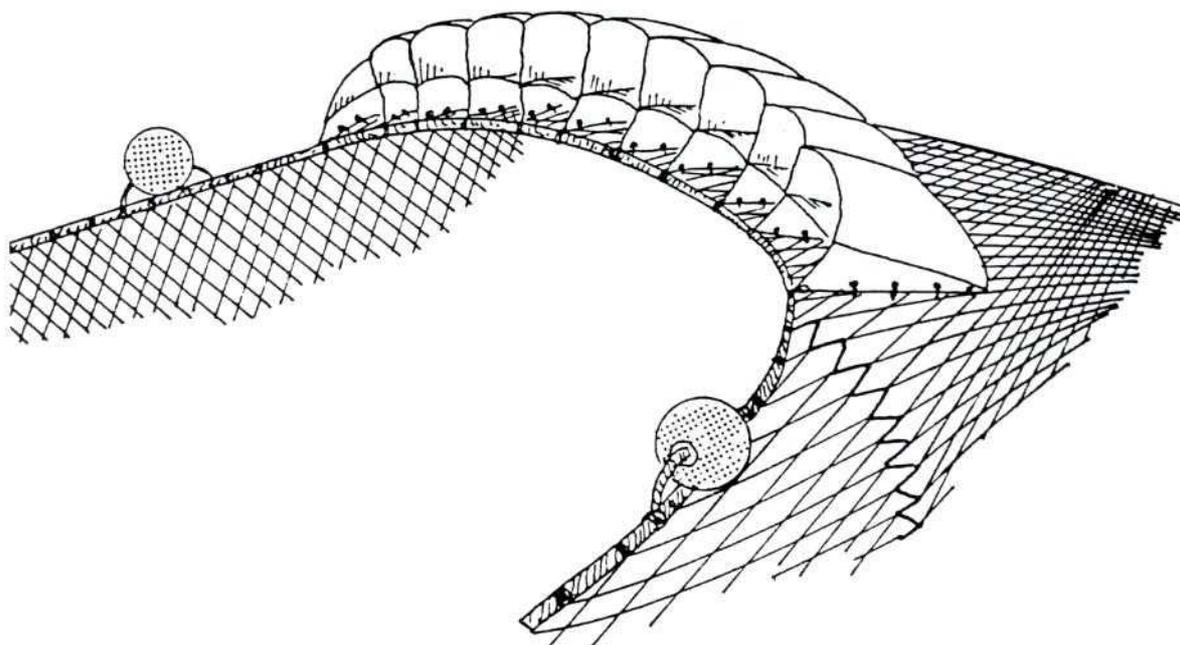


figure 30 : biplan souple alvéolé

Des essais dans la veine de Lorient ont permis d'en déterminer les coefficients de traînée et de portance. La figure ci-dessous présente rapidement le montage utilisé:

Vue en coupe de l'installation

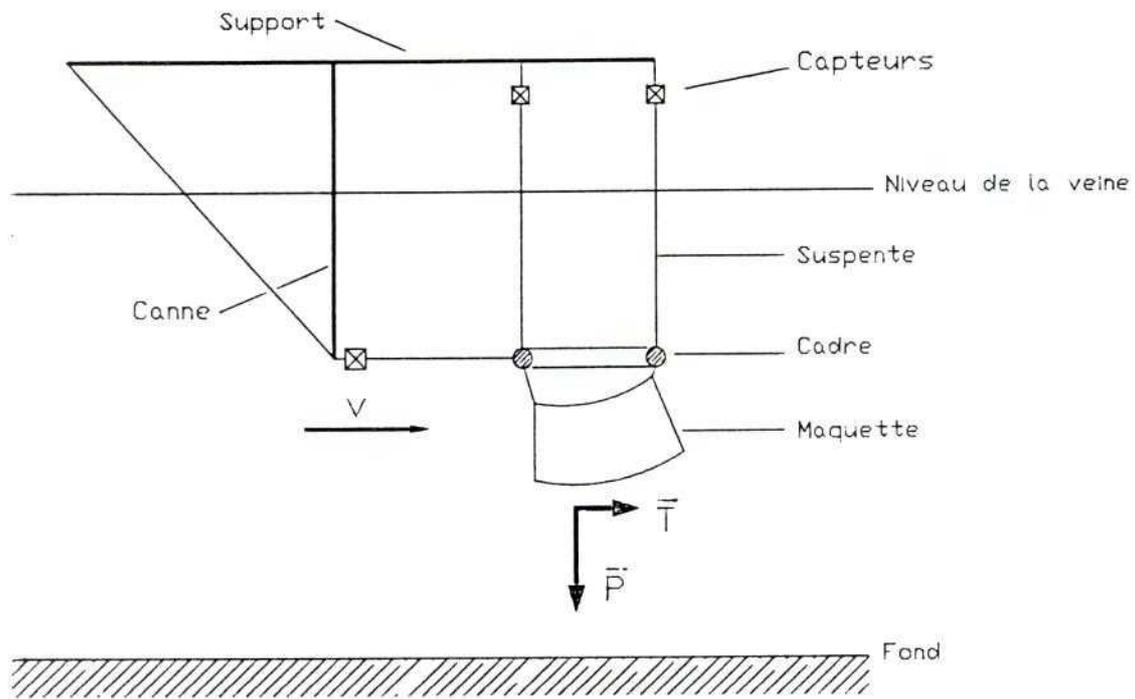


figure 31 : description du montage expérimental

Nous avons obtenu une valeur de 0.29 pour le coefficient de traînée et de 1.01 pour le coefficient de portance.

Nous avons présenté très succinctement cette étude connexe de notre logiciel de calcul de chalut pour en souligner un intérêt supplémentaire. Il saura permettre des essais numériques simulant le comportement d'un chalut équipé de tels systèmes innovants avant même leur réalisation définitive.

PARTIE 3

PROGRAMME GENERAL

Nous venons d'analyser, séparément et d'un point de vue dynamique (c'est-à-dire en étudiant les efforts), les différents éléments qui interviennent dans le train de pêche. Nous disposons donc maintenant des éléments nécessaires pour étudier l'ensemble.

La première difficulté rencontrée est de traduire sous une forme utilisable par l'ordinateur l'ensemble des données contenues dans le plan d'un chalut. Nous aborderons ce point dans le paragraphe suivant. Puis nous présenterons la méthode générale d'étude de l'équilibre d'un noeud. Enfin nous décrirons la méthode de résolution du système obtenu en regroupant les équations d'équilibre de tous les noeuds.

Remarquons que dans cette partie nous considérons que nous tenons compte de tous les noeuds existant réellement dans le chalut. Cela peut conduire très rapidement à des systèmes d'ordre très élevé. Il ne serait alors possible que de traiter des cas très particuliers (l'équivalent des maquettes essayées en bassin). Nous présenterons dans la partie suivante la manière de résoudre ce problème.

3.1. Description du chalut.

A partir du plan du chalut on crée trois tableaux:

- Description des noeuds et de leurs liaisons avec les noeuds voisins.
- Description des fils et des singularités.
- Description de la forme initiale.

3.1.1. Description des noeuds.

Nous considérons le noeud de base comme étant un noeud reliant au maximum 4 fils:

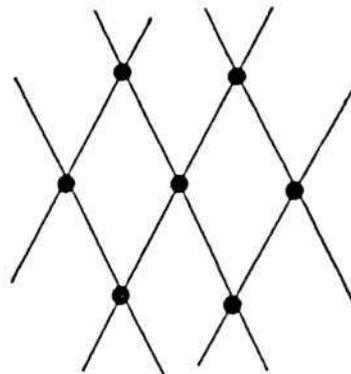


figure 32

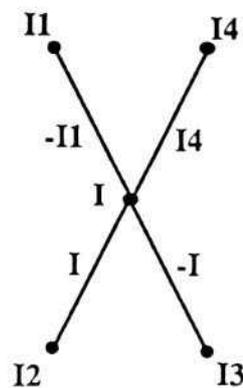
Cette limitation à quatre fils est imposée par le nombre d'équations disponibles pour écrire les relations d'équilibre des noeuds (il sera facile de déduire des relations établies pour les noeuds à quatre fils les relations générales pour les noeuds à trois et deux fils). En fait, notre procédure de résolution sera telle que la limitation exacte est qu'un noeud ne doit pas lier entre-eux plus de deux fils dirigés vers l'avant du chalut. Le nombre de fils sortant vers l'arrière est, quand à lui, illimité.

Les différents types de noeuds sont repérés par un numéro indiqué sous les figures.

Pour éviter la multiplication des figures, les indices servant à la numérotation des fils sont portés sur ces mêmes figures, ils seront commentés un peu plus tard.

Nous avons été amenés à distinguer trois familles de noeuds:

- Noeuds à 4 fils.



Type 4

figure 33

- Noeuds à 3 fils.

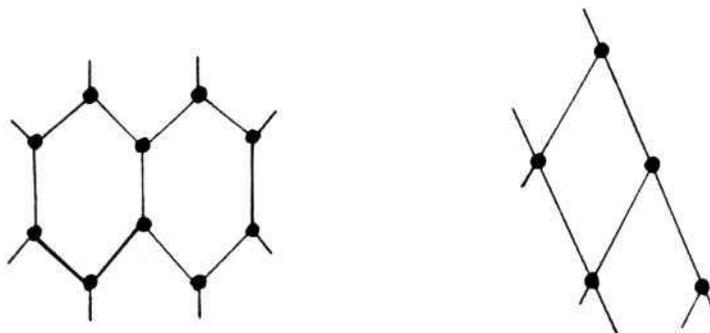


figure 34

Ils permettent de décrire des mailles hexagonales ou des coupes latérales.

Ils sont indispensables pour réaliser les liaisons entre les différentes pièces du chalut.
 Nous avons retenu 4 types de noeuds à trois fils:

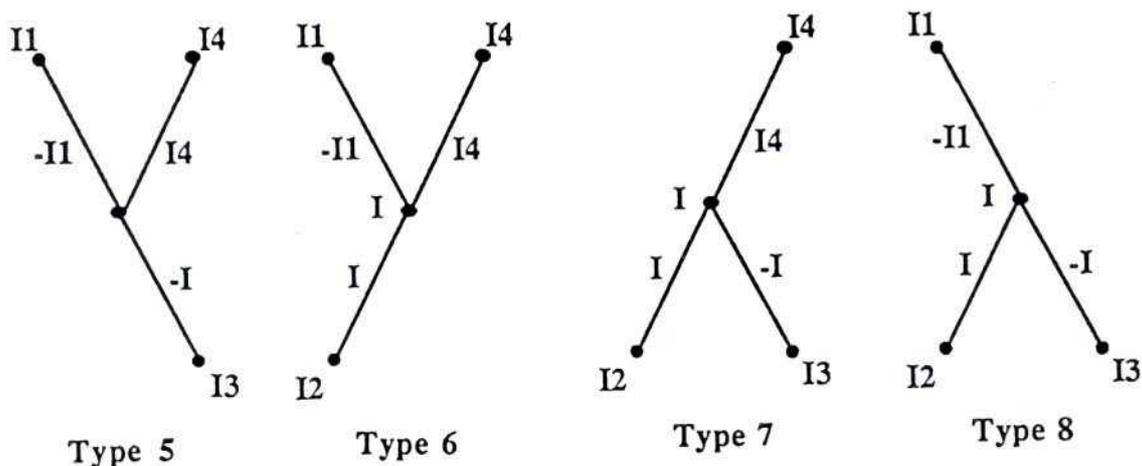


figure 35

- Noeuds à 2 fils.

Ces noeuds permettent de décrire un fil qui doit être découpé en n segments. Les fils concernés pourront être les mailles du chalut, les éléments du gréement du chalut, ainsi que les funes reliant le chalut au navire.

Nous justifierons un peu plus tard la nécessité de "couper" chaque partie de maille en deux. Le milieu de chaque côté de maille sera pour nous un noeud à deux fils.

5 types de noeuds à deux fils ont été retenus:

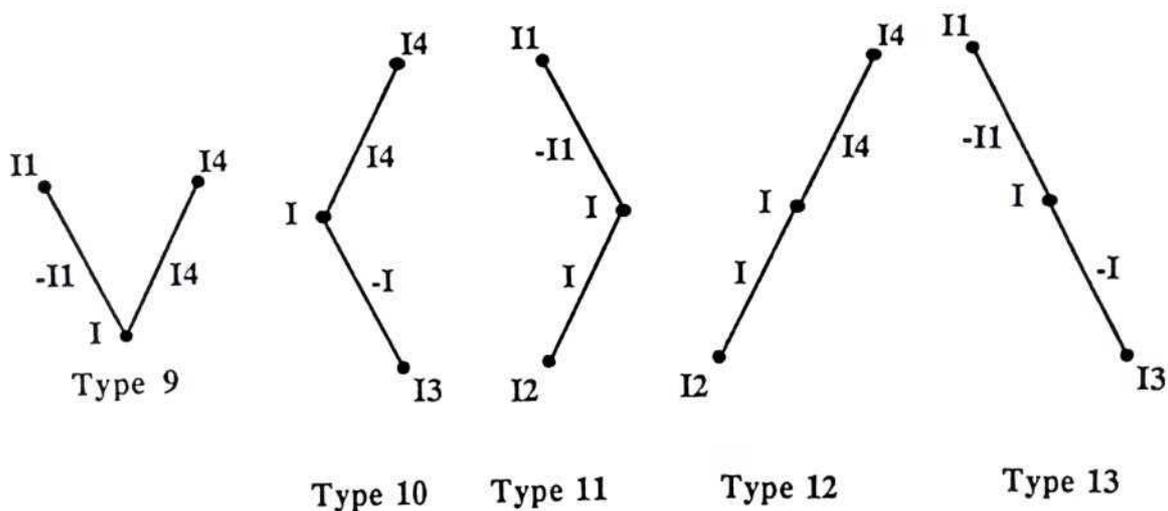


figure 36

Remarque: Il faut distinguer :

- Les noeuds au *sens de la mécanique générale*. Ce sont en fait les points géométriques du filet auxquels nous concentrerons les efforts appliqués sur la maille et dont nous écrirons l'équilibre.

- Les noeuds au *sens de liaison physique* entre les fils. Il s'agit de la jonction des fils entre eux, elle se traduit généralement par une surépaisseur et nécessite la prise en compte d'efforts ponctuels (singularités).

Nous serons amenés à étudier des alèzes de type "*sans noeud*". Il s'agit là d'une dénomination commerciale qui précise que ces surépaisseurs sont pratiquement négligeables, mais les fils sont bien reliés entre eux.

Tous les noeuds sont décrits de la même manière, les noeuds à 2 et 3 fils n'étant que des cas particuliers des noeuds à 4 fils.

Nous allons générer un tableau de description des noeuds, que nous appellerons tableau de liaison, de la manière suivante:

Considérons le cas d'une alèze dont les mailles sont en forme de losange. Chaque noeud du filet est affecté d'un numéro. Le tableau de liaison indique en premier son type, et ensuite les numéros des quatre noeuds voisins.

Dans un tel filet, le nombre de fils est, de manière très générale, deux fois plus important que le nombre de noeuds. Aussi on affecte à chaque fil un numéro qui est celui du noeud dont il est issu, précédé du signe + ou du signe - selon son orientation. On complète le tableau de liaison par l'indication des quatre numéros des fils qui se rejoignent au noeud I.

Dans le cas des noeuds à 2 ou 3 fils, on écrit 0 dans les colonnes où les noeuds ou les fils sont inexistantes.

I	type	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	-I ₁	I	-I	I ₄
86	18	-89	0	0	89	-86	0	0	-86
87	12	0	100	0	83	0	87	0	83
88	13	83	0	101	0	-83	0	-88	0
89	14	86	103	104	84	-86	89	-89	84
90	4	85	105	106	65	-85	90	-90	65
91	4	66	107	108	67	-66	91	-91	67
92	4	68	109	110	69	-68	92	-92	69
93	4	70	111	112	71	-70	93	-93	71
94	15	72	113	114	95	-72	94	-94	95
95	18	94	0	0	96	95	0	0	-95

tableau 1 : tableau de liaison

- Noeuds particuliers

En raison de la diversité des noeuds existant dans un chalut nous avons été amenés à prendre en compte deux noeuds dont la numérotation est différente du cas général décrit ci-dessus.

Ces deux types de noeuds sont les suivants :

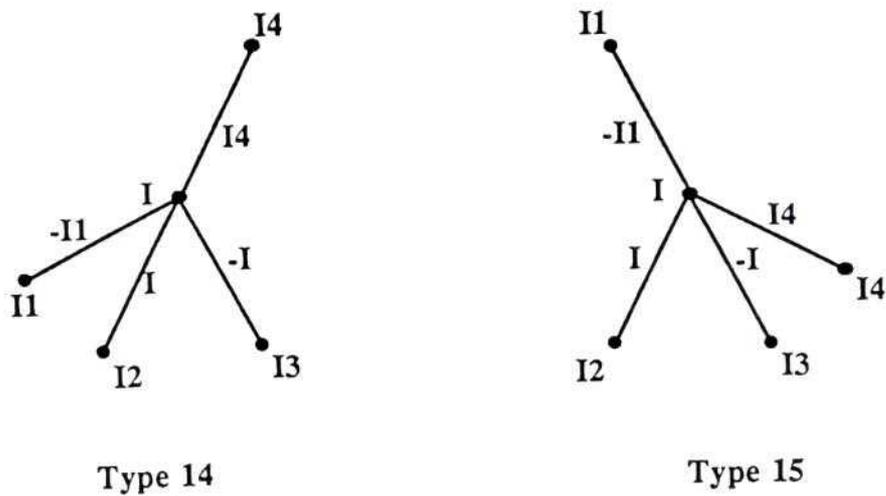
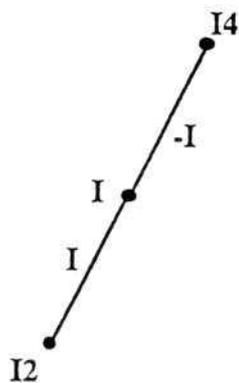


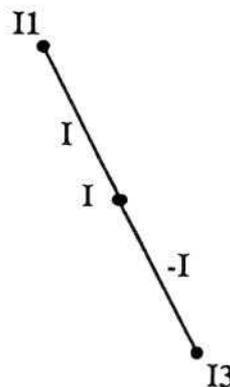
figure 37

Pour les relier d'une manière cohérente à leurs noeuds voisins nous avons créé les trois types de noeuds suivant :

- le type 16 pour relier le noeud I de type 14 à son voisin I1 par l'intermédiaire d'un fil -I1 et le type 17 pour raccorder le noeud I de type 15 à son voisin I4 par le fil I4.



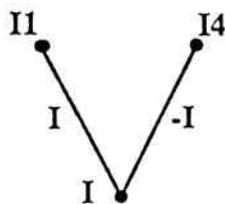
Type 16



Type 17

figure 38

- le noeud de type 18 pour raccorder entre eux les noeuds de types 14 et 15 :



Type 18

figure 39

A l'aide de ces types de noeuds nous pouvons maintenant entrer dans le tableau de liaison tous les points qui définissent le chalut que nous étudions.

3.1.2. Description des fils et des singularités.

Les caractéristiques mécaniques de chacun des fils sont rassemblées dans un tableau "fichier fil". Ce fichier décrit également les singularités introduites aux différents noeuds telles que: flotteur, lest, panneau divergent...

Pour chaque noeud on indique la longueur, le diamètre, la masse linéique des deux fils qui en sont issus ainsi que la singularité introduite en ce noeud si elle existe.

Les longueurs et diamètres sont indiqués en millimètre. la masse linéique est introduite sous sa forme usuelle en technologie des pêches, c'est-à-dire en mètre par kilogramme (il s'agit en fait de l'inverse d'une masse linéique).

Les singularités sont décrites par les trois composantes, exprimées en newton, de l'effort qu'elles introduisent.

I	L(I)	L(-I)	D(I)	D(-I)	M(I)	M(-I)	Sx(I)	Sy(I)	Sz(I)
22	83.5	0.	0.3	0.	20000.	0.	0.	0.	0.
23	0.	83.5	0.	0.3	0.	20000.	0.	0.	0.
24	83.5	0.	0.3	0.	20000.	0.	0.	0.	0.
25	0.	83.5	0.	0.3	0.	20000.	0.	0.	0.
26	83.5	83.5	0.3	0.3	20000.	20000.	0.	0.	0.
27	83.5	83.5	0.3	0.3	20000.	20000.	0.	0.	0.
28	83.5	83.5	0.3	0.3	20000.	20000.	0.	0.	0.
29	83.5	83.5	0.3	0.3	20000.	20000.	0.	0.	0.
30	83.5	0.	0.3	0.	20000.	0.	0.	0.	0.
31	0.	83.5	0.	0.3	0.	20000.	0.	0.	0.

tableau 2 : extrait d'un fichier fil

3.1.3. Description de la forme initiale.

Pour démarer notre processus itératif nous devons donner une forme initiale au chalut. Les coordonnées de chacun des noeuds sont rassemblées dans un tableau "fichier ini":

I	X(I)	Y(I)	Z(I)
38	0.	0.	417.5
39	0.	0.	417.5
40	0.	0.	501.
41	0.	0.	501.
42	0.	0.	501.
43	0.	0.	501.
44	0.	0.	501.
45	0.	0.	584.5
46	0.	0.	584.5
47	0.	0.	584.5

tableau 3 : extrait d'un fichier ini

Cette forme initiale doit être compatible avec les différentes liaisons mécaniques qui existent dans le chalut. Pour l'obtenir, on considère que le chalut et son gréement sont tendus par une force très importante appliquée à l'arrière du chalut. Leur forme est alors une droite horizontale sur laquelle tous les fils du gréement et des côtés de mailles viennent s'appliquer. En fait, il est nécessaire d'allonger artificiellement certains fils qui retrouveront progressivement leur longueur réelle au cours des premières itérations.

Nous avons essayé de déterminer d'autres méthodes d'initialisation, par exemple placer tous les noeuds sur un cône. Nous avons constaté que cela ne réduisait pas de manière significative le nombre d'itérations nécessaires pour obtenir la forme d'équilibre. De plus, il semble très difficile de mettre au point une méthode générale capable de placer automatiquement tous les noeuds d'un filet quelconque sur une surface prédéterminée (même si celle-ci n'est que purement géométrique et sans aucun sens mécanique).

La méthode du "fil tendu" constitue donc une procédure d'initialisation relativement simple, et qui s'est toujours révélée efficace. Le chalut s'ouvre de lui-même sous l'action des efforts dus aux flotteurs, aux lests et aux singularités du gréement.

3.2. Les efforts

Nous avons vu que les efforts appliqués au chalut, donc à chaque fil du chalut sont de trois natures:

- efforts hydrodynamiques
- efforts de pesanteur
- efforts dûs aux singularités

Il nous faut maintenant expliciter la forme analytique de leurs composantes dans le repère absolu.

3.2.1. Efforts hydrodynamiques

3.2.1.1. hypothèses de travail

Nous avons justifié que nous pouvions utiliser les hypothèses de "Landweber modifiées Richtmeyer" en considérant chaque élément de fil comme un cylindre circulaire rigide.

Le repère absolu pour l'étude est défini ainsi :

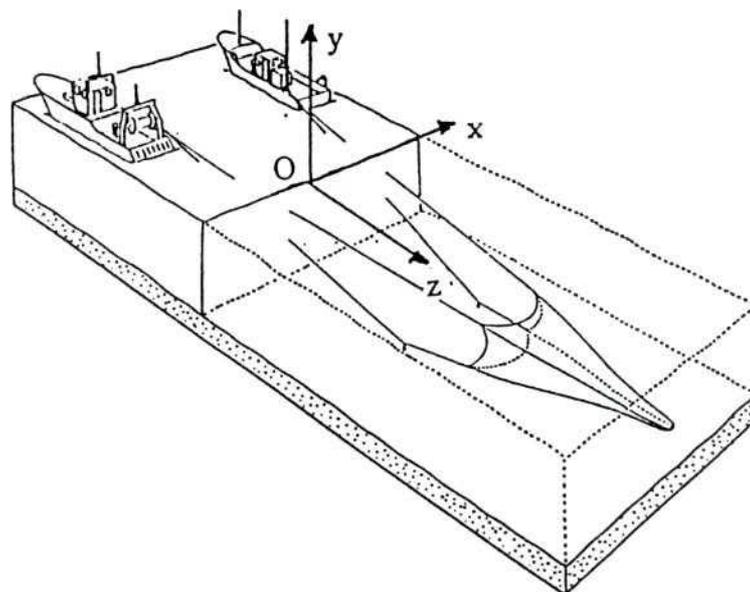


figure 40 : repère absolu

Le repère absolu est orthonormé, l'axe Oz est parallèle à la vitesse du courant, Ox est horizontal et Oy vertical.

3.2.12. repère lié au fil

On associe à chaque côté de maille IJ un repère lié qui se déduit du repère absolu par une translation et deux rotations définies par les angles d'Euler.

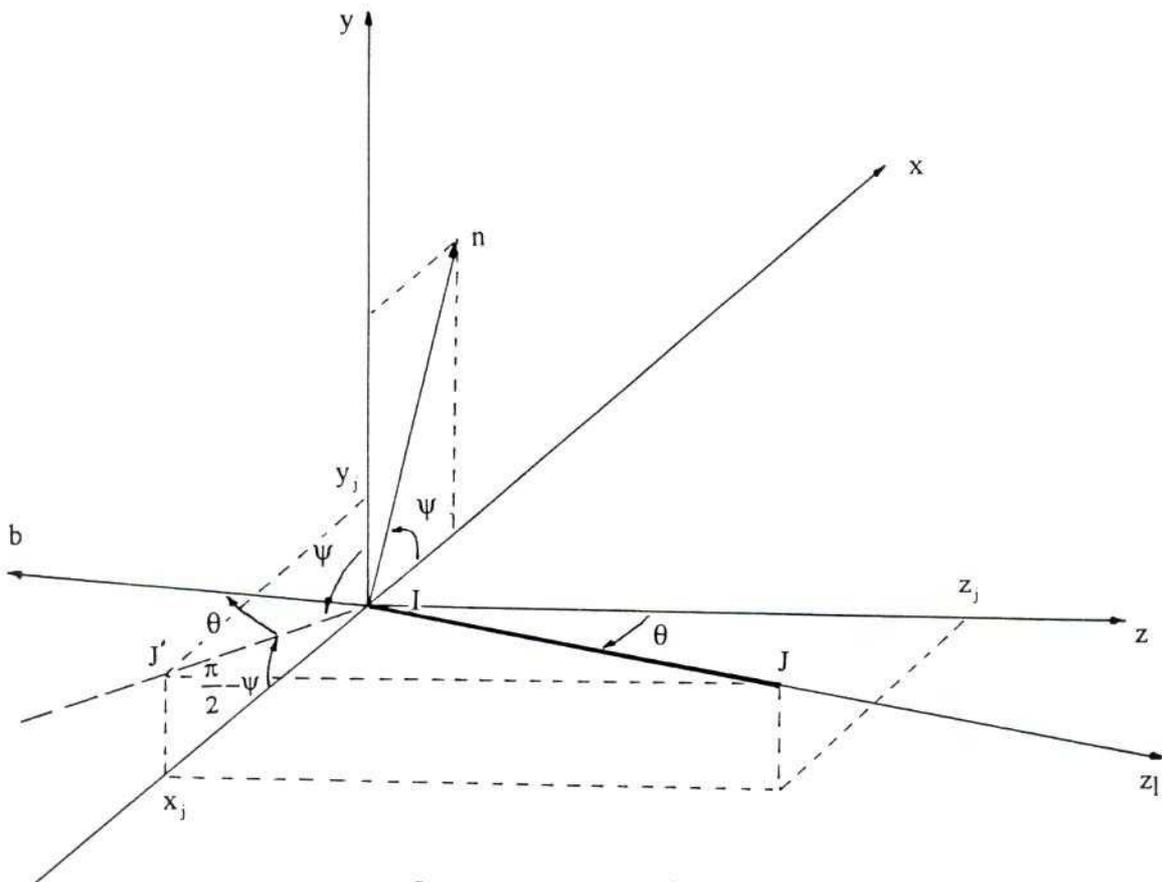


figure 41 : système d'axes.

On passe du repère absolu Oxyz au repère lié Inbz₁ en effectuant d'abord une translation puis une rotation d'angle ψ autour de Iz, puis une rotation d'angle θ autour de In

On peut alors écrire la matrice de changement de repère :

$$M = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Cette matrice étant orthogonale, son inverse est égale à sa transposée. Les composantes de IJ exprimées dans les repères absolu et lié vérifient la relation :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix}_l = M^{-1} \begin{bmatrix} x_j - x_i \\ y_j - y_i \\ z_j - z_i \end{bmatrix}_a$$

où l est la longueur de l'élément IJ .

soit:

$$\begin{aligned} (x_j - x_i) \cos \psi + (y_j - y_i) \sin \psi &= 0 \\ -(x_j - x_i) \sin \psi \cos \theta + (y_j - y_i) \cos \psi \cos \theta + (z_j - z_i) \sin \theta &= 0 \\ (x_j - x_i) \sin \psi \sin \theta - (y_j - y_i) \cos \psi \sin \theta + (z_j - z_i) \cos \theta &= l \end{aligned}$$

De la première équation on déduit

$$(1) \quad \operatorname{tg} \psi = -\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}$$

En éliminant $(z_j - z_i)$ dans les deux dernières équations on obtient

$$(2) \quad \sin \theta = \frac{(x_j - x_i) \sin \psi - (y_j - y_i) \cos \psi}{l}$$

puis

$$(3) \quad \cos \theta = \frac{z_j - z_i}{l}$$

L'angle ψ est déterminé par la relation (1) qui conduit à une détermination à π près, sa valeur étant toujours comprise dans l'intervalle $\left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$. Cette indétermination n'introduit pas de difficulté supplémentaire. En effet, θ est déterminé après ψ par la relation (2) et l'angle θ change de signe si l'on change de détermination de ψ . De plus, on constate que le segment IJ est parfaitement déterminé par le couple (ψ, θ) ou par le couple $(\psi + \pi, -\theta)$.

Les composantes de la vitesse de l'écoulement \vec{V} , exprimées dans le repère lié (n, b, z_1) , sont obtenues à partir de ses composantes absolues par la relation:

$$[V]_l = M^{-1}[V]_a$$

on obtient

$$\begin{aligned} V_n &= 0 \\ V_b &= V_0 \sin\theta \\ V_{z_1} &= V_0 \cos\theta \end{aligned}$$

3.2.13. forces de traînée de pression

Landweber admet que chaque fil est soumis à une force de traînée de pression T_n qui lui est normale. Ses composantes s'écrivent dans le repère lié de la manière suivante:

$$(4) \quad T_n = \frac{1}{2} \rho d l C_d V_n |V_N| = 0$$

$$(5) \quad T_b = \frac{1}{2} \rho d l C_d V_b |V_N|$$

$$(6) \quad T_{z_1} = 0$$

avec

$$(7) \quad |V_N| = \sqrt{V_n^2 + V_b^2}$$

soit $|V_N| = V_0 |\sin\theta|$ puisque $V_n = 0$

Rappelons que nous avons justifié l'usage d'un coefficient de traînée constant dont la valeur est différente suivant que l'on considère un fil de côté de maille ($C_d = 1,2$) ou un élément du gréement ($C_d = 1,8$).

En posant $R_u = \frac{1}{2} \rho d l C_d V_0^2$ et en revenant dans le repère absolu on obtient :

$$(8) \quad T_x = -R_u \sin\theta |\sin\theta| \sin\psi \cos\theta$$

$$(9) \quad T_y = R_u \sin\theta |\sin\theta| \cos\psi \cos\theta$$

$$(10) \quad T_z = R_u \sin^2 \theta |\sin \theta|$$

3.2.14. forces de frottement

Nous reprenons l'hypothèse de Richtmeyer :

$$(11) \quad F_n = 0$$

$$(12) \quad F_b = 0$$

$$(13) \quad F_{z_i} = f R_u \cos^2 \theta \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|}$$

Nous avons déterminé pour les alèzes qui constituent nos maquettes $f = 0,08$.

Le terme $\frac{\cos \theta}{|\cos \theta|}$ assure qu'il s'agit d'une force de résistance quelle que soit l'orientation du fil par rapport au courant.

On obtient alors dans le repère absolu :

$$(14) \quad F_x = f R_u \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} \sin \psi \sin \theta \cos^2 \theta$$

$$(15) \quad F_y = -f R_u \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} \cos \psi \sin \theta \cos^2 \theta$$

$$(16) \quad F_z = f R_u \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} \cos^3 \theta$$

Ces efforts hydrodynamiques dépendent de l'orientation du fil. Pour limiter le temps de calcul et des oscillations possibles, ils ne seront recalculés que "de temps en temps" (toutes les n itérations).

Ils sont répartis aux deux extrémités de chaque fil et additionnés aux efforts dus aux singularités agissant sur ces noeuds.

Les alèzes étudiées, pour l'instant, sont de type "sans noeuds", dans ce cas les liaisons des fils se font sans surépaisseur. Les expériences en bassin qui ont permis de déterminer le coefficient de traînée C_d ont été réalisées sur ce type d'alèze. Mais, en réalité, il existe bien des noeuds au sens mécanique du terme. Nous considérons donc qu'il n'y a pas d'efforts hydrodynamiques particuliers aux liaisons des côtés de mailles. En contrepartie nous ne corrigeons pas la longueur des côtés de mailles des chevauchements qui se produisent aux liaisons.

Des expérimentations complémentaires seront là encore nécessaires.

3.2.2. Efforts de pesanteur.

Dans le repère absolu, les efforts de pesanteur sont portés par l'axe Oy . Si le fil est plus lourd que l'eau, la composante du poids apparent est négative selon Oy et s'écrit :

$$(17) \quad P_i = - \left(m_i - \rho \pi \frac{d_i^2}{4} l_i \right) g$$

3.2.3. Efforts dus aux singularités.

Une singularité peut être placée en tout noeud I . Elle introduit à ce point des efforts dont les composantes seront notées : Sx_i , Sy_i et Sz_i .

Une singularité pourra être par exemple un flotteur, un lest ou une surface portante.

Nous devons les décrire en introduisant :

- des efforts constants : poids,...
- des efforts liés à la vitesse de remorquage : traînée, portance ...

Ces efforts sont calculés lors de l'initialisation.

S'ils dépendent de la forme prise par l'ensemble, ils sont recalculés périodiquement. Il en est ainsi, pour un chalut de fond, de l'action du sol que nous considérerons comme des singularités réparties sur le bourrelet et dépendant de la forme et de la position du chalut.

3.3. Equilibre des noeuds

Suivant le nombre de fils reliés aux noeuds (2,3 ou 4) les équations sont différentes. Nous allons présenter ici les cas que nous avons programmés et qui correspondent aux types de noeuds que nous avons rencontrés.

3.3.1. Noeuds à deux fils supérieurs.

Les noeuds à deux fils supérieurs sont les noeuds de type 4, 5, 6, 9 et 18.

3.3.11. équations d'équilibre d'un noeud à quatre fils (type 4).

En chaque noeud on définit un repère ntz lié à ce noeud. L'axe n est la projection sur xOy de la direction qui joint le noeud 1 au noeud 4, t lui est orthogonal et appartient au plan xOy .

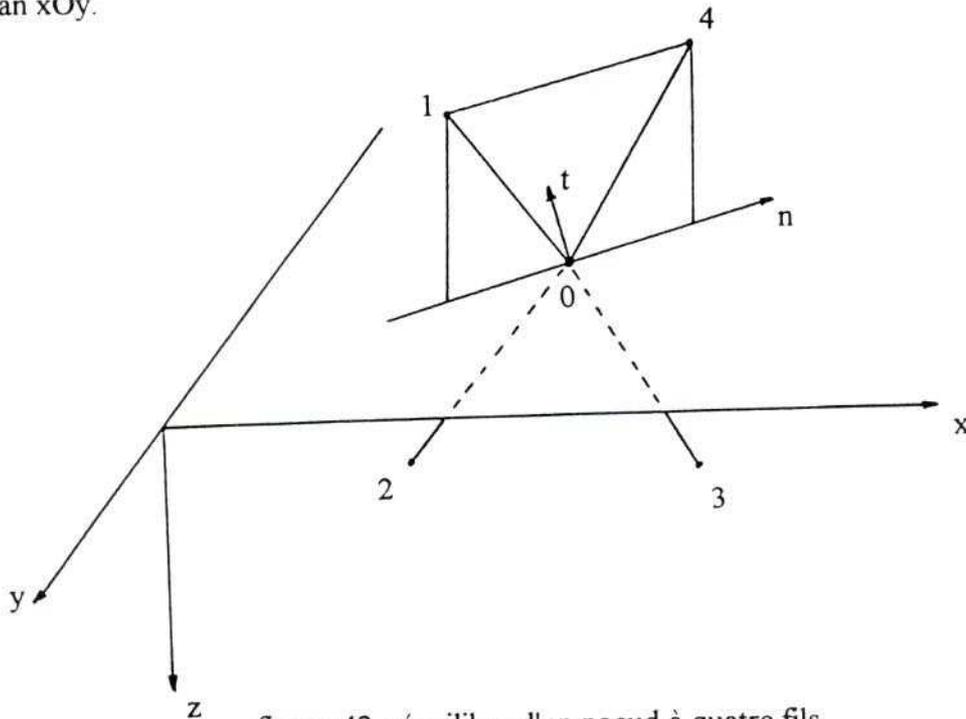


figure 42 : équilibre d'un noeud à quatre fils

Les forces extérieures agissant sur chaque demi-élément de maille sont également réparties à ses deux extrémités. Ainsi, chaque noeud est en équilibre sous l'action des quatre demi-résultantes des forces hydrodynamiques et de pesanteur agissant sur les fils qui s'y rejoignent, des tensions de ces fils et des efforts dus aux singularités.

Les équations d'équilibre peuvent s'écrire en les projetant respectivement sur les axes Ox, Oy et Oz :

$$(18) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{x_i - x_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \frac{Hx_i}{2} + Sx_0 = 0$$

$$(19) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{y_i - y_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hy_i + P_i}{2} \right) + Sy_0 = 0$$

$$(20) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{z_i - z_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \frac{Hz_i}{2} + Sz_0 = 0$$

Nous avons préféré écrire ces équations dans le repère Ontz. Cette projection un peu plus compliquée permet de s'affranchir des difficultés qui pourraient survenir pour certaines orientations particulières du plan des mailles par rapport au plan Oxyz.

$$(21) \quad \text{Si} \quad d = \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}$$

les cosinus directeurs sont :

$$(22) \quad \bar{n} \begin{vmatrix} \frac{x_4 - x_1}{d} \\ \frac{y_4 - y_1}{d} \end{vmatrix} \quad \bar{t} \begin{vmatrix} -\frac{y_4 - y_1}{d} \\ \frac{x_4 - x_1}{d} \end{vmatrix}$$

On obtient alors en projetant respectivement sur les axes On, Ot et Oz :

$$(23) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \left[\frac{x_i - x_0}{l_i} (x_4 - x_1) + \frac{y_i - y_0}{l_i} (y_4 - y_1) \right] + (x_4 - x_1) \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hx_i}{2} \right) + Sx_0 \right] \\ + (y_4 - y_1) \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hy_i + P_i}{2} \right) + Sy_0 \right] = 0$$

$$(24) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \left[\frac{x_i - x_0}{l_i} (-y_4 + y_1) + \frac{y_i - y_0}{l_i} (x_4 - x_1) \right] + (-y_4 + y_1) \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hx_i}{2} \right) + Sx_0 \right] \\ + (x_4 - x_1) \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hy_i + P_i}{2} \right) + Sy_0 \right] = 0$$

$$(25) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{z_i - z_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hz_i}{2} \right) + Sz_0 = 0$$

On complète ce système de trois équations par les deux relations exprimant la longueur des deux côtés :

$$(26) \quad (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = l_1^2$$

$$(27) \quad (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = l_4^2$$

3.3.12. remarque sur la méthode de résolution

Afin de permettre au lecteur de suivre la fin de la démarche de mise en équations, il est nécessaire de présenter rapidement la méthode de résolution que nous allons employer. Pour plus de détails on se reportera au paragraphe 3.5.

Pour résoudre ce système d'équations nous allons utiliser une méthode itérative qui sera la même quelque soit le type de noeud rencontré.

A partir d'une forme fixée arbitrairement (disponible dans le fichier ini), ou de la forme calculée à l'itération précédente, on détermine la valeur des efforts hydrodynamiques agissant sur chaque côté de maille.

Ensuite considérant exactes les coordonnées des noeuds, on détermine les tensions T_i de chaque fil à partir des équations (23) et (25).

Puis on détermine les nouvelles coordonnées x_i, y_i, z_i du noeud i en utilisant les équations (24), (26) et (27) et la valeur de T_i calculée précédemment.

Les derniers noeuds du chalut ne comportant pas de "fils inférieurs" les tensions sont calculées en parcourant le chalut d'arrière en avant, les nouvelles coordonnées sont ensuite déterminées en sens inverse, à partir d'un point connu (le chalutier) et en incluant tout le gréement.

3.3.121. calcul des tensions.

Nous appellerons T_1, T_2, T_3, T_4 les tensions des fils issus des points 1, 2, 3, 4 qui se rejoignent au point 0.

Puisque le calcul des tensions se fait de l'arrière du chalut vers l'avant, lorsque l'on arrive au point 0, les tensions T_2 et T_3 sont connues. Les coordonnées des noeuds, les efforts hydrodynamiques et de pesanteur étant connus, ainsi que les efforts dus aux singularités, les équations (23) et (25) constituent un système de deux équations à deux inconnues T_1 et T_4 .

Cette méthode permet de connaître la valeur, à l'itération en cours, des tensions de tous les fils constituant le chalut.

3.3.122. Calcul des coordonnées des noeuds.

Les T_i étant déterminés l'équation (24) peut s'écrire :

$$Ax_0 + By_0 = C$$

avec

$$(28) \quad \begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{l_i} (-y_4 + y_1) \\ B &= \sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{l_i} (x_4 - x_1) \\ C &= -(y_4 - y_1) \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hx_i}{2} \right) + Sx_0 \right] + (x_4 - x_1) \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hy_i + P_i}{2} \right) + Sy_0 \right] \\ &\quad + \sum_{i=1}^4 \left[T_i \frac{x_i}{l_i} (-y_4 + y_1) + T_i \frac{y_i}{l_i} (x_4 - x_1) \right] \end{aligned}$$

3.3.2. Noeuds à un fil supérieur.

Les noeuds concernés sont ceux de type 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 et 17.

3.3.21. cas d'un noeud à quatre fils.

Le noeud n'ayant plus qu'un fil supérieur il est impossible de définir un repère lié Ontz. La méthode de résolution doit donc être différente. Il est nécessaire d'utiliser les équations d'équilibre (18), (19) et (20) écrites dans le repère absolu.

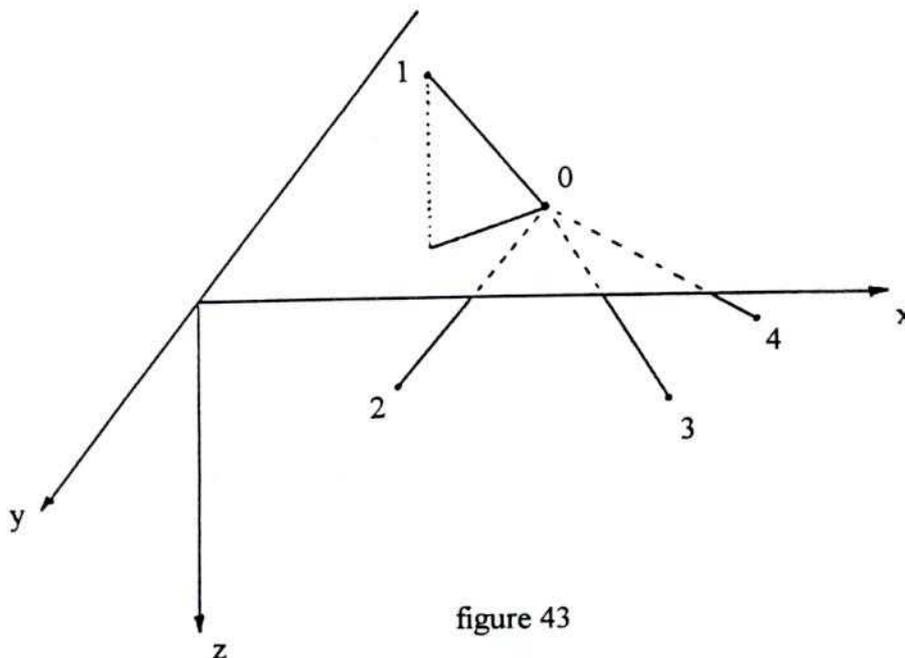


figure 43

3.3.211. calcul des tensions.

Les équations (18), (19) et (20) peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$(42) \quad T_1 \frac{x_1 - x_0}{l_1} = - \left[\sum_{i=2}^4 T_i \frac{x_i - x_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hx_i}{2} \right) + Sx_0 \right]$$

$$(43) \quad T_1 \frac{y_1 - y_0}{l_1} = - \left[\sum_{i=2}^4 T_i \frac{y_i - y_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hy_i + P_i}{2} \right) + Sy_0 \right]$$

$$(44) \quad T_1 \frac{z_1 - z_0}{l_1} = - \left[\sum_{i=2}^4 T_i \frac{z_i - z_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hz_i}{2} \right) + Sz_0 \right]$$

Les premiers membres de ces équations sont les trois composantes T_{x_1} , T_{y_1} , et T_{z_1} de la tension T_1 suivant les axes Ox , Oy et Oz . On peut donc exprimer le module de cette tension par la relation :

$$(45) \quad T_1 = \sqrt{T_{x_1}^2 + T_{y_1}^2 + T_{z_1}^2}$$

Les tensions étant calculées en partant de l'arrière du chalut, les tensions T_2 , T_3 et T_4 sont calculées avant T_1 . La valeur de T_1 est par conséquent toujours déterminée.

3.3.212. calcul des coordonnées

On utilise les équations (18) et (19) pour calculer les nouvelles coordonnées x_0 et y_0 du noeud étudié.

$$(46) \quad x_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 T_i \frac{x_i}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \frac{Hx_i}{2} + Sx_0}{\sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{l_i}}$$

$$(47) \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 T_i \frac{y_i}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{Hy_i + P_i}{2} \right) + Sy_0}{\sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{l_i}}$$

Nous ne pouvons plus utiliser la relation (20) pour déterminer z_0 car les trois relations (18), (19), et (20) ont déjà été utilisées pour déterminer trois inconnues T_1 , x_0 et y_0 .

Nous calculons z_0 à l'aide d'une quatrième relation : la longueur du fil 1.

$$(48) \quad z_0 = z_1 \pm \sqrt{l_1^2 - (x_1 - x_0)^2 - (y_1 - y_0)^2}$$

Nous rencontrons alors le même problème de détermination de signe que dans le cas du noeud à deux fils supérieurs. Il est résolu de la même manière.

3.3.22. autres noeuds à un fil supérieur.

L'écriture des équations se rapportant à ces noeuds (type 7, 8, 10, 11, 12, 13, 16 et 17) ne pose pas non plus de problème particulier. On les traite comme des noeuds à quatre fils en annulant les valeurs relatives aux liaisons manquantes.

REMARQUE IMPORTANTE

Toute cette mise en équations suppose que tous les fils sont assimilés à des barres cylindriques circulaires inextensibles et surtout incompressibles. Or, dans certains cas, particulièrement pour un chalut mal conçu ou mal réglé, ou même au cours des itérations (puisque l'équilibre n'est pas atteint) certains côtés de mailles pourraient apparaître en compression. Les fils correspondants se plient donc.

Afin de permettre cette souplesse et de rendre compte de ce comportement non linéaire des côtés de mailles nous les avons tous "coupés en deux" en introduisant un noeud de calcul au milieu de chacun d'entre-eux.

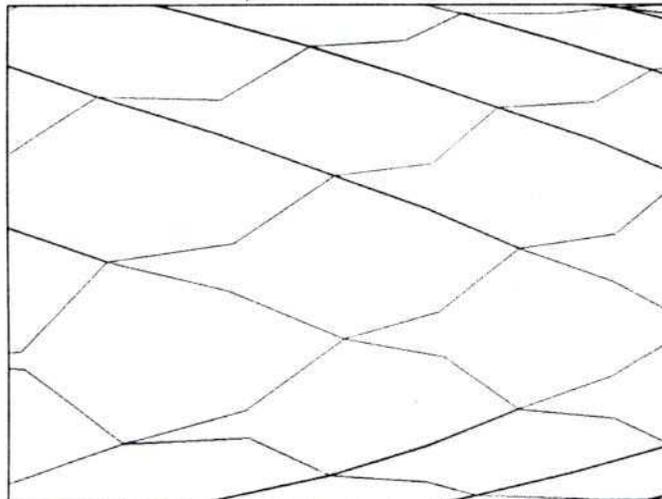


figure 44

Un côté détendu peut ainsi se plier et se mettre dans le lit du courant (figure 44). On peut ainsi mettre en évidence les zones de "mou". Pour obtenir plus de renseignements sur la forme des fils détendus (mais est-ce utile?) il faudrait introduire plus de noeuds intermédiaires. Mais l'introduction d'un noeud au milieu des fils multiplie déjà à peu près par 3 le nombre de noeuds à prendre en considération dans notre calcul.

3.4. Méthode de résolution

3.4.1. La méthode itérative

Notre méthode de résolution consiste donc à écrire les équations d'équilibre de chacun des noeuds du chalut, chaque noeud étant assimilé à un point matériel, puis à résoudre ce système par une méthode itérative.

Nous avons décrit le train de pêche par un ensemble de noeuds et de fils que nous avons positionnés dans l'espace (forme initiale) et nous venons d'établir les équations d'équilibre des noeuds. Il s'agit maintenant d'obtenir la forme d'équilibre et les tensions du chalut et de son gréement.

En écrivant les équations d'équilibre on obtient pour chaque noeud, soit un système de 5 équations à 5 inconnues, soit un système de 4 équations à 4 inconnues. En effet, dans tous les cas il y a trois coordonnées par noeud à déterminer ainsi que une ou deux tensions de fils qui correspondent aux noeuds à un ou deux fils "supérieurs".

Les équations d'équilibre sont non linéaires pour plusieurs raisons:

- les projections des efforts font intervenir des produits des inconnues de position et de tension.

- les conditions de longueur font intervenir le carré des coordonnées.

- les efforts hydrodynamiques agissant sur les fils dépendent de la solution (couplage fluide-structure).

Pour résoudre ce système d'équations nous proposons une méthode de résolution par itérations successives.

Dans un premier temps on calcule les efforts de pesanteur ainsi que les efforts dus aux singularités qui seront constants au cours du calcul puisque nous étudions un problème statique.

Ensuite, à partir de la forme initiale ou de la forme calculée à l'itération précédente, on détermine les efforts hydrodynamiques agissant en chaque fil, dans cette configuration.

Puis, on calcule les premières ou nouvelles valeurs des tensions en "remontant" d'arrière en avant le chalut et son gréement jusqu'au navire.

Enfin, on détermine les coordonnées x_i et y_i de chacun des noeuds en partant des points "fixes" du problème qui sont, soit les points d'attaches du modèle en bassin, soit la position du ou des navires dans le cas d'un chalutage réel. On calcule donc ces coordonnées en "descendant" le train de pêche du chalutier au chalut (connaissant les x_i et y_i on en déduit, à l'aide des conditions de longueur des fils, les z_i).

La nouvelle forme calculée remplace la forme initiale pour l'itération suivante. Pour limiter le temps de calcul et des oscillations possibles, les efforts hydrodynamiques ne sont recalculés que toutes les n itérations. Le calcul se termine lorsque les variations de forme d'une itération à l'autre sont inférieures à un critère de convergence que nous fixons arbitrairement. Nous pouvons déjà remarquer qu'une très faible variation des coordonnées d'une itération à l'autre n'est pas un critère absolu de convergence.

Pour ne pas provoquer de modification brutale de la forme du chalut qui entraîne des non respects des conditions de longueur, les nouvelles coordonnées ne sont pas utilisées directement pour déterminer la forme initiale de l'itération suivante. On utilise une méthode de relaxation: on définit en fait la nouvelle forme en faisant une moyenne pondérée entre les nouvelles coordonnées et celles calculées à l'itération précédente. Cette procédure permet au calcul d'absorber des variations trop importantes des coordonnées.

Afin d'améliorer la rapidité du calcul, cette procédure de relaxation sera modifiée en cours de calcul. Nous reviendrons sur ce point par la suite (3.7).

3.4.2. Organigramme

L'organigramme suivant résume les opérations successives:

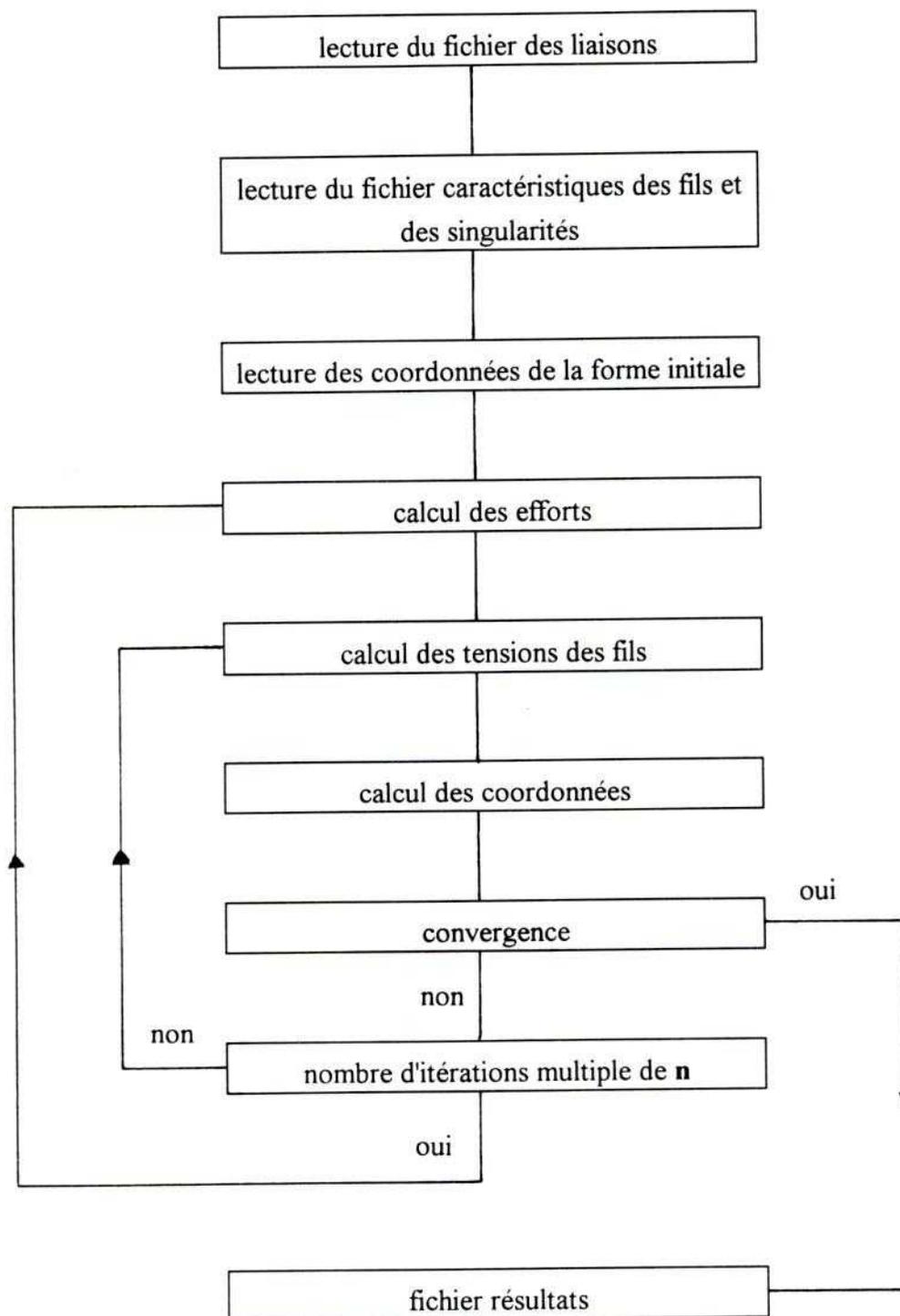


figure 45 : organigramme

3.4.3. Nombre d'inconnues

Pour un filet à mailles losanges, le nombre de côtés de mailles est de l'ordre de deux fois le nombre N de noeuds physiques du chalut; comme nous avons divisé chaque côté de maille en deux segments égaux, pour permettre aux côtés de maille de se déformer, nous avons par-là introduit $2N$ noeuds intermédiaires supplémentaires et doublé le nombre de fils.

L'étude de l'équilibre des formes et des tensions d'un chalut constitué de N noeuds se ramène donc à la détermination de:

-- 3 fois $3N$ coordonnées de noeuds

-- $4N$ tensions de fils

Soit environ **$13N$ inconnues**. Sachant que, pour un chalut réel, ce nombre N varie globalement de 25 000 à 2 000 000 on pourrait arriver à des nombres de l'ordre de 25 millions d'inconnues à traiter à chaque itération. Ce nombre total d'inconnues devient donc rapidement rédhibitoire.

C'est pourquoi nous allons maintenant faire une première remarque permettant de diminuer ce nombre N . Elle consiste à prendre en compte la symétrie du train de pêche par rapport au plan yOz .

3.5. Prise en compte de la symétrie du chalut

Lors du remorquage en ligne droite, un chalut bien réglé, qu'il soit de fond ou pélagique, présente toujours un plan de symétrie qui est le plan vertical (plan yOz de notre étude).

Cette prise en compte de la symétrie permet de n'utiliser pour le calcul qu'approximativement la moitié des noeuds constituant le chalut.

Nous qualifierons de "symétriques" les noeuds qui appartiennent au plan de symétrie. Nous traduisons par cette expression le fait que les tensions des brins 1 et 2 doivent être égales respectivement aux tensions des brins 3 et 4. Ces noeuds ne peuvent être que du type 4, 9 ou 18.

Nous allons étudier le cas d'un noeud de type 4, les noeuds 9 et 18 n'étant que des simplifications de ce cas.

Pour signifier que l'on introduit dans les calculs un noeud appartenant à la partie du filet non calculée, on attribue à ce noeud le numéro du noeud dont il est le symétrique précédé du signe - .

La numérotation des noeuds et des fils entourant ce noeud est la suivante :

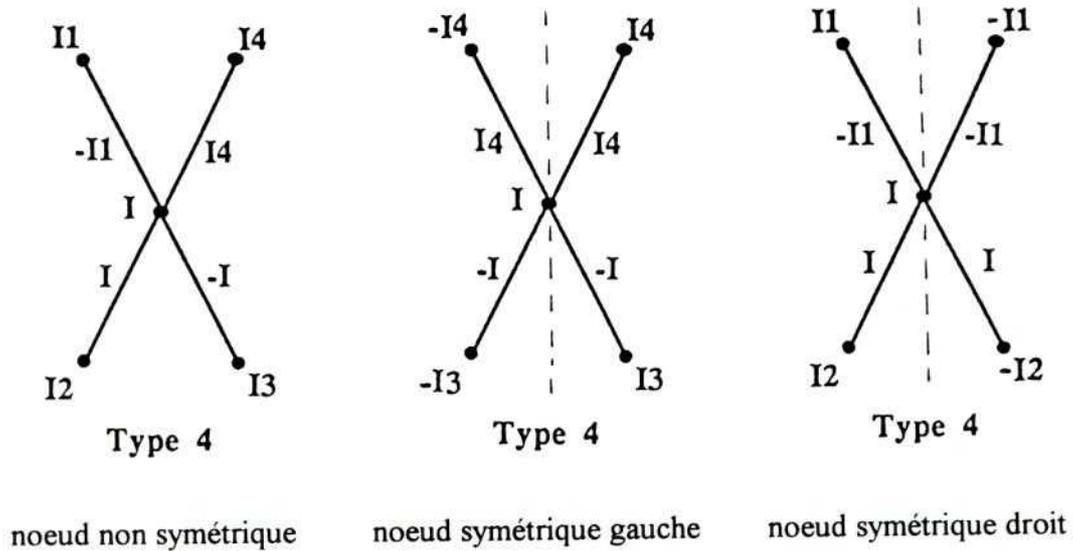


figure 46

Les données, dans le tableau de liaison, concernant les points I_1 et I_2 sont celles des point I_4 et I_3 précédées du signe - (ou réciproquement).

Ceci signifie par exemple :

$$x(-I_3) = -x(I_3)$$

$$y(-I_3) = y(I_3)$$

$$z(-I_3) = z(I_3)$$

Aucune modification des équations d'équilibre n'est alors nécessaire, les noeuds "symétriques" pouvant ainsi être considérés dans le calcul comme des noeuds généraux.

3.6 Premiers résultats

Dans cette partie, nous allons appliquer notre méthode à un modèle simple de chalutage: le chalutage pélagique en boeuf où le chalut pélagique est remorqué par deux navires.

Après avoir traité ce cas simple, nous compliquerons le problème en fixant des ralingues sur le chalut. Nous aurons ainsi résolu, sur un cas simple, les divers problèmes que l'on peut rencontrer lors des opérations de pêche en chalutage pélagique

Ensuite, nous testerons un chalut sur le fond, muni d'un gréement à deux entremises et à panneaux divergents, afin de résoudre ce cas particulier.

Les figures de cette partie 3.6 qui présentent les gréements et les plans des chaluts (de fond et pélagique) sont extraites de rapports du DIFTA (L.Knudsen ; [6] et [7]).

3.6.1. Application au cas du chalut pélagique

3.6.1.1. le chalut étudié

Le modèle étudié est un chalut constitué de 4 faces identiques décrites sur la figure 48.

Ce chalut est raccordé aux points fixes par l'intermédiaire du gréement suivant:

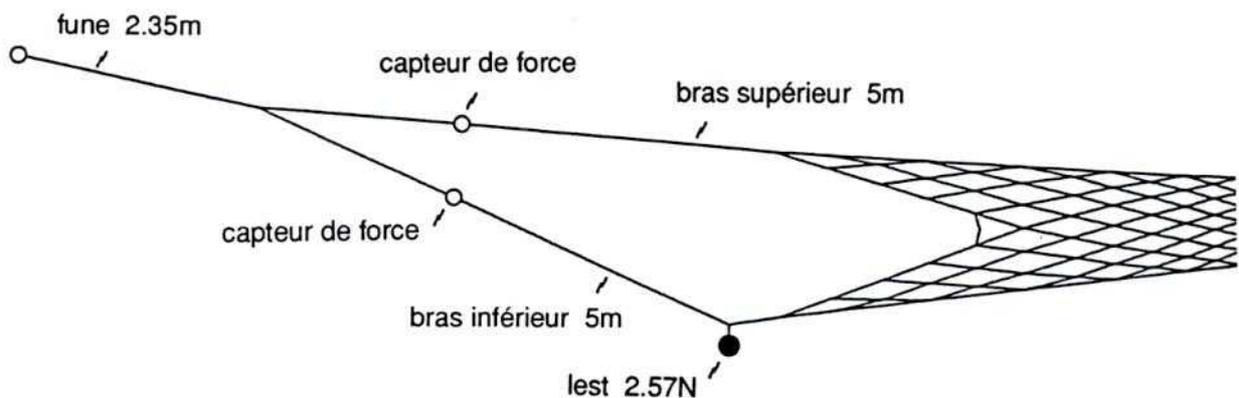


figure 47 : gréement du chalut étudié

Les dimensions portées sur la gauche du plan (figure 48) décrivent pièce par pièce la longueur du côté de maille et le diamètre du fil utilisé. Les longueurs sont exprimées en millimètre.

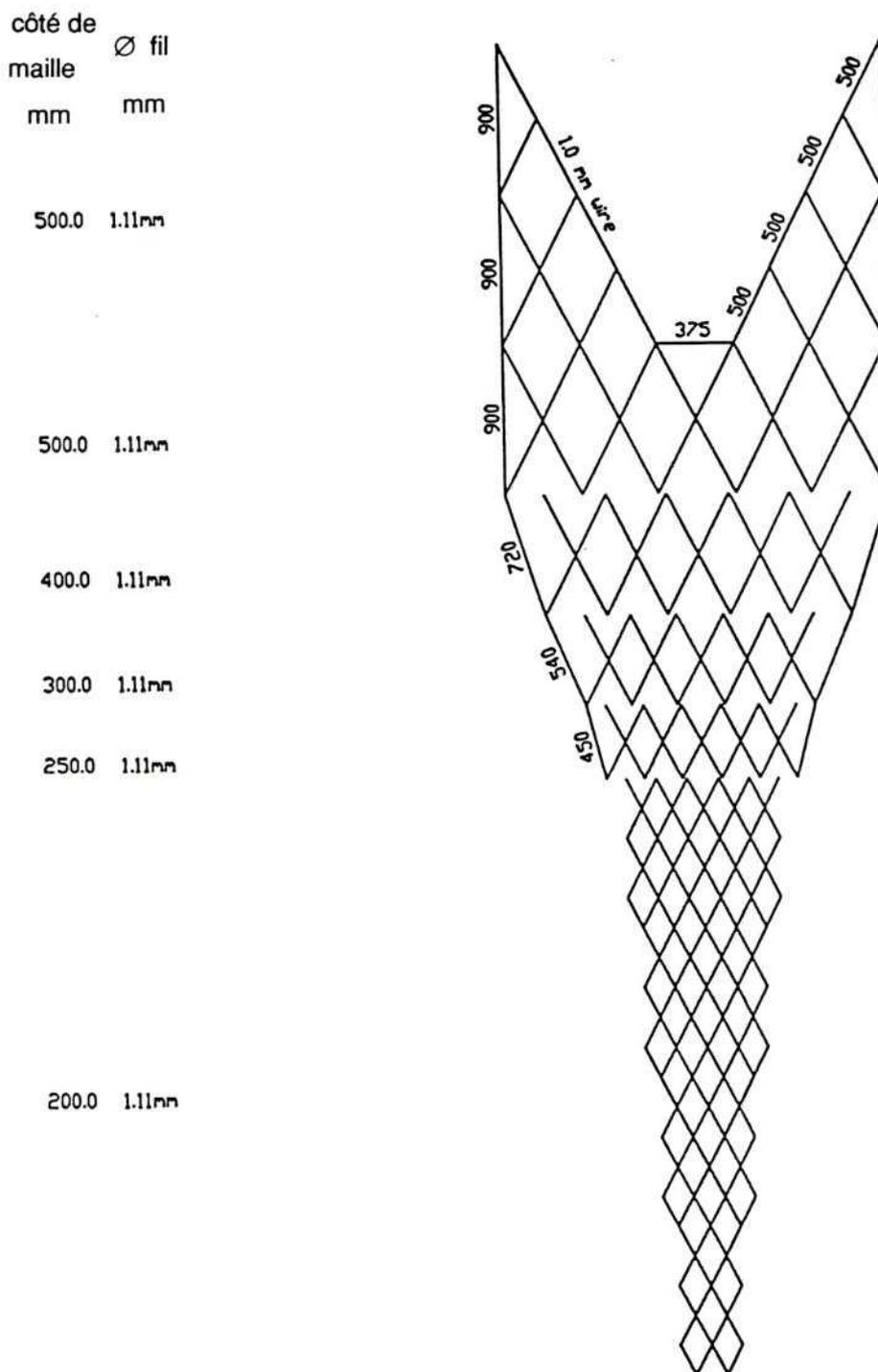


figure 48 : plan d'une des quatre faces du chalut

Pour réaliser le chalut les quatre faces sont cousues bord à bord constituant ainsi un modèle qui se termine par quatre pointes qui sont les extrémités antérieures des "ailes" du chalut.

Ce modèle, dont on peut remarquer les dimensions (8 mètres de long), a été l'objet d'essais réalisés par le DIFTA à Hirtshals (DK) dans une veine à circulation d'eau. Les résultats obtenus par le calcul seront donc comparés à ceux de ces essais. Le modèle constituant notre réel, il n'intervient aucun effet d'échelle.

Ces essais qui correspondent au cas du chalutage à deux navires n'ont donc pas été réalisés en remorquant le filet dans une eau calme, mais en fixant le train de pêche dans un courant d'eau. Les caractéristiques du canal du DIFTA figurent en annexe.

Pour chaque configuration testée, les grandeurs mesurées sont la vitesse, les tensions (des funes et des bras) et la géométrie du chalut.

La géométrie du chalut est mesurée en différentes sections (figure 49), à l'aide de lunettes de visée latérale et verticale.

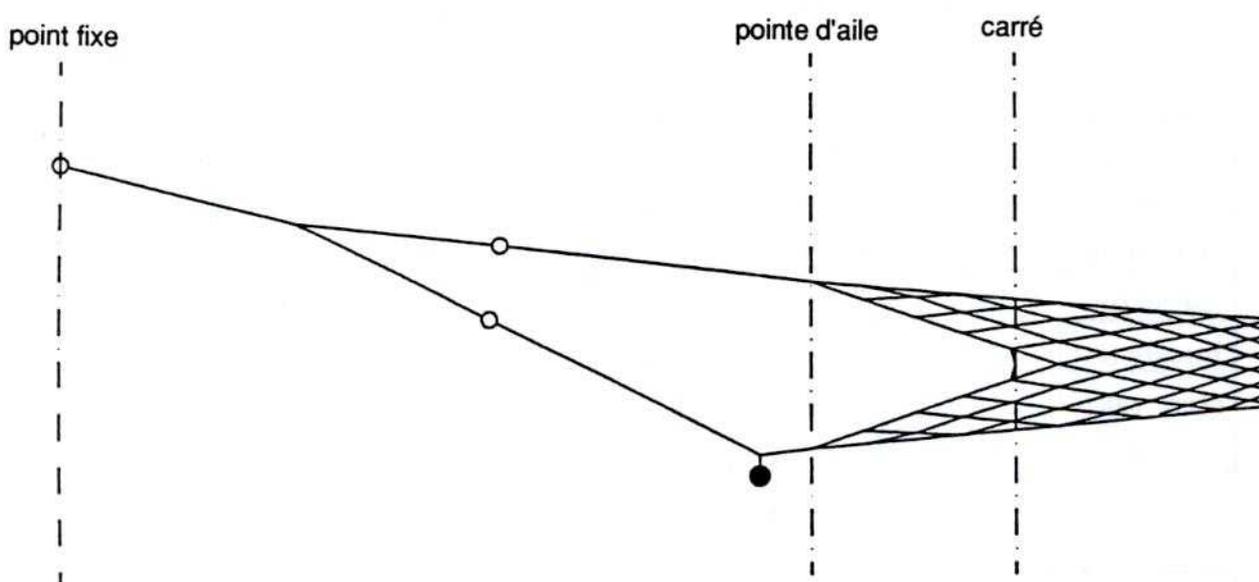


figure 49 : sections choisies pour les mesures de la géométrie du système

note :

Ces mesures ont été faites point par point et manuellement. Ce travail fastidieux nous a incité à développer, au bassin de Lorient, une méthode automatique par analyse numérique d'images vidéo (travail réalisé par Marc Meillat avec notre collaboration).

3.6.12. résultats

D'une manière générale, les résultats géométriques sont présentés par trois figures. Celle du haut est la projection des coordonnées des mailles dans le plan horizontal, elle correspond à une vue du dessus du chalut. Le tracé du milieu décrit la vue latérale, la vue inférieure étant la vue de face du train de pêche.

Dans ces trois figures, il n'est pas tenu compte des effets de perspective. Il s'agit de simples projections sur les trois plans principaux.

Si les deux figures du haut sont réalisées à la même échelle, la vue frontale est dilatée d'un facteur égal à deux par rapport aux précédentes pour en améliorer la lisibilité.

Les principaux résultats numériques sont regroupés dans des tableaux donnant en particulier les caractéristiques d'ouverture et de tension.

3.6.121. influence de la vitesse

Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus à une vitesse de 0,75m/s.

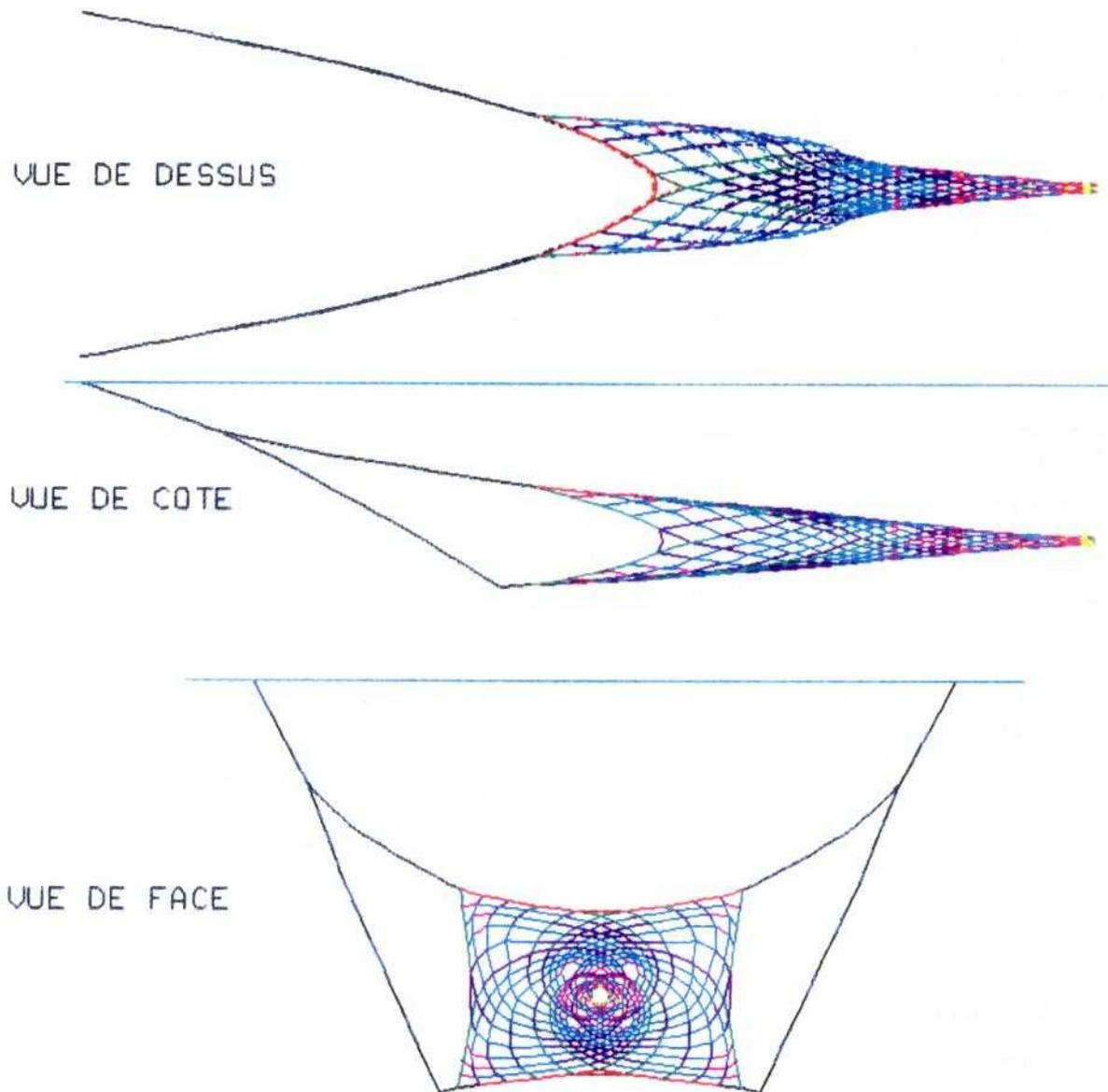
TEST P1 V₀=75cm/s géométrie	immersion	écartement ailes supérieures	écartement ailes inférieures	ouverture verticale ailes	écartement du "carré"	ouverture verticale du "carré"
calcul (m)	1.81	2.13	2.16	1.62	1.97	1.36
mesure (m)	1.92	2.21	2.15	1.52	2.04	1.27
écart calcul -mesure(%)	-5.7	-3.6	+0.5	+6.6	-3.4	+7.1

tableau 4 : géométrie du chalut - comparaison calcul/mesure. Test P1

TEST P1 V₀=75cm/s tensions (N)	funes	bras supérieur	bras inférieur
calcul	9.133	3.826	4.307
mesure	9.692	4.159	4.640
écart calcul/mesure %	-5.8	-8.0	-7.2

tableau 5 : tensions - comparaison calcul/mesure. Test P1

La figure suivante présente les résultats du calcul à 0,75 m/s.



Test No P1 $U_0 = 0.75 \text{ m/s}$

figure 50 : résultat obtenu par calcul à 0.75 m/s

Les différentes couleurs correspondent aux variations de tension dans les fils :

- noir pour les tensions maximum
- jaune pour les tensions les plus faibles

Cette visualisation directe des zones d'efforts sera d'un grand intérêt pour les fabricants de chaluts.

Après cet essai nous avons, sans aucune modification des caractéristiques du train de pêche, augmenté la vitesse jusqu'à 0.90 m/s .

On peut observer (figure 51) une remontée du chalut et une diminution de son ouverture verticale.

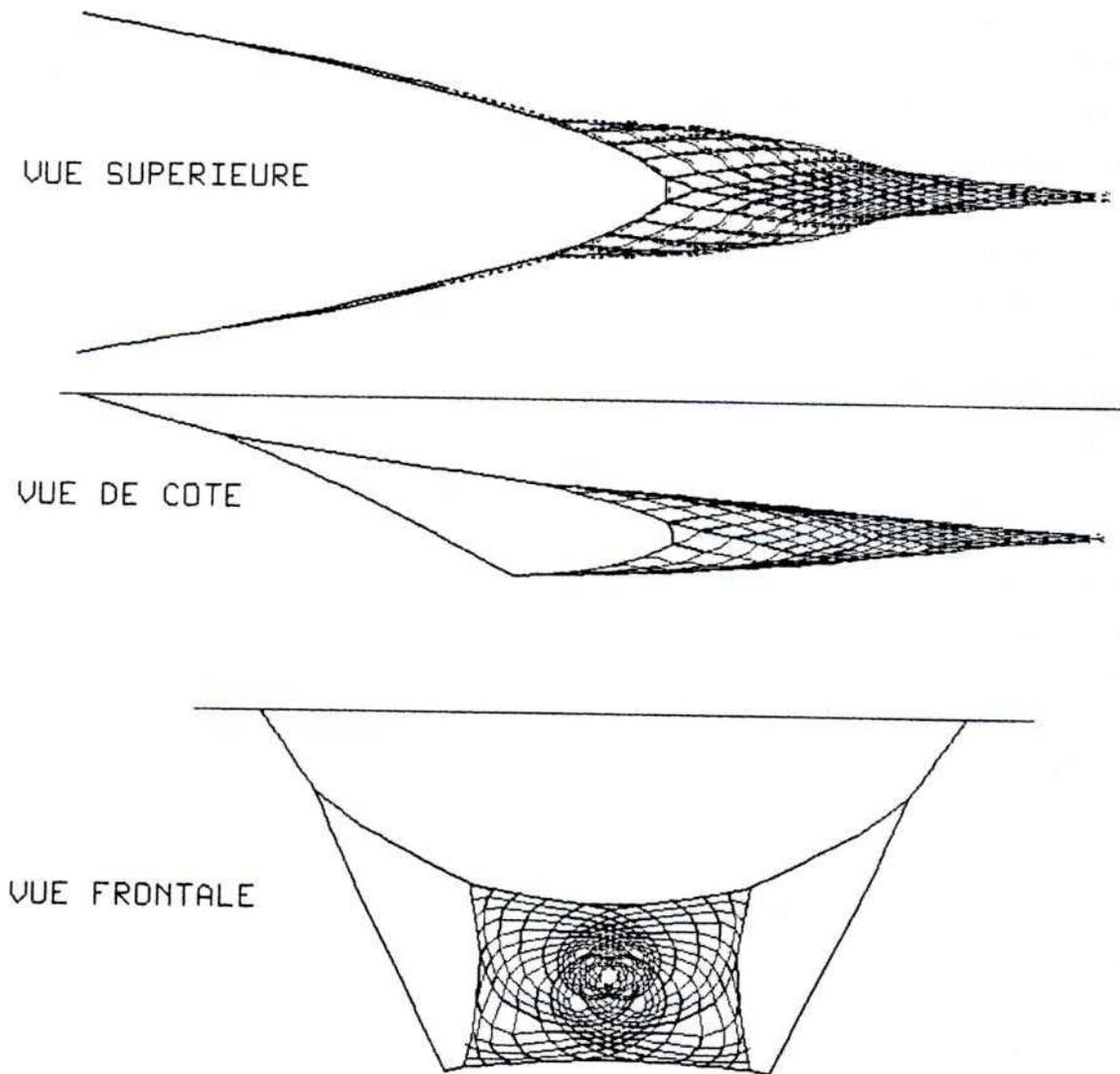
Les résultats concernant la géométrie et les tensions sont présentés sur les tableaux suivants:

TEST P2 V₀=90cm/s géométrie	immersion	écartement ailes supérieures	écartement ailes inférieures	ouverture verticale ailes	écartement du "carré"	ouverture verticale du "carré"
calcul (m)	1.50	2.09	2.16	1.48	1.96	1.25
mesure (m)	1.63	2.21	2.21	1.39	2.06	1.18
écart calcul -mesure(%)	-8.0	-5.4	-2.3	+6.5	-4.9	+5.9

tableau 6 : géométrie du chalut - comparaison calcul/mesure. Test P2

TEST P2 V₀=90cm/s tensions (N)	funes	bras supérieur	bras inférieur
calcul	13.528	6.543	5.660
mesure	13.106	6.690	5.239
écart calcul/mesure %	+3.2	-2.2	+8.1

tableau 7 : tensions - comparaison calcul/mesure. Test P2



Test No P2 $U_0 = 0.90 \text{ m/s}$

figure 51 : résultats obtenus par calcul à une vitesse de 0.90m/s

L'observation de ces résultats montre l'efficacité de notre méthode. En effet, d'une part l'évolution de la géométrie du chalut soumis à l'action du courant est bien reproduite, d'autre part on peut remarquer que les écarts entre les tensions calculées et celles mesurées sont relativement faibles.

En ce qui concerne la géométrie on observe, en bassin à circulation, que lorsque la vitesse augmente le chalut remonte, son ouverture verticale diminue et il se dérègle dans sa partie inférieure (un chalut bien "réglé", dans le cas d'un chalut pélagique, doit avoir ses parties supérieures et inférieures parfaitement symétriques). L'ensemble de ces phénomènes est bien restitué par notre modèle.

Les tensions mesurées au niveau des funes (points fixes) sont correctement calculées. On peut toutefois noter des écarts plus importants au niveau de la répartition des efforts entre les bras supérieurs et inférieurs. Cela peut provenir de la difficulté à connaître exactement, au cours des essais, la longueur des bras (élasticité, mode de fixation...). Or le gréement schématise un système triangulé dont la répartition des efforts internes est très sensible aux variations de longueur.

3.6.122. prise en compte des mailles détendues

Les figures suivantes sont des agrandissements des vues latérales du chalut lors des essais P1 et P2 décrits précédemment.

Nous pouvons observer sur la figure 52 que le fait d'avoir divisé chaque côté de maille en deux éléments permet de prendre en compte les mailles détendues. Nous aurions bien sûr pu les diviser en un nombre plus important pour obtenir une forme encore plus réaliste, mais cela aurait augmenté le nombre de noeuds et par là le temps de calcul.

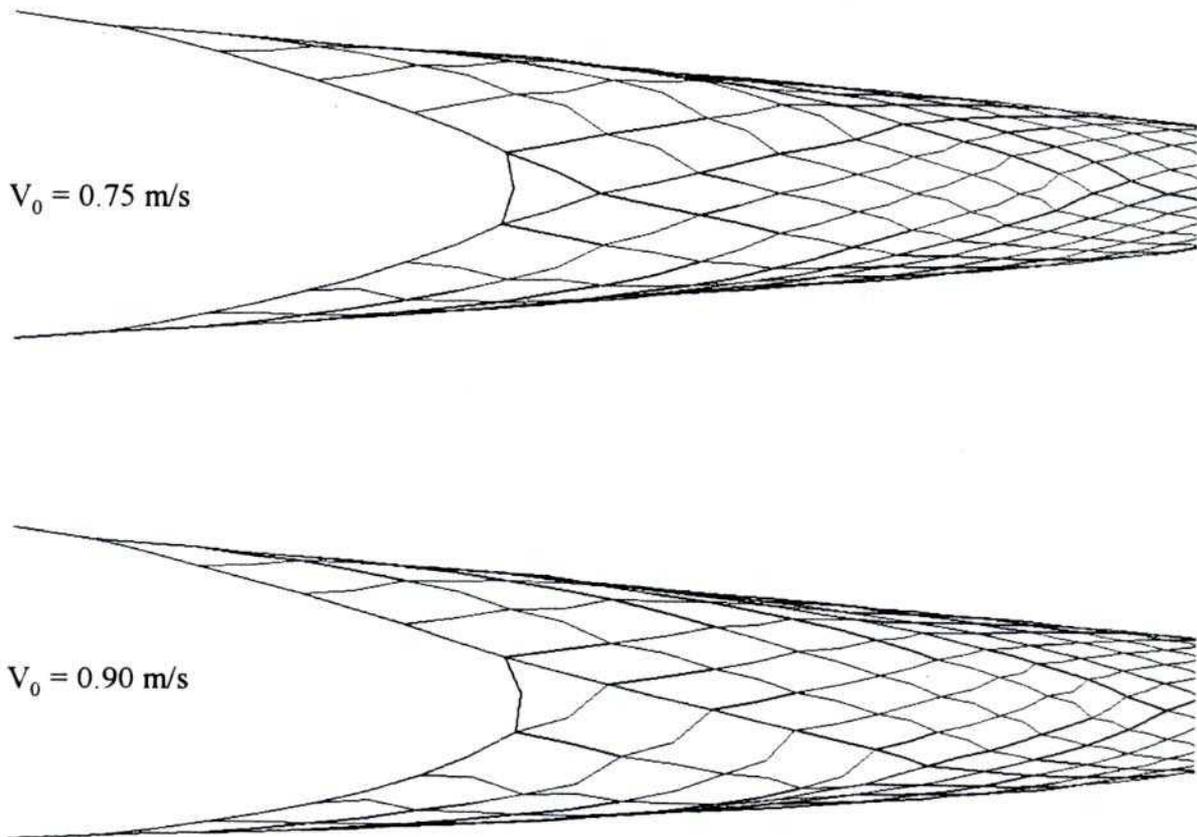


figure 52 : vue de côté du chalut

3.6.2. Prise en compte des ralingues

3.6.2.1. définition

Une ralingue est un cordage monté sur un engin de pêche et servant de support ou de renfort aux pièces de filet qui le constituent. Ces ralingues sont en particulier utilisées pour assembler au niveau d'une même zone les pièces des différentes faces du chalut.

Elles ont toujours un rôle de renfort pour absorber des surtensions dues à des captures importantes ou à des rencontres avec des "croches" sur fond (susceptibles de stopper brutalement le chalut). Elles assurent parfois une fonction spécifique qui consiste à "forcer" l'ouverture des mailles. Leur longueur est alors inférieure à la longueur que prendrait la pièce de filet dans le courant en l'absence de ralingue.

3.6.22. problèmes posés par les ralingues

Le calcul des efforts hydrodynamiques subis par les ralingues ne pose pas de problème. Par contre, la résolution des équations d'équilibre des noeuds où intervient une ralingue n'est pas possible par la méthode que nous avons proposée.

En effet, la figure suivante montre par exemple que lorsque l'on assemble deux pièces de filet, en constituant des noeuds de type 4 et en y intégrant une ralingue, on crée des noeuds à 6 fils dont 3 "supérieurs". Quel que soit le type de noeud considéré, la prise en compte d'une ralingue fait apparaître des noeuds à trois fils supérieurs.

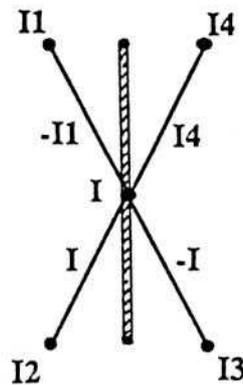


figure 53 : création de noeuds à 6 fils par une ralingue

Lors de la création des fichiers nous devons dans ce cas prévoir un nouveau fichier ".ral" qui décrit les caractéristiques physiques de la ralingue et les numéros des noeuds du filet qu'elle relie.

Pour un élément de ralingue nous devons décrire sa longueur, son diamètre, son poids ainsi que le numéro des noeuds du filet situés à ses extrémités.

Ce point ne constitue pas un réel problème il ne fait que compliquer un peu plus notre étude.

3.6.23. solution proposée

3.6.231. méthode

Notre méthode consiste à ne pas positionner physiquement ces ralingues mais à introduire des singularités aux noeuds qu'elles relient. Les efforts dus aux singularités sont alors calculés afin qu'ils correspondent exactement aux efforts et aux tensions qui seraient exercés par les ralingues.

Les efforts extérieurs (efforts hydrodynamiques, pesanteur) sont déterminés de la même manière que celle utilisée pour les fils constituant le chalut .

On représente l'action de l'élément de ralingue sur les noeuds situés à ses extrémités par une force ponctuelle agissant sur chacun d'eux. Elle est orientée d'un noeud vers l'autre. Son intensité (tension de l'élément) est ajustée par itérations successives de façon à obtenir que la distance séparant les deux noeuds considérés soit égale à la longueur de l'élément de ralingue.

3.6.232. résultats

Les résultats que nous présentons ont été obtenus à une vitesse de 0,75 m/s, en positionnant les ralingues en respectant le plan présenté sur la figure 48.

TEST P1S $V_0=75\text{cm/s}$ géométrie	immersion	écartement ailes supérieures	écartement ailes inférieures	ouverture verticale ailes	écartement du "carré"	ouverture verticale du "carré"
calcul (m)	1.50	2.57	2.57	1.54	2.64	1.42
mesure (m)	1.61	2.64	2.58	1.44	2.62	1.33
écart calcul -mesure(%)	-6.8	-2.7	-0.4	+6.9	+0.8	+6.8

tableau 8 : géométrie du chalut - comparaison calcul/mesure. Test P1S

TEST P1S tensions (N)	funes	bras supérieur	bras inférieur
calcul (m)	1.166	0.572	0.495
mesure (m)	1.328	0.708	0.520
écart calcul/mesure(%)	-12.2	-19.2	-4.8

tableau 9 : tensions - comparaison calcul/mesure. Test P1S. $V_0 = 0.75 \text{ m/s}$

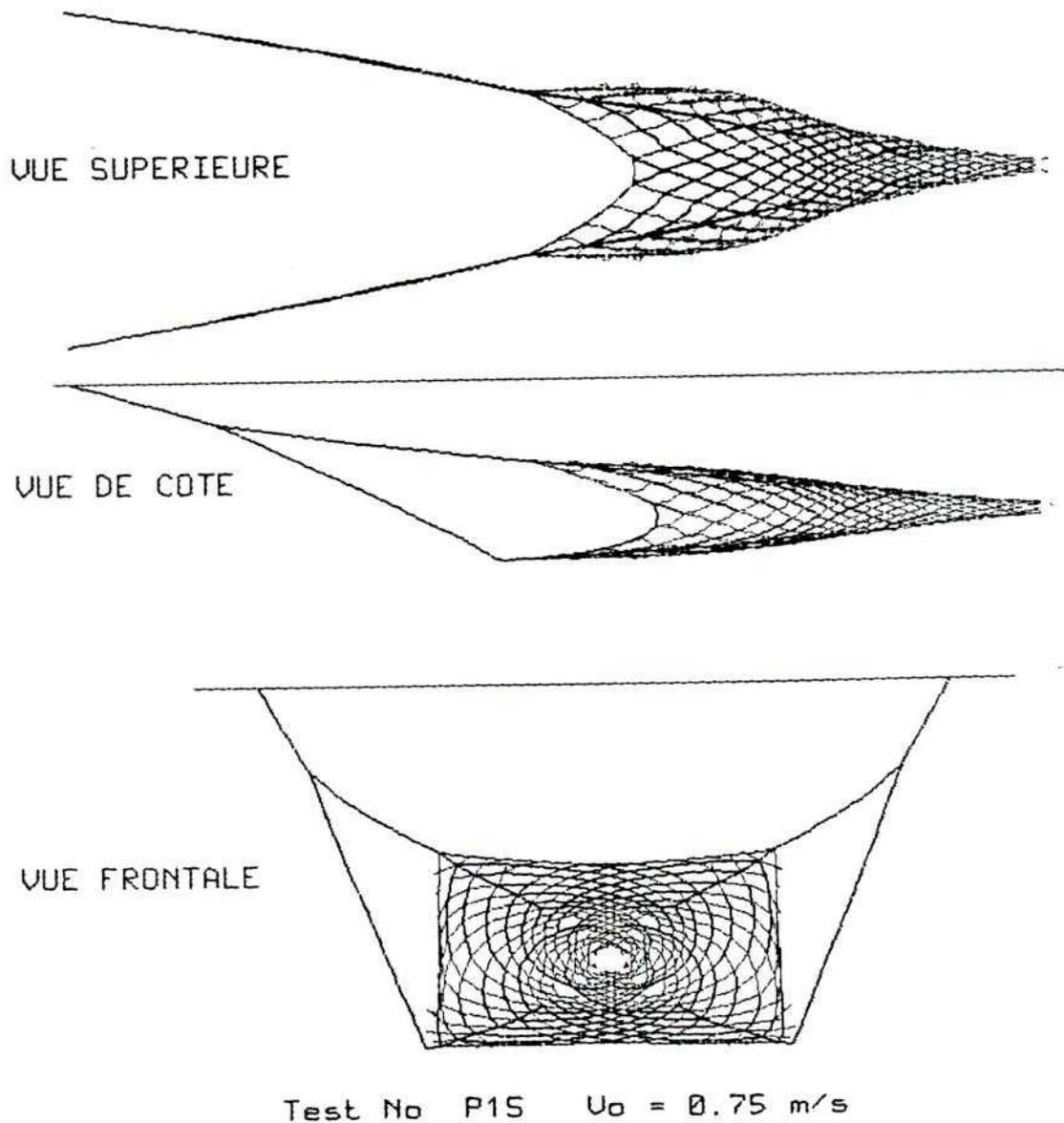


figure 54 : résultats obtenus par calcul à une vitesse de 0,75 m/s

Nous pouvons observer que les ralingues introduites sont très courtes, par rapport aux standards habituels, elles provoquent des déformations importantes des mailles qui sont pourtant bien prises en compte par notre calcul. Nous pouvons remarquer que si nous n'avions pas "coupé en deux" chaque côté de maille, il aurait été impossible de prendre en compte les ralingues dans notre calcul.

3.6.3. Cas particulier du chalutage de fond

La particularité est bien-sûr ici l'apparition d'une condition limite (liaison non holonome) qui interdit aux différents noeuds et fils qui constituent le train de pêche de franchir une nouvelle frontière: le fond.

Il s'agit, ici, comme dans le cas des ralingues, de trouver une solution numérique utilisable dans notre calcul.

3.6.31. prise en compte du fond

La présence du fond entraîne la prise en considération de deux aspects physiques : d'une part l'impossibilité de franchir cette barrière constituée par le fond et d'autre part l'apparition d'un frottement sur ce fond pour les éléments du train de pêche qui sont en contact avec celui-ci.

3.6.311. forces de frottement

Nous rappelons ces forces pour mémoire. Nous avons déjà abordé ce problème (paragraphe 2.7.2) et avons constaté qu'en l'état actuel de nos connaissances, il était impossible d'écrire une formulation générale, justifiée et satisfaisante, de ces efforts pour notre étude. C'est pour cette raison que dans notre code de calcul, nous considérerons ces frottements négligeables. Dès qu'ils pourront être un peu mieux connus, l'introduction de ces efforts de frottement ne présentera aucune difficulté.

Nous mettons là encore en évidence un nouveau sujet d'étude possible.

3.6.312. composante normale de la réaction du fond

Pour simuler la présence du fond nous introduisons une force normale qui intervient en tout point du train de pêche (gréement ou élément du filet) qui touche le fond.

Dès qu'un noeud entre en contact avec le fond, ou le traverse numériquement (cote du point inférieure ou égale à la cote du fond), nous calculons une force verticale, qui est

considérée comme une singularité appliquée en ce noeud. Elle s'ajuste au cours du processus itératif de telle sorte que le noeud se stabilise à la cote du fond.

La connaissance de cette force de réaction du fond ainsi calculée pourra nous permettre de déterminer le poids apparent optimum des panneaux divergents et du bourrelet afin que le chalut reste en contact avec le fond, sans présenter une traînée et un encombrement excessif.

Nous complétons notre fichier de résultats, qui contient déjà les coordonnées des noeuds et les tensions des fils qui en sont issus, par une nouvelle colonne donnant en tout point la valeur de cette réaction du fond (si elle existe).

3.6.32. applications

3.6.321. chalut étudié

Le chalut étudié est un chalut de fond à deux faces. Le plan du chalut est présenté sur la figure 56.

Le gréement utilisé est un gréement à deux entremises dont les caractéristiques sont les suivantes:

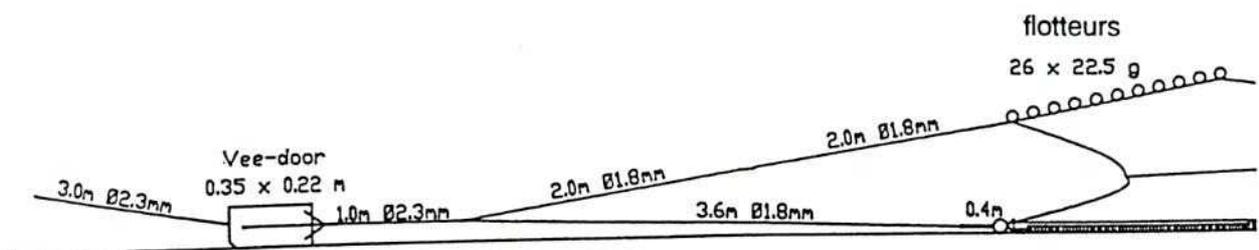


figure 55 : gréement utilisé sur le chalut de fond

côté de
maille fil
mm

120.0 c1
120.0 c2

120.0 c1
120.0 c2

120.0 c1
120.0 c2

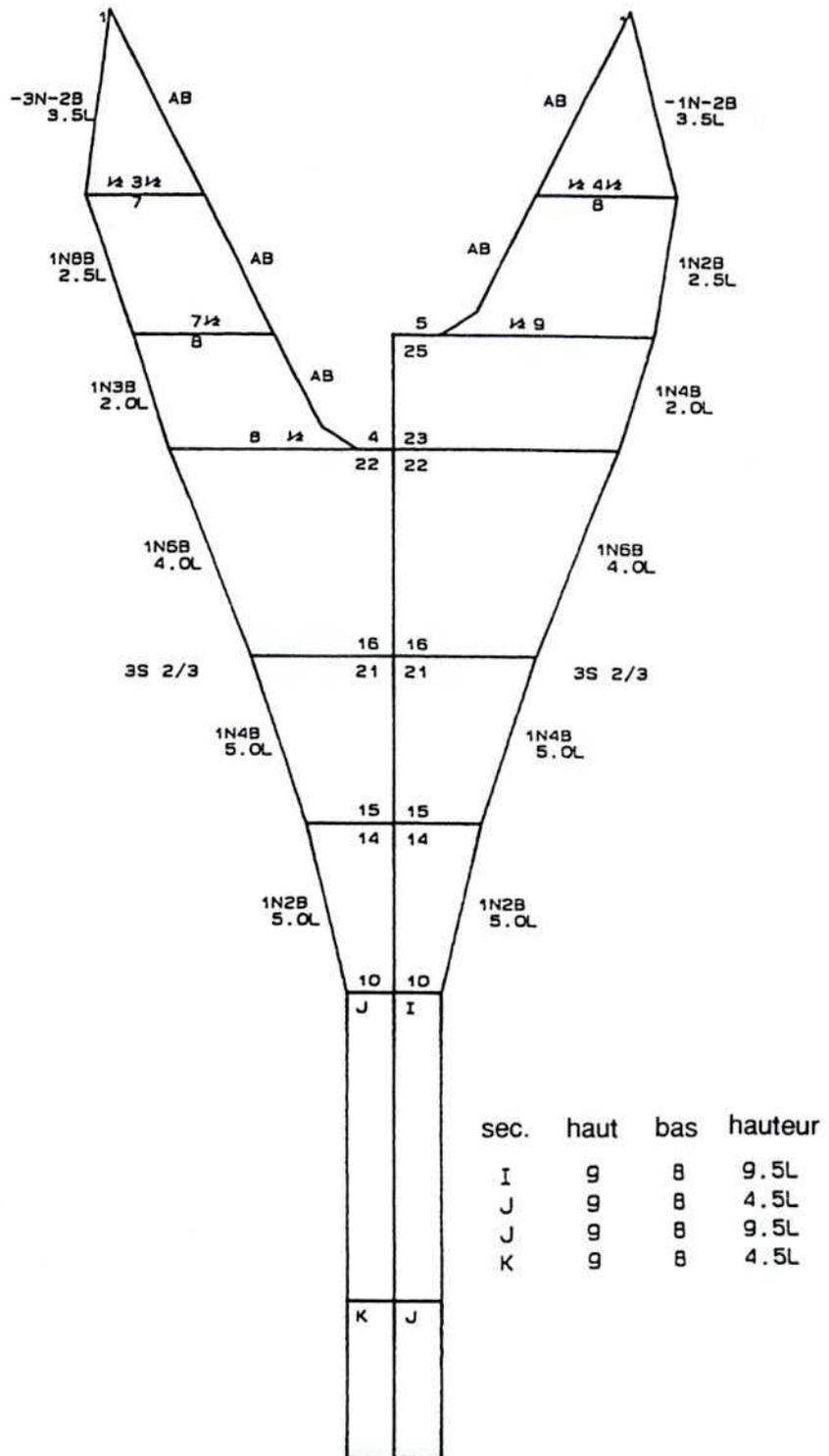
120.0 c1
120.0 c2

80.0 c1
80.0 c1

80.0 c1
80.0 c1

80.0 c3
80.0 c3

80.0 c4
80.0 c4



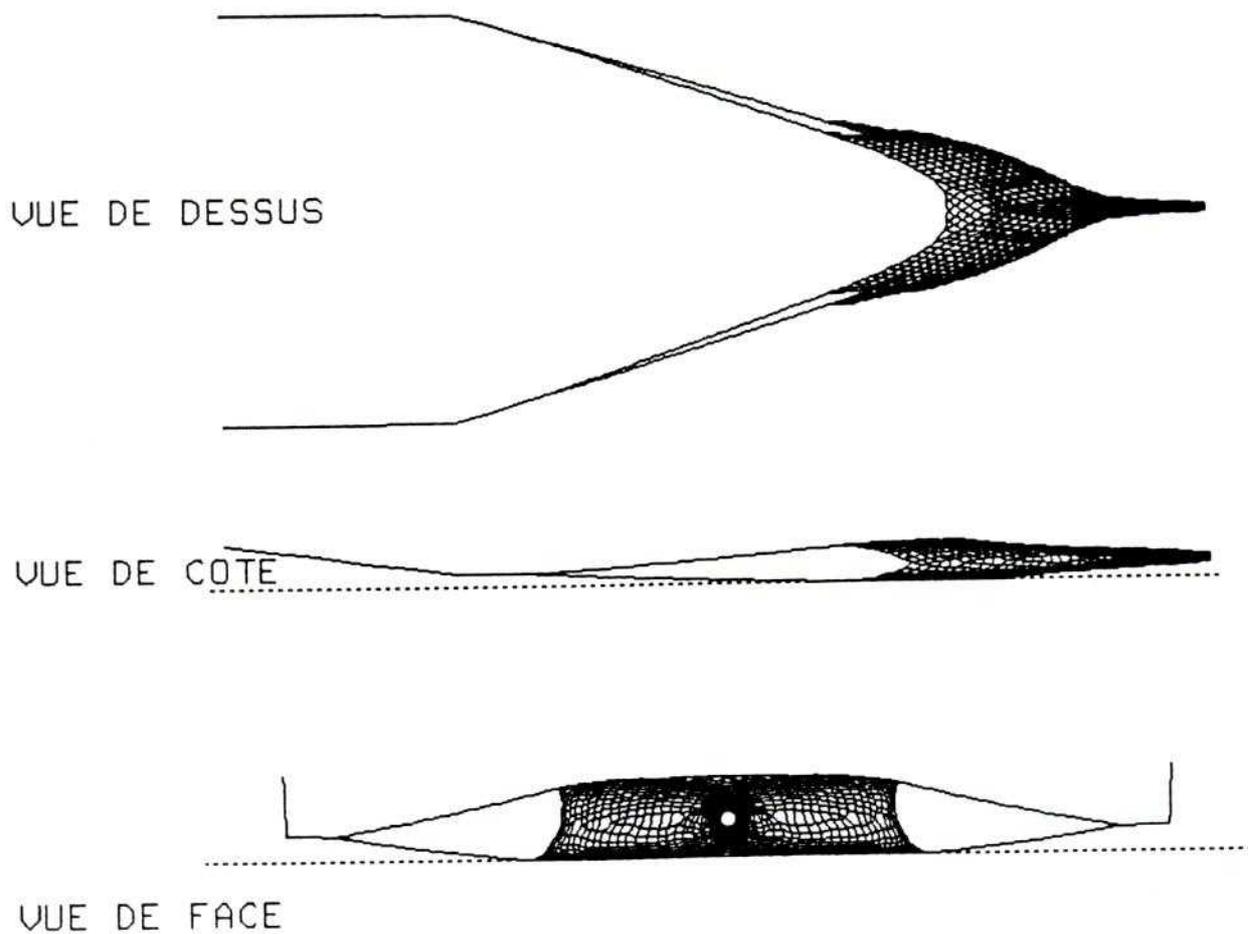
IFREMER - GOV 19.70 m / 25.90 m
Model 1:5

figure 56 : plan du chalut de fond étudié

3.6.322. résultats

Les essais ont été réalisés au bassin du DIFTA à une vitesse de 0,58 m/s, la distance entre les points fixes étant de 5,64 m.

La figure suivante présente les trois vues du chalut obtenues par calcul :



Test No F6

$U_0 = 0.58 \text{ m/s}$

figure 57 : résultats du calcul pour $V_0 = 0,58 \text{ m/s}$

Les deux vues agrandies ci-dessous permettent une meilleure observation des résultats:

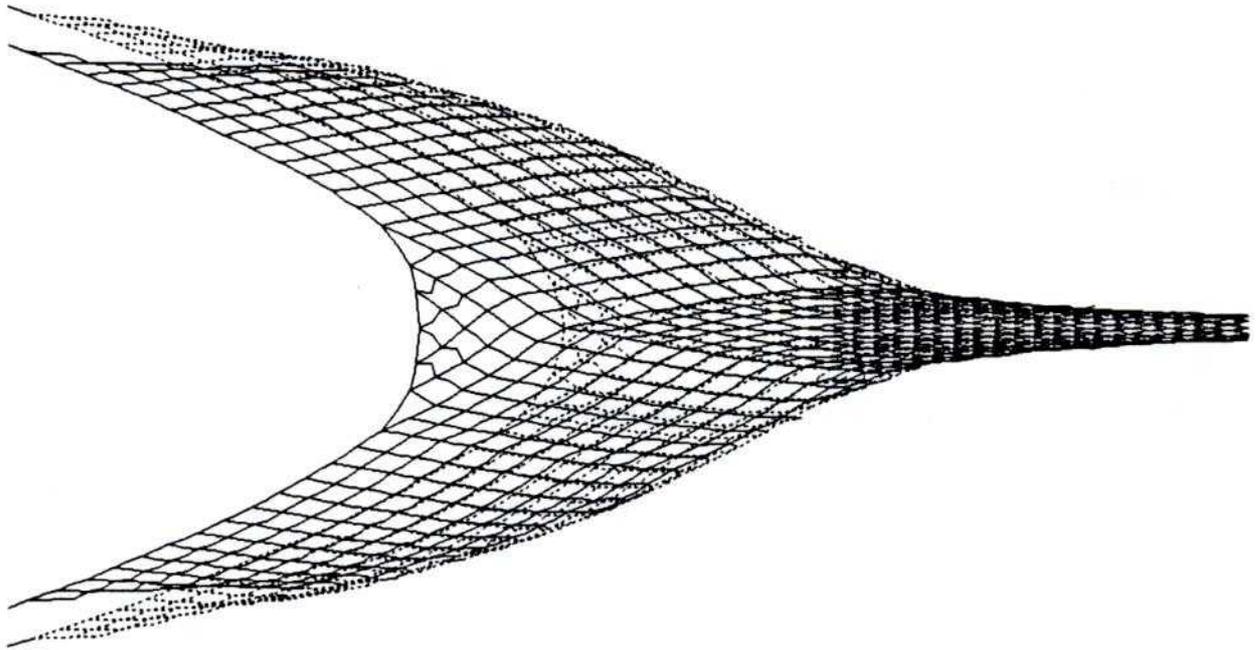


figure 58 : vue de dessus du chalut ($V_0 = 0.58$ m/s)
- la face supérieure est en trait continu
- la face inférieure est en trait pointillé

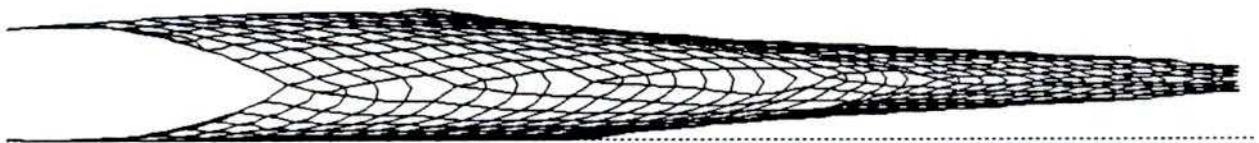


figure 59 : vue de côté du chalut ($V_0 = 0.58$ m/s)

Nous observons sur ces figures que la présence du fond est bien prise en compte par notre méthode.

Sur la figure 59 la toile ne touche pas le fond. La confrontation avec la figure 58 permet de voir qu'il s'agit de la projection du bourrelet sur le plan vertical.

Le tableau suivant donne les principales caractéristiques d'ouverture et de tension obtenues au cours de cet essai.

géométrie tension V= 0.58m/s	écartement entre panneaux	écartement ailes supérieures	écartement ailes inférieures	ouverture verticale ailes	ouverture verticale du "carré"	tension dans les funes
calcul (m)	5.60	2.22	2.53	0.48	0.55	4.38
mesure (m)	5.50	2.28	2.71	0.45	0.60	4.85
écart calcul -mesure(%)	+1.8	-2.6	-6.6	+6.7	-8.3	-8.3

tableau 10

3.7. Difficulté de convergence - temps de calcul

La principale difficulté subsistante et dont nous ne maîtrisons pas encore complètement la solution est liée aux problèmes de convergence et de temps de calcul.

3.7.1. Les problèmes de convergence

Nous avons déjà écrit que nous considérons que la convergence est atteinte lorsque la forme est "stable" d'une itération à l'autre. Dans notre calcul, elle est considérée obtenue lorsque le "mouvement" de chacun des noeuds du train de pêche, d'une itération à la suivante, est inférieur à un "déplacement" maximum autorisé qui constitue notre critère de convergence. Nous le fixons arbitrairement. Nous l'avons défini comme étant un critère absolu, toujours le même quelles que soient les longueurs des côtés de mailles issus du noeud étudié.

Le choix de ce déplacement constitue une difficulté importante de notre étude. Il doit être suffisamment grand pour que les calculs ne soient pas trop longs et suffisamment petit pour que nous soyons sûr d'avoir atteint la forme d'équilibre. Sa détermination est primordiale, parfois nous devons le choisir à la limite de l'aberrant, de l'ordre du micron (à la limite des chiffres significatifs du calculateur), car généralement à la fin du calcul, les noeuds ont des mouvements infiniment petits.

Nous pouvons formuler les remarques générales suivantes :

-- Le fait d'obtenir des déplacements très faibles d'une itération à l'autre n'est pas toujours significatif d'une convergence achevée. En particulier, dans le cas des chaluts pélagiques on obtient très rapidement la forme globale du filet, mais à une immersion approchée. Puis le filet tend à descendre très lentement vers son immersion d'équilibre. Cette difficulté n'apparaît pas pour un chalut de fond. Le poids des panneaux et des lests l'entraîne rapidement vers le fond qui, lorsqu'il est atteint, fixe l'immersion du filet.

-- Plus le nombre de noeuds constituant le chalut est important plus les déplacements de chacun d'entre eux sont faibles, même pour les premières itérations. Le nombre d'itérations nécessaires croît donc rapidement avec le nombre de noeuds. Comme le nombre de calculs effectués à chaque itération est lié au nombre de noeuds, la durée totale d'un calcul présente un caractère "explosif" en fonction du nombre de noeuds.

-- Dans certains cas, particulièrement lorsqu'il existe des mailles détendues, des noeuds peuvent se mettre à osciller. L'amplitude de ces oscillations est généralement faible. Mais, si pour être assuré d'une convergence effective, on a choisi un critère très faible, il se peut que ces oscillations masquent la convergence. C'est pourquoi nous surveillons particulièrement la stabilité de noeuds caractéristiques tels que les pointes d'ailes. Si celles-ci ne "bougent" plus et que la convergence ne semble pas atteinte, il faut vérifier qu'il n'existe pas de telles oscillations de noeuds singuliers.

3.7.2. Accélération de la convergence

Nous avons déjà signalé au paragraphe 3.4.1 qu'il fallait limiter les déplacements des noeuds d'une itération à l'autre. En effet, surtout au début du calcul, la forme du chalut est très éloignée de la forme d'équilibre recherchée. Le calcul, fondé sur des équations d'équilibre qui ne sont pas encore vérifiées, peut donc conduire à trouver des déplacements irréalistes, parfois incompatibles avec les conditions de liaison des noeuds entre-eux. Nous avons donc commencé par appliquer une méthode de relaxation. Mais pour éliminer les déplacements trop importants nous devons prendre un coefficient de relaxation très faible (inférieur à 0,01). Ce qui allongeait les temps de calcul en "pénalisant" les noeuds dont les mouvements auraient été corrects.

Nous avons alors constaté qu'il était possible d'utiliser une autre méthode qui consiste à fixer une limite maximum aux déplacements des noeuds. Lorsque les résultats du

calcul conduisent à une valeur inférieure à cette limite, ils sont conservés. Si pour un noeud le déplacement obtenu est supérieur à la limite, on le réduit arbitrairement à cette valeur en conservant la direction trouvée par le calcul. Cette limite est fixée à 10% du côté de la maille à laquelle appartient le noeud considéré.

Cette nouvelle méthode nous permet d'obtenir rapidement, à partir de la configuration initiale, une forme approchée de celle d'équilibre. En fin de calcul nous utilisons la méthode de relaxation pour obtenir la convergence. En effet, elle devient plus efficace lorsque nous approchons de la forme d'équilibre, car nous pouvons utiliser des coefficients de relaxation plus élevés (0,1). Le passage de l'une à l'autre se fait lorsque la géométrie à l'entrée du chalut (position des extrémités des ailes) est stable.

Pour accélérer la descente du chalut, nous faisons varier, entre deux itérations, l'altitude des noeuds en les abaissant en bloc d'une quantité égale au déplacement moyen des extrémités des ailes pendant l'itération précédente. Dans le cas du chalut de fond, cette procédure est arrêtée lorsque l'un des points du train de pêche atteint la cote du fond.

Ayant remarqué que la convergence est d'autant plus difficile à obtenir que le nombre de noeuds est important, nous avons "supprimé", pour cette phase de mise au point, la ralonge et le cul du chalut en évaluant le frottement sur les fils et en le répartissant sur les dernières mailles conservées.

Avec toutes ces améliorations, nous sommes passés, pour un même chalut, de la demi-heure à la minute CPU, les calculs étant réalisés sur le Cyber du centre IFREMER de Brest. Actuellement le temps de calcul de la forme d'équilibre du chalut décrit figure 56 (qui comporte 820 noeuds) est de 1 à 3 minutes sur le Cyber (temps variable selon le cas étudié : longueur des ralingues, vitesse de remorquage, présence du fond...).

Nos partenaires Danois ont traduit notre logiciel en turbo pascal et l'on implanté sur un PC 486. Ils arrivent à obtenir la forme d'équilibre du chalut en 30 à 90 minutes de calcul.

3.7.3. Nécessité de la globalisation

Sur un chalut réel, le nombre de noeuds peut atteindre 2 à 3 millions. Il faut multiplier cette valeur par 3 (introduction des noeuds intermédiaires) et par 5 (nombre d'inconnues par noeud) pour obtenir l'ordre de notre système d'équations !

Même pour des maquettes, les problèmes de convergences et la durée du calcul s'accroissent avec le nombre d'inconnues. Nous avons simulé des modèles constitués de 10 000 noeuds: la convergence n'était pas atteinte après 15 heures de calcul.

Il est donc absolument nécessaire d'élaborer une méthode dite de globalisation. Il s'agit de modéliser un nombre important de mailles réelles par une maille fictive équivalente.

Dans la dernière partie nous abordons l'étude des règles qui permettront de garantir l'équivalence mécanique du filet "globalisé" et du filet réel.

PARTIE 4

GLOBALISATION DU MAILLAGE

L'objectif de cette globalisation est de réduire le plus possible le nombre de noeuds dont on doit étudier l'équilibre et donc réduire le temps de calcul.

La globalisation consiste à remplacer un certain nombre de mailles réelles d'une pièce de chalut par une maille fictive unique et équivalente. Nous allons évaluer numériquement, sur un cas simple, les erreurs commises en utilisant cette globalisation.

4.1. Filets dans un champ de force uniforme

4.1.1. Premières règles de globalisation

Dans un premier temps pour définir la méthode de globalisation que nous allons utiliser, nous nous intéresserons à un filet placé dans un champ de force uniforme (pesanteur par exemple).

Définition :

Nous définissons le **facteur de globalisation** f_g . Il s'agit du nombre de côtés de mailles du filet réel contenu dans un côté de maille du filet globalisé. Dans l'exemple présenté sur la figure 60 le facteur f_g est égal à 3.

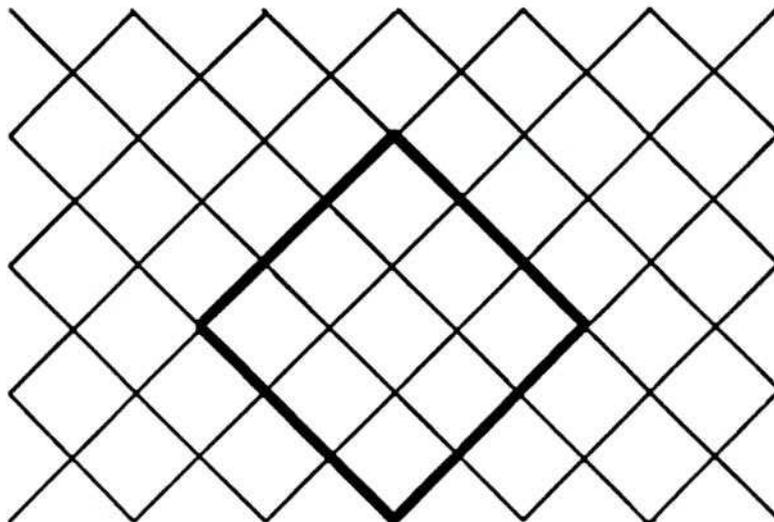


figure 60

Nous en déduisons le **facteur de globalisation surfacique** G . Il s'agit du nombre de mailles du filet réel contenues dans une maille du filet globalisé. Il est évident que $G = f_g^2$.

Règles de globalisation :

Nous noterons à l'aide de * les grandeurs du filet globalisé; Nous obtenons les relations suivantes:

Nombre de mailles au "périmètre":

$$M^* = \frac{M}{f_g}$$

Nombre de rangs de mailles:

$$N^* = \frac{N}{f_g}$$

Longueur du côté de maille:

$$L^* = f_g L$$

Remarquons que, a priori, le filet "globalisé" doit être constitué d'un nombre entier de mailles et donc qu'il faut en toute rigueur écrire:

$$M^* = \text{int}\left(\frac{M}{f_g}\right) \quad \text{et} \quad N^* = \text{int}\left(\frac{N}{f_g}\right)$$

et que donc nous commettons nécessairement une erreur d'arrondi.

La "tension de remorquage" dans le champ de force uniforme de densité linéique p a pour expression:

$$R = N \times M \times p \times L \times 4$$

(Dans le cas d'un filet d'axe vertical et du champ de pesanteur, p serait le poids apparent par unité de longueur)

Pour le filet globalisé:

$$R^* = N^* \times M^* \times p^* \times L^* \times 4$$

La "tension de remorquage" doit être la même dans le filet globalisé que dans le filet réel. Donc:

$$N M p L = N^* M^* p^* L^* = \frac{N}{f_g} \frac{M}{f_g} p^* L f_g$$

soit:

$$p^* = f_g p$$

4.1.2. Essais systématiques

Les essais ont été effectués sur un cas simple: un filet à symétrie de révolution qui permet de tester des filets contenant un nombre très important de mailles en limitant le nombre d'inconnues à déterminer; nous avons écrit un programme spécifique inspiré des calculs précédents mais axisymétrique.

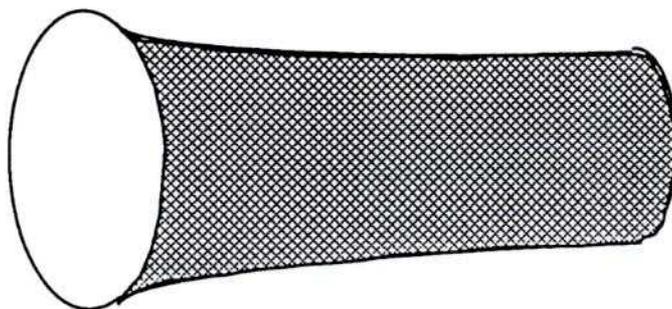


figure 61

Dans cette première partie de l'étude de la globalisation, nous n'étudierons que des filets soumis à l'action d'un champ de force uniforme. En effet, les efforts hydrodynamiques dépendant de la forme prise par le chalut, la présence de ce couplage fluide-structure pourrait compliquer l'interprétation des résultats.

Nous prendrons un champ de force linéique d'intensité unitaire orienté selon l'axe de symétrie du filet et dirigée vers l'arrière du filet (problème analogue au filet de basket dans le champ de pesanteur).

Nous avons choisi neuf formes de référence caractérisées par le nombre de mailles au périmètre d'entrée du filet et par l'ouverture des mailles du premier rang. Dans tous les cas le nombre de rangs de mailles est de 1500 et la longueur d'un côté de maille est 1 cm. Le nombre de mailles est calculé dans chaque cas de manière à obtenir un rayon d'entrée relatif (rayon d'entrée R / longueur du côté de maille L) donné.

R/L	R en mètres	60°	90°	120°
50	0.5	(1) 314	(4) 222	(7) 181
100	1.	(2) 628	(5) 444	(8) 363
500	5.	(3) 3142	(6) 2222	(9) 1814

tableau 11 : nombre de mailles au périmètre

Le numéro de la série est indiqué entre parenthèses devant le nombre de mailles au périmètre.

Dans un souci de concision nous ne présenterons ici que les résultats obtenus sur la série 5. Cependant les conclusions s'appuieront sur l'ensemble des cas.

Les premiers essais montrent que la convergence devient de plus en plus lente lorsque le nombre de mailles augmente. Nous utilisons un critère de convergence de 10^{-6} m et nous le complétons par le fait que ce critère doit être respecté pendant 50 itérations successives. Pour le filet non "globalisé", c'est-à-dire en prenant en compte toutes les mailles situées sur une méridienne, la forme convergée n'est pas atteinte après 200000 itérations qui représentent plus de 5 heures CPU.

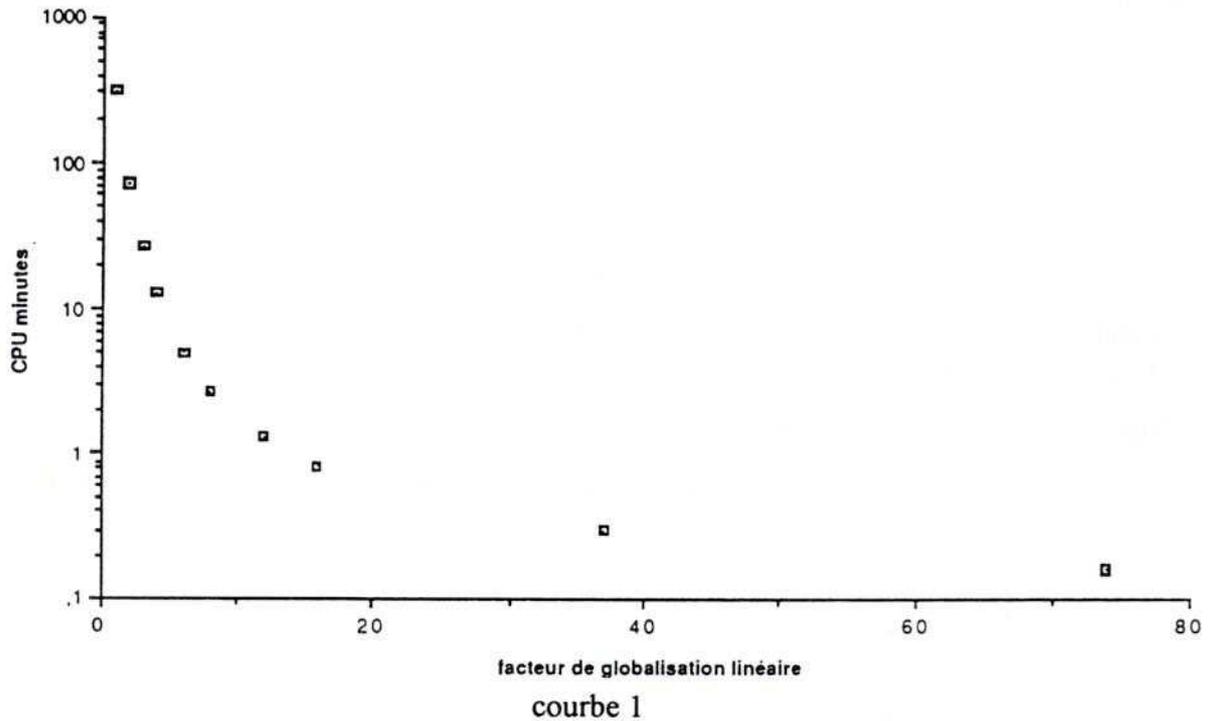
Dans le tableau suivant nous présentons les caractéristiques des essais et le temps de calcul correspondant. Les valeurs indiquées entre parenthèses indiquent l'erreur d'arrondi en maille "globalisée".

f_v	G	M	N	inconnues	itérations	CPU
1	1	444	1500	3000	200000*	5h 16m*
2	4	222	750	1500	93340	1h 13m
3	9	148	500	1000	51050	26m 40s
4	16	111	375	750	33363	13m 11s
6	36	74	250	500	19100	5m 01s
8	64	55 (0.5)	187 (0.5)	374	13430	2m 44s
12	144	37	125	250	9336	1m 20s
16	256	27 (0.75)	93 (0.75)	186	7705	50s
37	1369	12	40 (0.54)	80	6282	18s
74	5476	6	20 (0.27)	40	6108	10s

(*) : calcul inachevé

tableau 12 : caractéristiques des essais et temps de calcul

Nous pouvons alors tracer la courbe 1 présentant l'évolution du temps CPU (échelle logarithmique) en fonction du facteur de globalisation.



Le premier enseignement que nous obtenons de ces essais concerne le gain de temps de calcul lorsqu'on augmente le facteur de globalisation. Il est bien supérieur à ce que l'on espérait.

La figure suivante visualise sur un plan méridien la forme convergée des cas où f_g est égal à 6, 12, 37 et 74. Plus le facteur de globalisation augmente plus les traits correspondants sont larges.

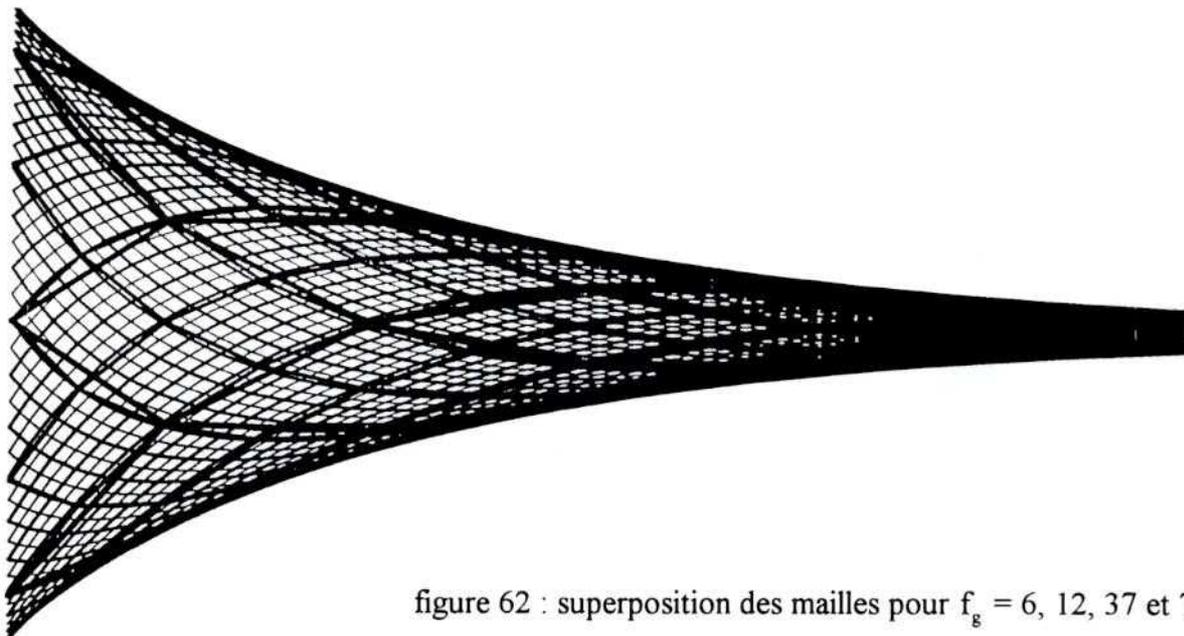


figure 62 : superposition des mailles pour $f_g = 6, 12, 37$ et 74

Les résultats concernant les efforts calculés dans les différents cas sont présentés sur le tableau 13.

La tension de remorquage devrait être égale au "poids" du filet, soit:

$$T_r = 1500 \times 444 \times 4 \times 0.01 = 26640\text{N}$$

On constate que l'on retrouve exactement ce résultat dans le cas où le facteur de globalisation choisi ne conduit pas à une erreur d'arrondi. De même, on constate une longueur à peu près identique du filet pour ces mêmes valeurs de f_g , dans les autres cas on observe des différences de longueur significatives.

f_g	remorquage	dens. radiale	z_{n+1}
1	26640	4031	29.579
2	26640	4117	29.585
3	26640	4124	29.585
4	26640	4126	29.583
6	26640	4128	29.584
8	26330	4155	29.500
12	26640	4125	29.586
16	25712	4207	29.330
37	26285	4005	29.192
74	26285	3774	29.211

tableau 13 : principaux résultats

La densité radiale est égale au quotient

de la composante radiale de la force de liaison d'un noeud situé sur le cerceau,
par la longueur d'arc du cerceau compris entre deux noeuds successifs.

Pour pouvoir améliorer la précision des résultats obtenus sur la tension de remorquage et la longueur du filet, nous allons estimer les erreurs commises lors des arrondis.

Le nombre de mailles négligées est :

$$X = N \Delta M + M \Delta N + \Delta N \Delta M$$

Ce qui représente un poids:

$$\Delta P = X f_g p 4 L$$

La longueur négligée est:

$$\Delta z_{n+1} \approx 2L \Delta N$$

En tenant compte de ces corrections on retrouve la tension théorique et une longueur à peu près identique dans tous les cas (tableau 14).

f_g	nb de mailles négligées	poids négligé	longueur négligée	tension corrigée	longueur corrigée
8	121.25	310.4	0.08	26640	29.580
16	90.56	927.3	0.24	26639	29.570
37	6.48	354.8	0.40	26640	29.592
74	1.62	354.8	0.40	26640	29.611

tableau 14 : correction des erreurs dues aux arrondis

Des écarts subsistent en ce qui concerne la densité d'effort radial. Ils sont dus au fait que la pente du côté d'une grande maille est à peu près la moyenne des pentes des côtés des mailles qu'elle globalise. La pente à l'origine n'est donc pas la même.

4.1.3. Problèmes de convergence

Nous avons déjà abordé ce problème, mais nous devons y revenir car il révèle une difficulté à laquelle nous devons être attentifs.

La figure 63 présente les entrées de cônes obtenus pour $f_g = 1$ et $f_g = 74$. Les résultats semblent très différents. En fait nous n'avons pas obtenu la convergence avec $f_g = 1$ après 5 heures de calcul. Le critère de convergence que nous avons utilisé pour ces essais était : aucune variation des rayons de la méridienne supérieure à 10^{-6} m (qui est une exigence à la limite des chiffres significatifs de la machine).

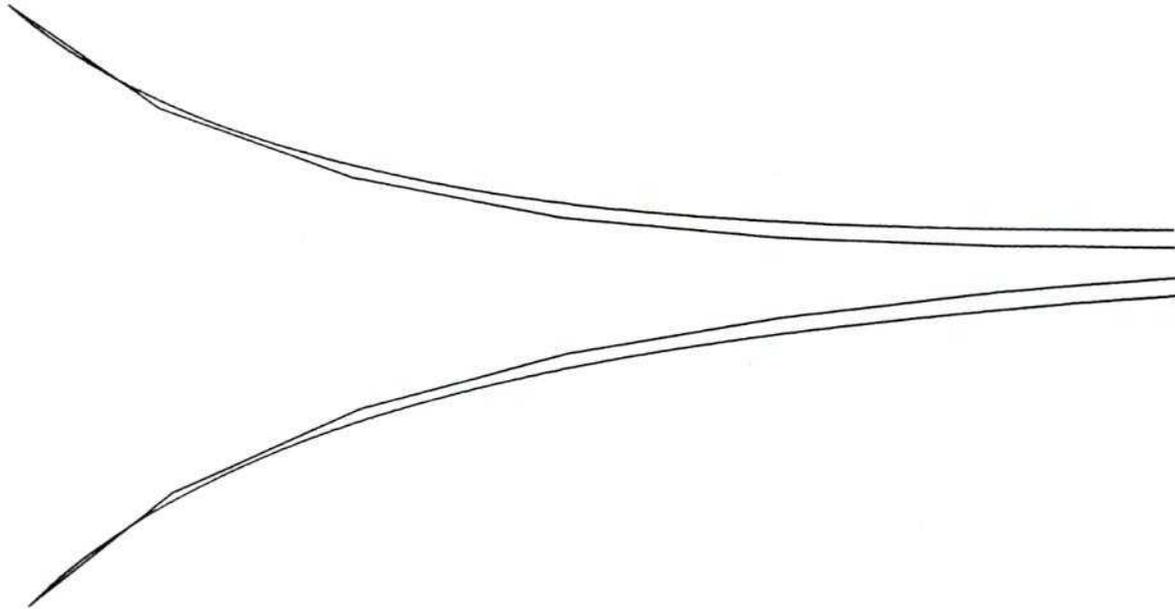


figure 63 : entrée des cas $f_g = 1$ et $f_g = 74$.

Sur le tableau suivant, et sur la figure 64, nous présentons les résultats obtenus pour un critère de convergence égal à 10^{-4} m.

f_g	remorquage	densité radiale	z_{n+1}	temps CPU
1	26639	428	27.81	9m 5s
2	26639	846	26.70	4m 45s
4	26639	3705	29.32	4m 24s
8	26639	4066	29.49	1m 40s
16	25712	4187	29.33	40s
37	26285	4003	29.19	17s
74	26285	3774	29.21	9s

tableau 15 : valeurs obtenues avec un critère de 10^{-4} m

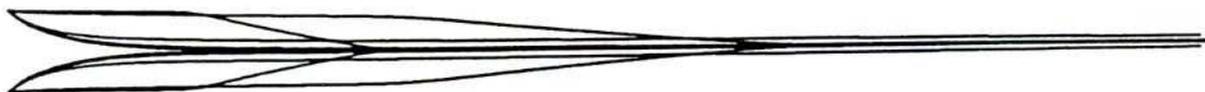


figure 64 : formes "convergées" à 10^{-4} m près

Avec ce critère la "convergence" est rapidement atteinte mais la forme obtenue n'est pas la forme d'équilibre. On remarque que **plus le nombre de mailles est important, plus on est éloigné de la convergence**. Dans notre cas il faudrait imaginer un critère de convergence relatif, c'est-à-dire dépendant de la longueur du côté de maille. Ce critère paraît difficile à appliquer dans le cas d'un chalut qui est constitué de mailles de tailles très diverses.

4.1.4. Conclusion des essais

-- Les règles que nous avons établies semblent efficaces.

-- Il faut faire attention aux arrondis et prendre toujours pour déterminer le nombre de mailles au périmètre et le nombre de rangs de mailles du filet globalisé les résultats des divisions arrondis à l'entier le plus proche. Nous avons vu qu'il était cependant nécessaire de calculer la nouvelle longueur des côtés de mailles et leur "poids" en corrigeant les valeurs théoriques des erreurs d'arrondi.

-- Le facteur de globalisation peut devenir très important: nous pensons cependant qu'il faut le limiter en considérant que le nombre de mailles au périmètre du filet globalisé ne doit pas devenir inférieur à 10; cette règle empirique rappelle le fait qu'un cercle est assez bien approché par un octogone.

4.2. Filets dans un champ de forces hydrodynamiques

Nous introduisons maintenant les efforts hydrodynamiques tels qu'ils sont décrits dans la partie 3.2.1 .

4.2.1. Règles de globalisation

Nous reprenons les règles établies pour le champ de forces uniforme mais en prenant garde aux erreurs d'arrondi:

Nombre de mailles au périmètre:

$$M^* = \frac{M}{f_g} \quad \text{le résultat étant arrondi à l'entier le plus proche}$$

Nombre de rangs de mailles:

$$N^* = \frac{N}{f_g} \quad \text{le résultat étant arrondi à l'entier le plus proche}$$

Longueur du côté de maille:

$$L^* = \frac{N}{N^*} L$$

Pour déterminer d^* nous avons admis que la traînée de la nappe de filet étirée de façon à donner aux mailles leur ouverture maximale et placée perpendiculairement au courant devait être la même dans le cas du filet réel que dans celui du filet globalisé. d^* doit donc vérifier la relation suivante:

$$R = 4 M N \times \frac{1}{2} \rho C_d d L V_0^2 = R^* = 4 M^* N^* \times \frac{1}{2} \rho C_d d^* L^* V_0^2$$

soit

$$d^* = \frac{M}{M^*} d$$

4.2.2. Résultats

Nous présentons ici le cas 6, dans un champ d'efforts hydrodynamiques, car le nombre de mailles très important au périmètre nous a permis de réaliser des essais avec des facteurs g égaux à 200.

Pour ce cas, nous nous sommes heurtés à des problèmes de convergence pour $f_g = 2$ et $f_g = 4$. Pour $f_g = 2$ nous avons utilisé presque 15 heures CPU pour effectuer 250 000 itérations sans obtenir la convergence. Pour cette même raison nous n'avons pas testé le cas $f_g = 1$.

Résultats:

f_g	G	M*	N*	nb itérat.	tps CPU	tension remorq.	densité radiale	z_{n+1}
2	4	1111	750	250000	14h41**	32813**	532**	26.27**
4	16	555	375	250000	7h18**	27083**	471**	27.57**
16	256	139	94	80817	37m	26879	476	27.62
64	4096	35	23	51914	5m 37s	25714	444	27.72
74	5476	30	20	51472	4m 52s	25887	465	27.68
100	10000	22	15	50817	3m 37s	26040	500	27.63
200	40000	11	7	31404	12s	26114	628	27.5

(**) pas de convergence

tableau 16 : résultats obtenus pour le cas 6 dans le champ de force hydrodynamique

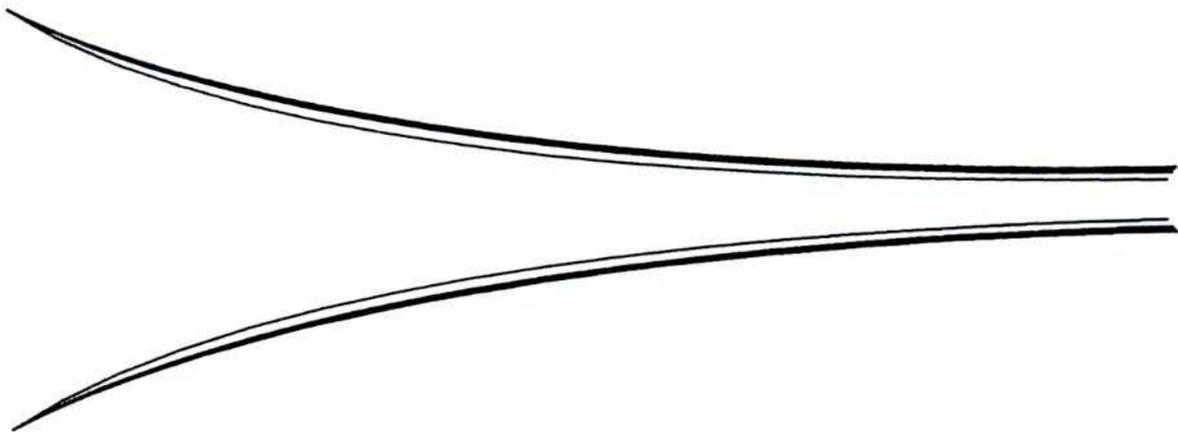


figure 65 : méridiennes pour $f_g = 16, 64, 74, 100$ et 200
(le trait isolé correspond au cas $f_g = 200$)

D'une manière générale, les résultats que nous obtenons, lorsque nous sommes assurés de la convergence, sont satisfaisants.

Les formes des filets sont comparables.

Les tensions de remorquage présentent un écart maximum de 4.6 %. Cette valeur est tout à fait admissible quand on la met en rapport avec les difficultés de détermination des coefficients hydrodynamiques à utiliser.

Les résultats précédents montrent les difficultés de convergence. Il semble que l'on puisse toujours obtenir la convergence des cas étudiés, mais elle devient infiniment lente lorsque le nombre de mailles devient très important.

Le tableau 16 montre l'importance des erreurs induites par la non convergence après 15 heures de calcul.

On en déduit qu'une convergence mal contrôlée peut provoquer des erreurs nettement supérieures que celles dues à une globalisation bien réalisée.

Ces essais nous montrent également que l'on peut retenir un facteur de globalisation très important tant que l'on conserve un nombre de mailles au périmètre supérieur ou égal à 10. En effet, la divergence de forme constatée pour $f_g = 200$ peut être attribuée au fait qu'il ne reste que 7 rangs de mailles pour décrire toute la longueur du filet.

Ainsi, dans l'exemple étudié, un facteur de globalisation linéaire égal à 100 semble justifié. Dans ce cas le nombre de mailles et donc d'inconnues est réduit dans un facteur **10000**.

Les gains de temps en calcul sont considérables puisque, pour traiter le même problème, les temps CPU peuvent varier de 15 secondes à plus de 15 heures.

Ces règles de globalisation devront être utilisées de manière systématique pour créer, à partir d'un plan de chalut, une version globalisée utilisable dans notre code de calcul. Ce travail, effectué par D. Marichal, est en cours de réalisation et nous pouvons ici présenter une version "globalisée" du chalut de fond dont le modèle au cinquième (figure 56) a été utilisé pour tester notre méthode au paragraphe 3.6.3.

Ce plan qui est décrit sur la figure 66 présente sur sa partie gauche la demi-face inférieure du chalut et à droite sa demi-face supérieure. Les traits horizontaux, qui n'ont pas d'existence réelle dans le chalut, ne sont là que pour indiquer où se font les liaisons entre les deux faces du chalut.

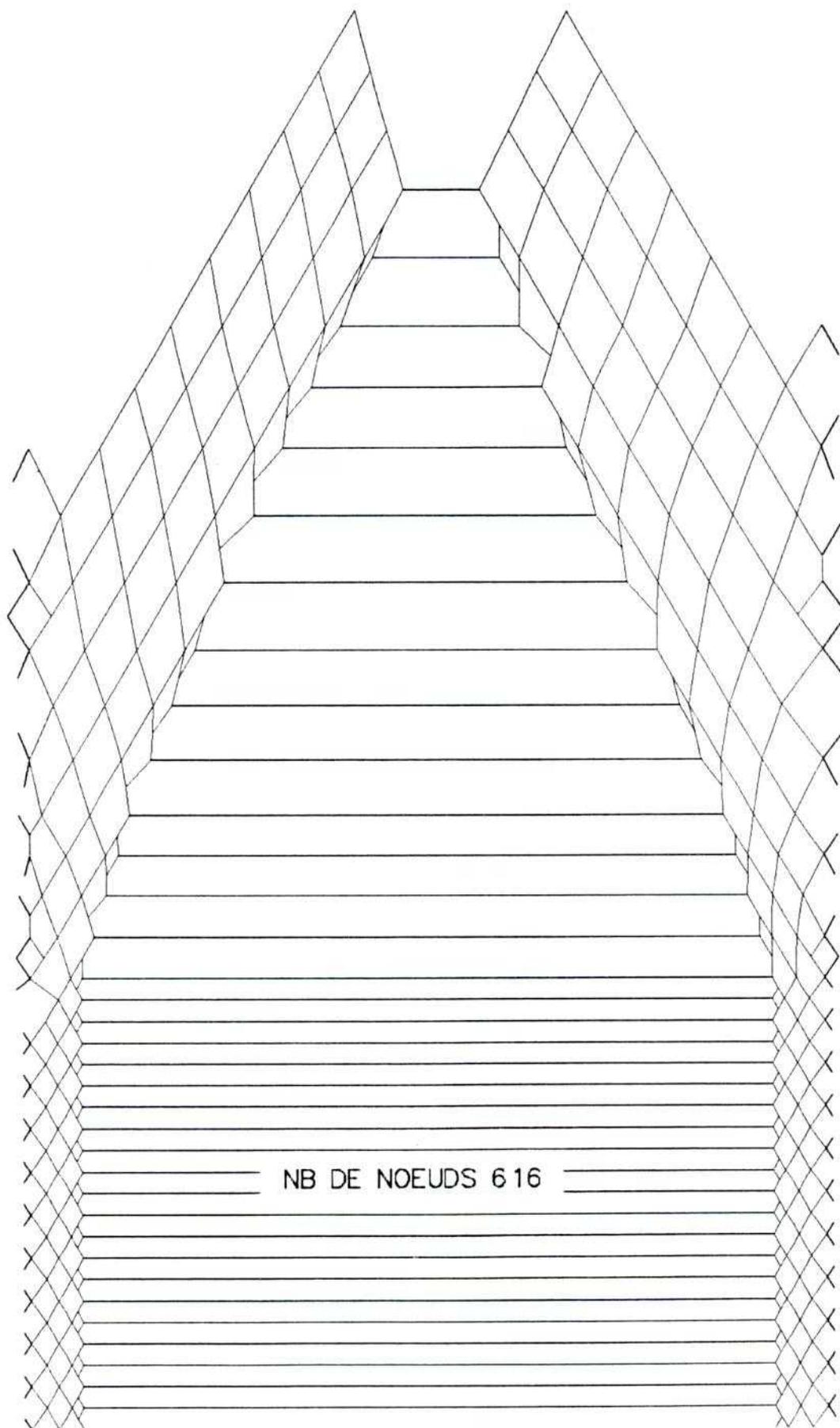


figure 66 : exemple d'un plan de chalut "globalisé"

CONCLUSION

En commençant ce travail, notre objectif était de contribuer à la réalisation d'un logiciel de conception assistée par ordinateur des chaluts.

Nous avons pu proposer une méthode originale pour résoudre ce problème particulier de couplage fluide-structure. Au départ, nous n'avions aucune garantie en ce qui concerne la convergence de la méthode proposée. Les résultats que nous avons obtenus en montrent l'efficacité bien que la convergence reste le principal problème.

Cependant ce travail n'est qu'une première étape et devra être poursuivi, car, si nous avons globalement résolu le problème qui nous était posé, nous avons également fait apparaître de nombreux points qui devront être étudiés pour affiner notre code de calcul et accroître les performances de notre logiciel.

En effet, nous avons utilisé des hypothèses relativement simples pour décrire les efforts hydrodynamiques agissant sur les mailles du chalut et, même si elles semblent justifiées, il est nécessaire de préciser les valeurs numériques des coefficients qu'elles requièrent.

Nous devons approfondir notre connaissance de tout ce qui concerne le frottement sur le fond des appareils de pêche.

Nous avons aussi considéré que l'écoulement était uniforme en tout point du chalut. Cette hypothèse simplificatrice devra être précisée, car, si elle est tout à fait justifiée pour les grandes mailles qui constituent l'entrée du chalut, elle l'est de moins en moins lorsque l'on s'intéresse à sa partie arrière et particulièrement au cul. Pourtant, les problèmes liés à la sélectivité (possibilité d'échappement des juvéniles tout en capturant les individus matures) nous demandent de calculer avec précision la forme des mailles dans cette partie arrière et l'écoulement à travers celles-ci (un courant transversal peut en effet aider les jeunes individus à fuir à travers les mailles d'autant plus que, à cet âge, leur comportement est généralement passif). Il faudra peut-être aussi tenir compte de la masse obstruante que constitue la capture.

Enfin, il est sans doute encore possible de réduire le temps de calcul. Il sera alors peut-être envisageable d'aborder cette étude sous un aspect dynamique pour pouvoir un jour simuler le comportement du chalutier et de son train de pêche, particulièrement lors des opérations de mise à l'eau du chalut, de giration du chalutier et lors des croches du chalut. Cette dernière étude pourrait constituer une contribution importante à l'amélioration de la sécurité à bord des navires de pêche.

Références bibliographiques

- [1] Belov V.A. , et autres 1987 "Engins de pêche remorqués" Editions Agropromizdat Moscou 1987
- [2] Blendermann W. , 1987, "On analysis of the hydrodynamics forces on cables and nets" Applied Ocean Research 1987, vol.9 n°4, pp 224-233
- [3] Bourget P.L. et Marichal D. , 1991, "Remark about variation in the drag coefficient of circular cylinders moving through water" Ocean Engineering vol.17, n°6, pp 569-585
- [4] Guittonneau S. , 1992, "Evolution des coefficients hydrodynamiques d'une maille de filet" rapport de recherche 3^{ème} année ECN septembre 1992
- [5] Jacquot C. , 1991, "Contribution à l'étude dynamique des systèmes sous-marins remorqués", thèse de Doctorat, Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, France.
- [6] Knudsen L. , 1991, "Flume tank tests of GOV bottom trawl", EEC contract Computer Assisted Trawl Simulation, DIFTA, November 1991
- [7] Knudsen L. , 1992, "Flume tank tests of a large mesh trawl model", EEC contract : Computer assisted trawl simulation, DIFTA, November 1992
- [8] Landweber L. and Plotter M.H. , 1947, "The shape and tension of a light flexible cable in a uniform current" Journal of Applied Mechanics, juin 1947 pp 121-126
- [9] Lu Chi , 1989, "The hydrodynamic drag and shape characteristics of two panel demersal trawls nets" thesis for the degree of doctor, University of Aberdeen, Scotland, October 1989
- [10] Marichal D. , 1979, "Contribution à l'étude statique et dynamique des câbles sous-marins" thèse de Doctorat ès Sciences Nantes juillet 1979
- [11] Marichal D. , Morel M.C. et Meillat M. , 1989 "Modélisation d'un chalut. Cas d'un filet à symétrie de révolution" ATMA avril 1989
- [12] Marichal D. et Morel M.C. , 1989 "Etude numérique des chaluts" 1989, 9eme Congrès Français de Mécanique de Metz 5-8 septembre 1989 (AUM)
- [13] Marichal D. , "Etude numérique des chaluts de pêche" ATMA session 1990 Paris

- [14] Marichal D. , 1991, "Mise au point du logiciel de calcul des formes de chaluts et vérification expérimentale" Rapport final d'étude Sirehna 89/59/RF août 1991
- [15] Marichal D. , 1992, "Etude numérique des chaluts. Globalisation du maillage" Rapport DHN 92-01 mars 1992
- [16] Marichal D. et Theret F. , 1991, "Etude de l'équilibre de surfaces réticulées dans un courant uniforme" 3eme Journées de l'hydrodynamique Grenoble février 1991, pp 405-418
- [17] Theret F. , 1990, "Etude numérique du train de pêche d'un chalutier" DEA ENSM octobre 1990
- [18] Theret F. et Marichal D. , 1992, "Determination of reticulate structure shapes and tensions placed in a uniform current" Proceedings of the international conference of Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Marine and Offshore Industries Madrid Spain October 1992 pp 799-813

ANNEXE

Caractéristiques du canal du DIFTA

TECHNICAL SPECIFICATIONS

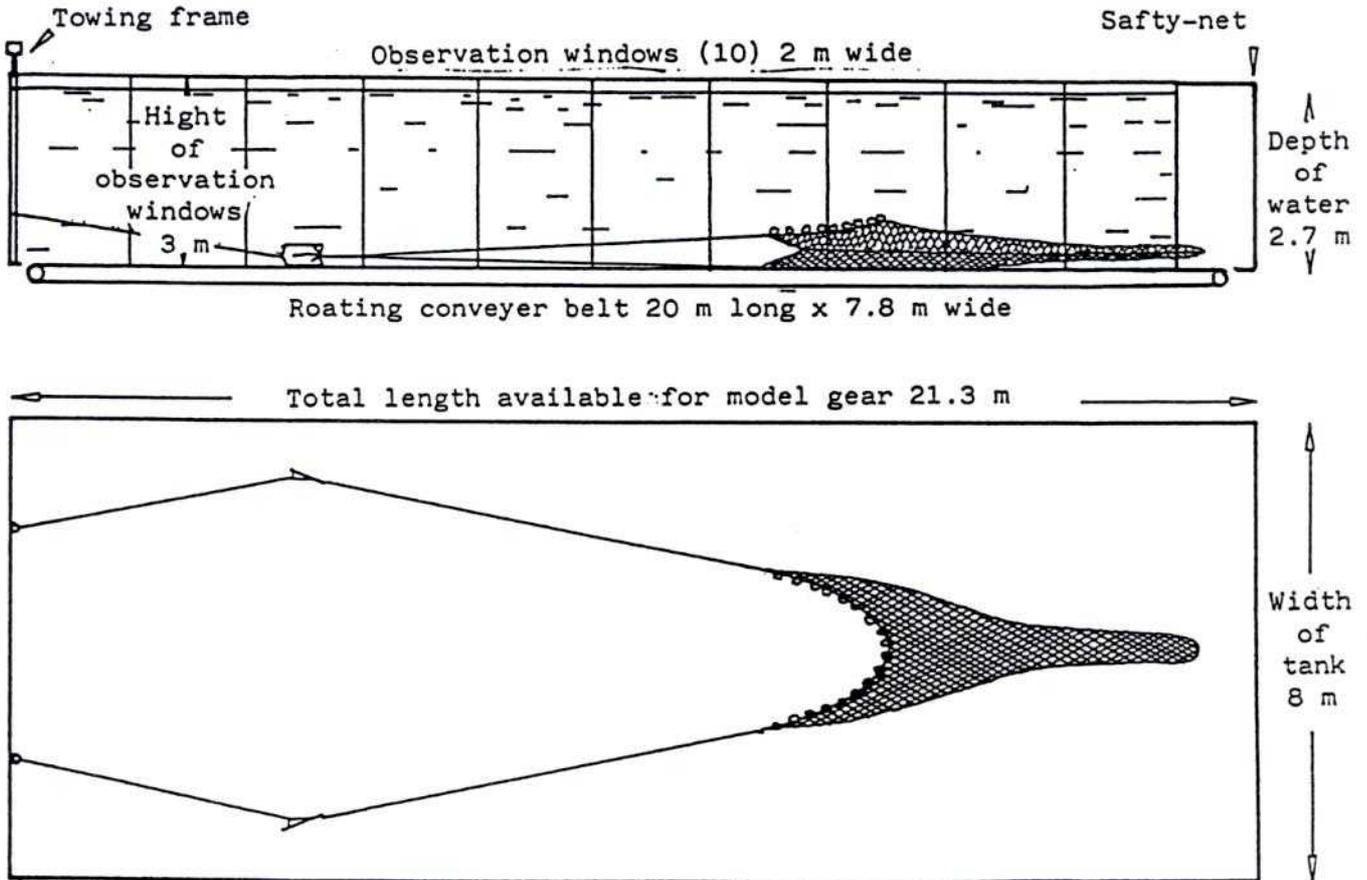
Internal Tank Dimensions:

Length 30 m
Width 8 m
Depth 6 m

Total capacity of water 1200 m³

Test Section Dimensions:

Length overall 21,3 m
Moving bottom 20 m
Width 8 m
Depth 2,7 m
Max water speed 1,3 m/s



Observation Windows:

Number 10
Height 3 m
Width 2 m
Material 100 mm acryl

Water Propulsion

4 x DC-electric motors, 64 kW fitted with thyristor controls.

Moving Bottom Propulsion

7,4 kW hydraulic motor with facility for automatic coupling of speed to water speed.

Atelier de reprographie
IFREMER - Centre de Brest
B.P. 70 - 29280 PLOUZANE
Tél. : 98. 22. 40. 40.

- NOVEMBRE 1993 -