

ETUDE DE L'EQUILIBRE DE SURFACES RETICULEES DANS UN COURANT UNIFORME

Application aux chaluts pélagiques

Dominique Marichal\* François Theret\*\*

\* Laboratoire d'Hydrodynamique Navale E.N.S.M. URA 1217  
1 rue de la Noë 44072 Nantes cedex 40 37 16 32

\*\* Ifremer  
8 rue François Toullec 56100 Lorient 97 87 73 29

Résumé

La détermination des formes et tensions d'une structure réticulée est un problème complexe. Dans l'étude que nous présentons la structure étudiée 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 de maille et la forme d'équilibre du filet.

Les difficultés de cette étude sont de deux ordres : premièrement, le comportement hydrodynamique des mailles de filet est très mal connu; les rares études que nous avons pu consulter présentent des résultats souvent divergents lorsqu'ils ne sont pas contradictoires. Deuxièmement, 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".

Summary

The determination of reticulate structure shapes and tensions is a very complex problem. The structure that we study here is a trawl. An iterative method is presented which allows the determination of the hydrodynamic forces on the meshes and the net equilibrium shape.

Two kinds of difficulties have been encountered: first, the net hydrodynamic behavior is very poorly known. The studies found in literature are scarce and show frequently scattered results and even contradictory ones. Second, a trawl is an infinitely flexible structure that has no own shape ; only the action of external forces allows it to take its final configuration. However these forces are themselves depending upon the net shape ; we thus have to solve a full "fluid-structure interaction" problem.

## 1. INTRODUCTION

L'usage de structures réticulées en milieu maritime est très fréquent; bien sûr, on pense d'abord aux filets de pêche (chaluts, filets dérivants, sennes...), mais d'autres applications nécessiteraient aussi une amélioration de la connaissance du comportement hydrodynamique de ces structures très particulières. On peut encore citer l'étude de certaines fermes aquacoles. Cependant les applications ne relèvent pas toutes de la technologie des Pêches. Nous avons déjà été contactés pour les problèmes de filets de protection d'installations militaires ou de récupération d'engins d'essais... Il est certain aussi que la diffusion de ces travaux devrait encore en élargir le champ d'application. Nous nous sommes, pour l'instant, limités à l'aspect statique du problème en n'étudiant que les formes et tensions de surfaces réticulées en équilibre dans un courant uniforme. Signalons enfin que cette étude a été suscitée par le désir d'obtenir un modèle numérique des chaluts afin d'atteindre deux buts: 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 sur 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. Nous nous sommes limités à l'étude des chaluts pélagiques pour ne pas devoir introduire les forces de frottement sur le fond; non pas pour des difficultés théoriques ou numériques mais parce que ces frottements n'ont pratiquement pas été étudiés.

Les difficultés rencontrées dans l'étude de l'équilibre de surfaces réticulées placées dans un courant sont de trois ordres:

- premièrement, le comportement hydrodynamique des mailles de filet est très mal connu. Au passage d'une maille, le fluide est-il accéléré ou bien au contraire ralenti ou encore dévié ? (problème dit de "filtration" de la maille). Quelles sont les influences des angles d'ouverture et d'incidence d'une maille sur les efforts hydrodynamiques auxquels elle est soumise ? Quelle interaction existe-t-il entre une maille et ses voisines ? Les rares études que nous avons pu consulter présentent des résultats souvent divergents lorsqu'ils ne sont pas contradictoires. Ils proviennent généralement d'essais sur des panneaux rectangulaires ou des troncs de cônes de filets rigidifiés par des enduits ou des tensions non réalistes. Il n'apparaît pas de lois de similitudes et donc de possibilités de généralisation des résultats.

- deuxièmement, un filet est une structure infiniment souple, qui n'a pas de forme propre, seule l'action de forces extérieures lui permet de prendre une certaine configuration. Mais, dans le cas de filets immergés, ces forces dépendent elles-mêmes de la forme prise par le filet; nous devons donc traiter un véritable problème de couplage fluide-structure. Lors de sa mise à l'eau, le filet passe d'une forme enroulée sur un treuil (ou d'un tas posé sur le pont) à la forme d'équilibre que nous cherchons à déterminer. Ce passage ne peut donc pas être considéré comme résultant de petites déformations autour d'une position moyenne.

- troisièmement, une surface réticulée est par définition constituée par un matériau discontinu et anisotrope (la façon d'assembler les mailles crée des directions privilégiées pour la transmission des efforts et des déformations). De plus, dans une configuration d'équilibre d'une surface réticulée, certaines mailles très tendues peuvent se fermer complètement et devenir ainsi des fils pratiquement inextensibles; d'autres peuvent être complètement détendues et "flotter" sans forme vraiment bien définie.

Des solutions très partielles et approchées de ce problème complexe ont pu être données, dans le cas des chaluts, à l'aide de séries systématiques d'essais et d'extrapolations (1). Cette démarche ne permet pas l'innovation car elle n'est applicable qu'à des filets du même type que ceux déjà essayés. La méthode que nous proposons consiste à écrire les équations d'équilibre en chacun des noeuds du chalut, puis à résoudre ce système par une méthode itérative. Cette démarche nous semble une approche originale et plus générale de la solution. Elle serait facilement adaptable à de nombreux autres problèmes.

## 2. DESCRIPTION DU FILET

De manière pratique, un filet est décrit par son plan de coupe (document semblable, en bien des points, au patron d'une couturière). Il faut donc extraire de ce plan, et rendre utilisables par un outil informatique, toutes les informations nécessaires à la prédiction des formes et tensions de la surface réticulée lorsqu'elle sera réalisée et en équilibre dans un courant fluide. Nous transformons donc ce plan en trois tableaux de données assurant chacun:

- la description de tous les noeuds (repérage de tous les fils qui sont liés en un même noeud)

Remarque 1 : il faut distinguer:

- les noeuds au sens de la mécanique générale. Ce sont en fait les points géométriques du filet auxquels nous affecterons une masse et dont nous écrirons les équations d'équilibre.

- les noeuds au sens liaison physique entre les fils. Il s'agit de la jonction des fils entre eux, elle se traduira généralement par une surépaisseur et nécessitera la prise en compte d'efforts ponctuels.

Nous serons amenés à étudier des filets 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.

Remarque 2 : pour pouvoir prendre en compte la courbure de certains côtés de maille et éviter l'apparition (numérique) de tensions négatives complètement irréalistes, nous avons divisé tous les fils en au moins deux segments rectilignes. Nous avons ainsi introduit environ trois fois plus de noeuds de calcul que de noeuds physiques.

- la description de tous les fils (longueur, diamètre, masse, coefficient de traînée...)

- la description des singularités (flotteurs, lests, diamètre des noeuds...)

Il faut compléter ces tableaux par la caractérisation des conditions aux limites (points fixes, bordures libres...)

Pour l'instant, l'écriture de ces tableaux est manuelle, donc longue et fastidieuse. Pour ce qui concerne l'application de notre méthode aux chaluts pélagiques, nous préparons une extension d'un logiciel mis au point par Ifremer, Planchalut, qui générera ces tableaux en même temps que le plan de coupe.

## 2.1. Description des noeuds

Nous nous intéressons ici au cas de filets coupés dans des pièces à mailles losanges. La méthode proposée pourrait s'appliquer aussi à des filets à mailles hexagonales ou carrées. La seule limitation imposée étant qu'il n'y ait, de manière générale, pas plus de quatre fils liés en un même noeud.

Les noeuds les plus nombreux dans un filet à mailles losanges sont d'une part ceux qui relient physiquement quatre côtés de maille et d'autre part ceux que nous avons introduits aux milieux des cotés de maille (noeuds à deux fils). Mais les coupes et les coutures peuvent faire apparaître d'autres types de noeuds. Nous avons pour l'instant répertorié 18 types différents (la liste n'est peut-être pas exhaustive). Nous ne présenterons ici que la description des noeuds de type 4 (noeud à quatre fils); les descriptions des autres types de noeuds ne sont que des généralisations.

Chaque noeud est entièrement décrit par une ligne d'un fichier appelé "tableau des liaisons".

Chaque noeud est affecté d'un numéro et d'un code qui permet de définir son type. Ce sont les deux premiers termes de la ligne.

Puis le tableau de liaisons indique le numéro des quatre noeuds voisins.

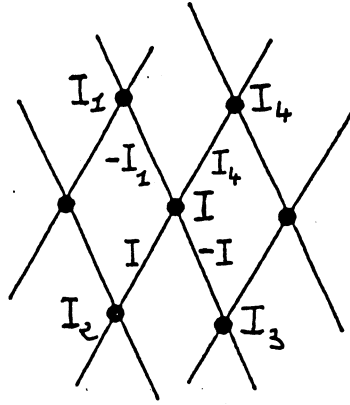


figure 1

Dans un filet ne comportant que des noeuds à 4 fils, il y a deux fois plus de côtés de maille que de noeuds. On affecte donc à chaque côté de maille un numéro qui est celui du noeud dont il est issu précédé du signe + ou -. On complète le tableau des liaisons par l'indication des quatre numéros des côtés de maille qui se rejoignent au noeud I. Remarquons que, dans le cas d'un filet à mailles losanges et de coupe assez simple, ces indications sont redondantes. Il est en effet possible dans ce cas de déduire les numéros des côtés de maille des numéros des noeuds, mais cela alourdirait encore une méthode itérative déjà coûteuse en temps de calcul. De plus, nous utiliserons ces relations pour contrôler le fichier au moment de sa lecture.

La comparaison de la figure 2 et du tableau 1 permet au lecteur de distinguer plusieurs types de noeuds et leur représentation.

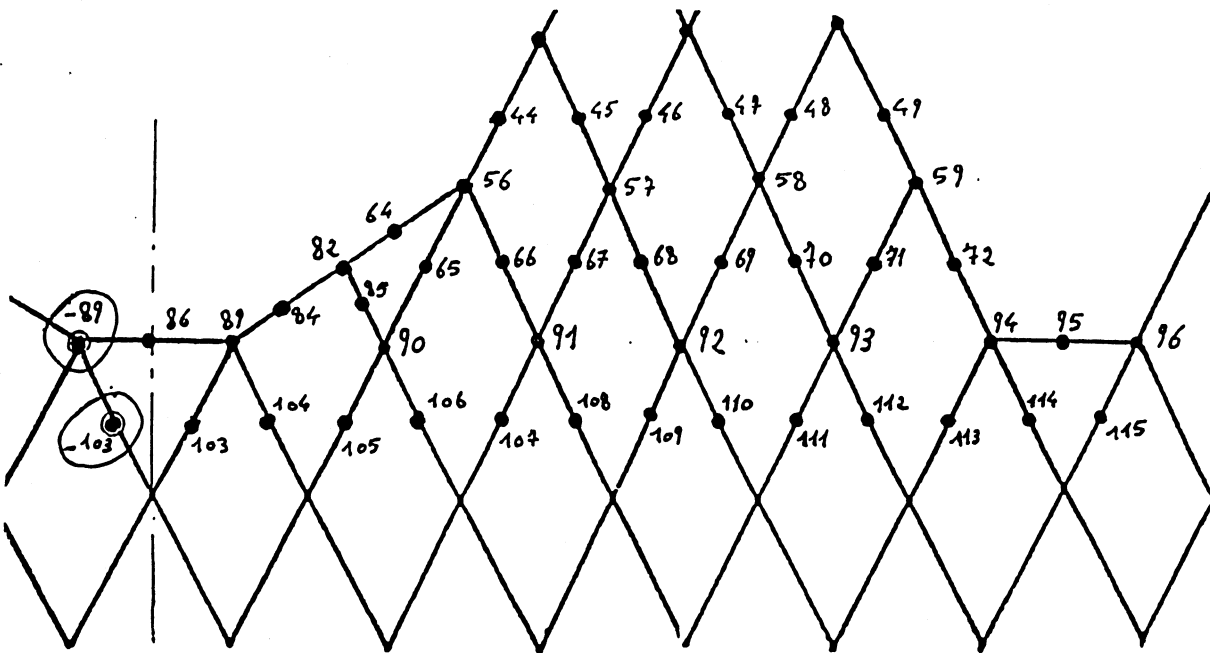


figure 2

I	Type	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$-I_1$	+ I	-I	$I_4$
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
96	14	95	115	116	73	-95	96	-96	73

tableau 1 : tableau des liaisons

Les filets présentent souvent un plan de symétrie vertical et parallèle à la vitesse de remorquage. Cela nous permet de ne décrire et calculer que la moitié du filet.

Mais, pour indiquer toutes les liaisons des noeuds situés dans le plan de symétrie, nous sommes obligés d'introduire une convention supplémentaire : les noeuds symétriques des noeuds à étudier sont affectés des numéros correspondants mais précédés du signe -.

Remarquons enfin que nous pouvons étudier simultanément le filet et son gréement. Il suffit de considérer que celui-ci forme des mailles particulières de grande dimensions. Les côtés de ces mailles seront décomposés en plusieurs segments rectilignes.

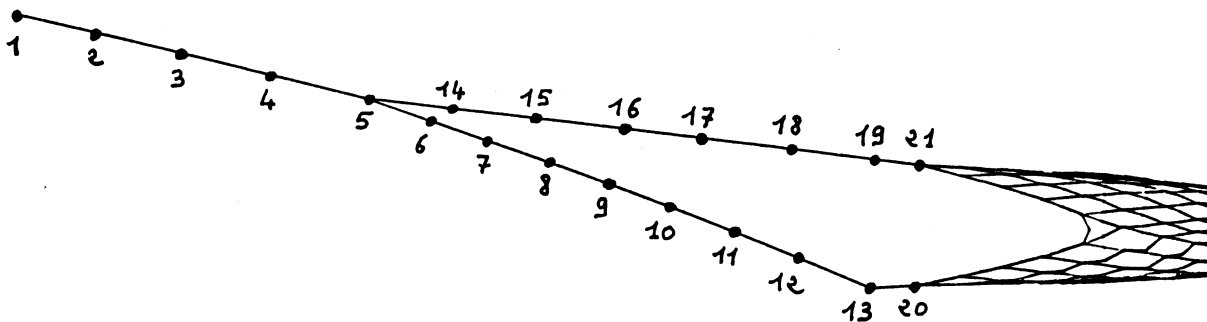


figure 3 . discrétisation du gréement

## 2.2. Description des fils

Les caractéristiques mécaniques de chacun des fils sont rassemblées dans un tableau "fichier fil". Ce fichier décrit également les composantes des efforts dus aux 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 mètres par kilogramme (il s'agit en fait de l'inverse d'une masse linéique).

I	L (I)	l (-I)	D (I)	D (-I)	M (I)	M (-I)	$S_z (I)$	$S_y (I)$	$S_x (I)$
24	83.5	0	0.3	0.3	20000	20000	0	0	0
25	0	83.5	0.3	0.3	20000	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	0.3	20000	20000	0	0	0
31	0	83.5	0.3	0.3	20000	20000	0	0	0
32	83.5	0	0.3	0.3	20000	20000	0	0	0

tableau 2 : extrait d'un fichier fil

### 2.3. Forme initiale

Le processus itératif que nous allons proposer nécessite la connaissance d'une forme initiale arbitraire à peu près plausible et compatible avec les différentes liaisons mécaniques.

Pour la déterminer nous utilisons actuellement une méthode entièrement empirique. Il nous faut encore trouver des critères plus rigoureux pour permettre une initialisation automatique.

L'écriture de ces fichiers est actuellement manuelle donc longue et fastidieuse. La seconde amélioration à apporter est donc la conception d'un mailleur automatique qui génère ces tableaux.

## 3. HYPOTHESES

### 3.1. Le champ de vitesse interne

Lorsque le filet est remorqué en eau calme, le champ des vitesses relatives est uniforme loin du chalut. Mais, a priori, le passage de l'eau à travers les mailles perturbe cet écoulement. L'analyse bibliographique ne nous a pas fourni de renseignements précis sur le champ de vitesse qui s'établit alors à l'intérieur du chalut. Pour certains, l'écoulement de l'eau serait accéléré, le chalut se comportant comme une sorte d'entonnoir poreux. Pour d'autres, les mailles "bloqueraient" l'écoulement, au moins en partie, provoquant ainsi des contournements du filet par le fluide avec

éventuellement formation de courants de retour locaux (refoulement). D'autre part, les premières mesures que nous avons effectuées n'ont pas mis en évidence des modifications sensibles des vitesses pour les types de filets que nous étudions actuellement. Dans ces conditions, nous avons admis que la présence du filet ne perturbait en aucune façon l'écoulement relatif et donc que le filet était placé dans un écoulement uniforme en tout point.

L'usage de l'anémométrie laser permettra peut-être de préciser ce point.

### 3.2. Les efforts extérieurs

Les forces extérieures agissant sur un filet sont de quatre natures différentes :

a) Les efforts hydrodynamiques s'exerçant sur les côtés de mailles.

En ce qui concerne leur expression, nous avons établi (3), à partir des résultats antérieurs, ceux de BLENDERMANN par exemple (2), et de mesures réalisées au bassin d'essais des chaluts de Lorient, qu'un filet pouvait se calculer comme étant la juxtaposition de  $N$  fils "hydrodynamiquement indépendants". Nous calculons donc les efforts hydrodynamiques qui agissent sur chaque côté de maille comme si celui-ci était isolé dans un courant uniforme. On applique alors les hypothèses de LANDWEBER : la force hydrodynamique peut se décomposer, d'une part, en une trainée de pression normale au fil et proportionnelle au carré de la composante normale de la vitesse, et d'autre part, en un effort de frottement tangentiel proportionnel au carré de la vitesse du courant à l'infini amont.

$$(1) \quad T = \frac{1}{2} \rho C_d l d V_n^2$$

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

où  $C_d$  et  $f$  sont respectivement le coefficient de trainée et de frottement de l'élément de fil considéré.  $V_0$  est la vitesse de remorquage du fluide,  $V_n$  sa composante normale à l'élément.

Les valeurs des coefficients  $C_d$  et  $f$  ont été déterminées par identification en appliquant notre méthode de calcul aux cas de filets constitués par une nappe rectangulaire (à plat) et appuyée sur un contour d'entrée rigide et circulaire. Nous avons recherché les valeurs de ces coefficients qui conduisaient à une bonne restitution des formes et des tensions mesurées (figures 4 et 5).



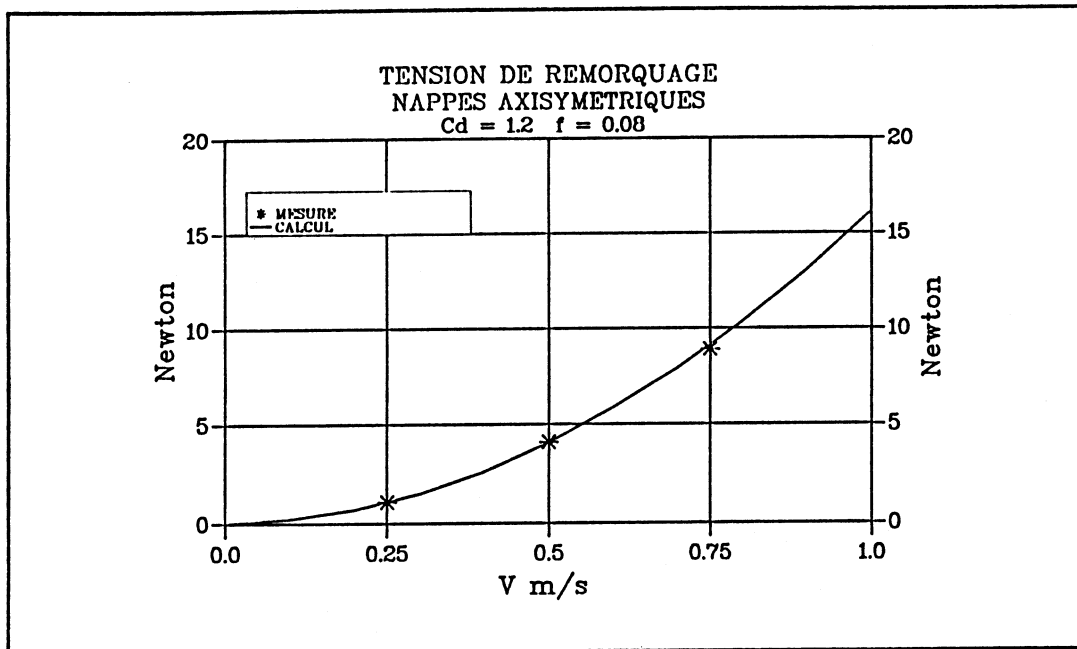
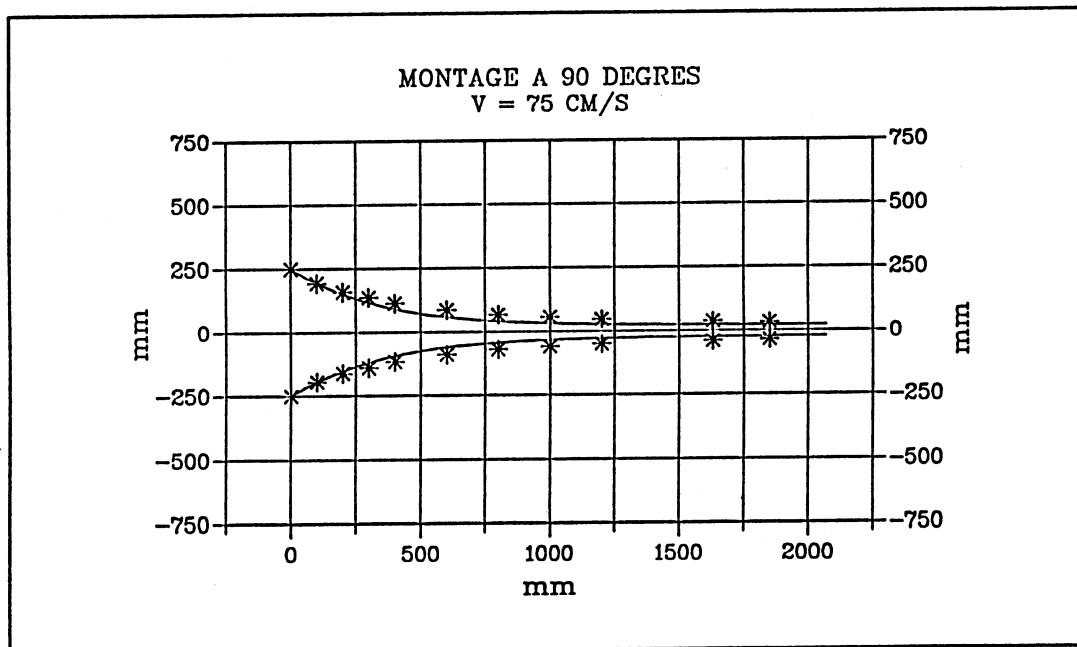


figure 4 : tension de remorquage

figure 5 : étude de la méridienne  
-filet appuyé sur un contour circulaire (mailles ouvertes à  $90^\circ$ )-

Nous avons obtenu les valeurs  $C_d = 1,2$  et  $f = 0,08$ . La valeur du coefficient de trainée correspond à la valeur usuelle du coefficient de trainée d'un cylindre circulaire au même nombre de Reynolds. Le coefficient de frottement est approximativement 10 fois plus élevé. Cela est sans doute dû à la présence des jonctions des fils (bien que les filets utilisés soient de type "sans noeud").

b) Les efforts de pesanteur

### c) Les singularités

Une singularité introduit, au noeud où elle est placée, des efforts qui sont décrits en exprimant leurs trois composantes; ainsi, un flotteur sphérique exercera sur son point d'attache une force dont la composante est égale à son poids apparent; la composante parallèle à la vitesse est sa trainée hydrodynamique; et la troisième composante est nulle par raison de symétrie.

### d) Les efforts de liaisons

Il s'agit, le plus souvent, des efforts exercés par les systèmes d'ancrage ou de remorquage du filet. Ce sont en général des inconnues du problème. Dans le cas du chalut, il s'agit de la tension des funes, grandeur dont la détermination est primordiale puisqu'elle permettra le calcul de la puissance de remorquage et le dimensionnement du train de pêche.

## 4. LES EQUATIONS

Suivant le type du noeud considéré (2, 3 ou 4 fils), les équations sont différentes. Nous ne présentons, ici, que le cas le plus général : l'équilibre du noeud à quatre fils.

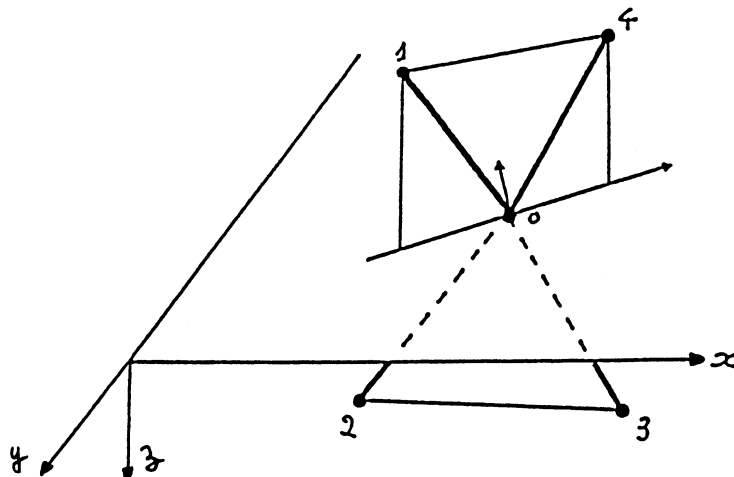


figure 6 : équilibre d'un noeud à quatre fils

Les forces extérieures agissant sur chaque côté de maille sont également réparties aux deux extrémités de ces côtés. 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 s'écrivent donc en projection sur les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  :

$$(3) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{x_i - x_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \frac{H_{x_i}}{e} + S_{x_0} = 0$$

$$(4) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{y_i - y_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left( \frac{H_{y_i} + P_i}{e} \right) + S_{y_0} = 0$$

$$(5) \quad \sum_{i=1}^4 T_i \frac{z_i - z_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \frac{H_{z_i}}{e} + S_{z_0} = 0$$

On complète ce système d'équations par les relations exprimant la longueur des deux fils "supérieurs" du noeud considéré.

$$(6) \quad (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = l_1^2$$

$$(7) \quad (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = l_4^2$$

L'usage de ces équations de longueur conduit, en fin de résolution, à une indétermination de signe dans le calcul des valeurs  $z_i$ . Nous avons admis que nos filets ne pouvaient pas présenter de rebroussement et donc toujours choisi la solution conduisant au filet le plus étiré.

## 5. RESOLUTION

Pour un filet à mailles losanges, le nombre de côtés de maille est de l'ordre de deux fois le nombre de noeuds physiques (N); comme nous avons divisé chaque côté de maille en deux segments nous avons introduit, en plus, 2N noeuds intermédiaires et doublé le nombre de fils. L'étude de l'équilibre de la surface réticulée se ramène donc à la détermination des :

- 3 fois 3N coordonnées de chaque noeud (physique et intermédiaire)

- 4N tensions des fils

Soit environ 13 N inconnues. Compte tenu du nombre élevé de noeuds constituant le filet, même pour réaliser une maquette de chalut, ce nombre total d'inconnues peut rapidement devenir rédhibitoire. C'est pourquoi la prochaine étape de ce travail sera d'étudier une méthode de globalisation du maillage afin de ne plus être astreint à prendre en compte tous les noeuds. Les résultats actuels doivent d'abord permettre de vérifier la validité des hypothèses concernant l'aspect hydrodynamique du problème, puis servir de référence pour tester les résultats d'une méthode plus globale. L'étude est faite en écrivant les trois équations d'équilibre des 3N noeuds et les relations de conservation de longueur des 4N fils. Ces équations sont non linéaires pour trois raisons :

- les efforts hydrodynamiques s'expriment à partir des coordonnées des noeuds à l'aide de relations trigonométriques complexes.

- dans les équations d'équilibre, les tensions des fils interviennent en facteur des coordonnées des noeuds.

- les conditions de longueur sont par essence non-linéaires.

Pour résoudre ce système d'équations nous proposons une méthode itérative. A partir d'une forme arbitraire (initialisation compatible avec les liaisons) ou de la forme calculée à l'itération précédente on détermine les valeurs des efforts hydrodynamiques agissant sur les côtés de maille. Puis on utilise les équations d'équilibre pour calculer les tensions de ces côtés et certaines coordonnées des noeuds. Enfin, on obtient les coordonnées manquantes à l'aide des conditions de longueur. Le critère de convergence porte sur la stabilité de la forme calculée.

## 6. EXEMPLES ET CONCLUSION

Les figures qui suivent présentent des exemples de résultats. Il s'agit de l'étude d'une maquette de train de pêche pélagique. Le gréement est calculé comme s'il s'agissait de mailles particulières; les funes et les bras ont seulement été divisés en une dizaine d'éléments chacun. Les résultats sont en bonne concordance avec les observations faites au bassin d'essais des chaluts de Lorient.

Bien sûr, il reste encore beaucoup de travail à faire avant de disposer d'un outil vraiment efficace. Mais les résultats actuels montrent la validité de notre démarche pour résoudre un problème original de couplage fluide structure.

## REFERENCES

- (1) V.A. BELOV et autres Engins de pêche remorqués  
Editions Agropromizdat Moscou 1987
- (2) W. BLENDERMANN On analysis of the hydrodynamics forces on cables and nets  
Applied Ocean Research 1987 , vol.9 n°4
- (3) D.MARICHAL, M.C. MOREL Etude numérique des chaluts  
9ème Congrès Français de Mécanique Metz septembre 1989
- (4) D. MARICHAL Etude numérique des chaluts de pêche  
ATMA session 1990 Paris

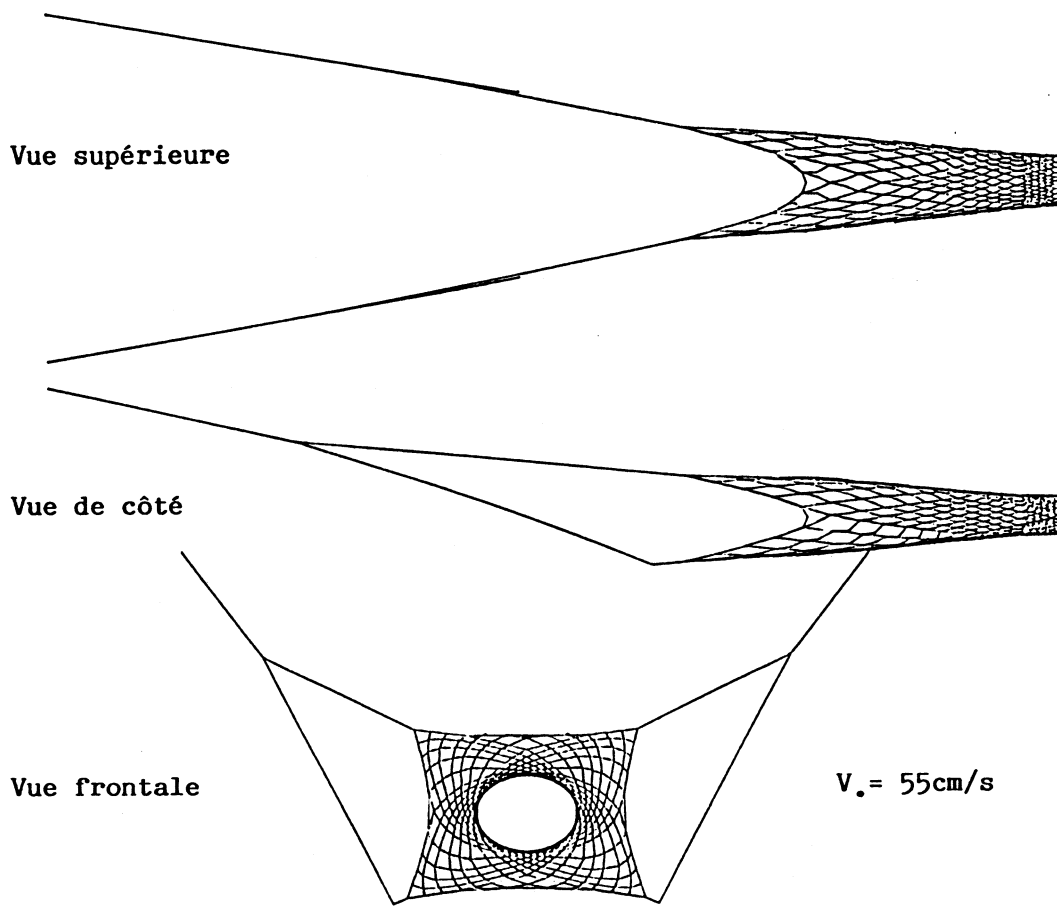


Figure 7. Chalut "bien réglé"

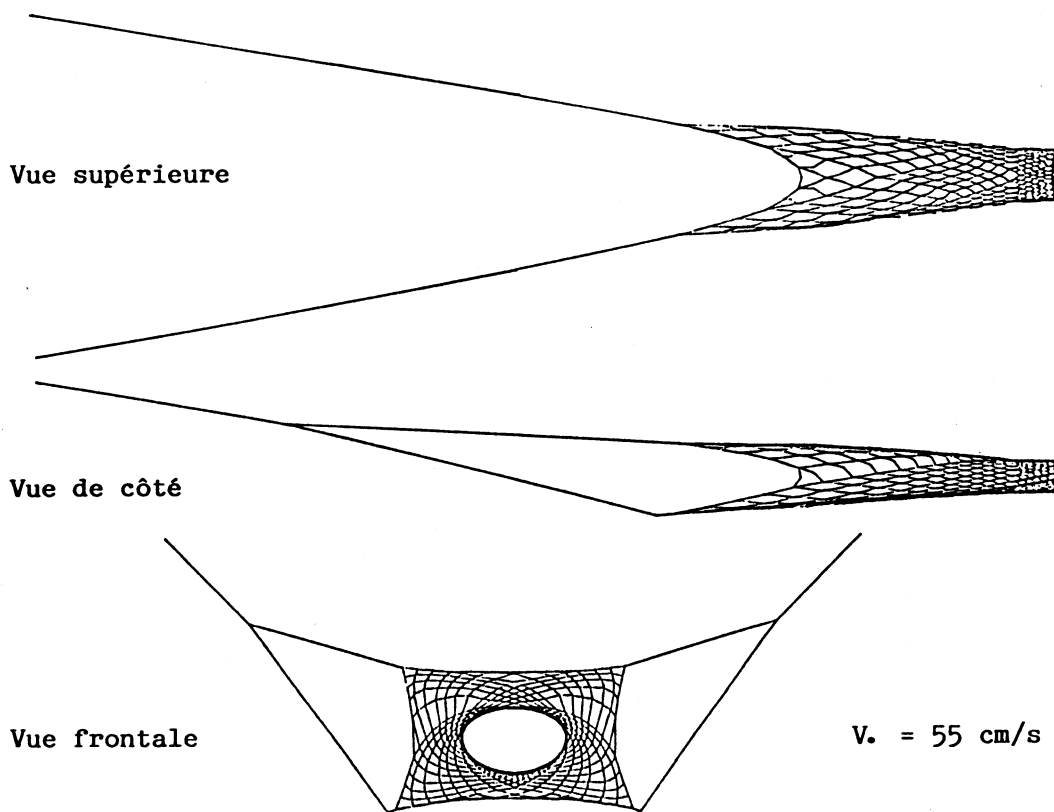
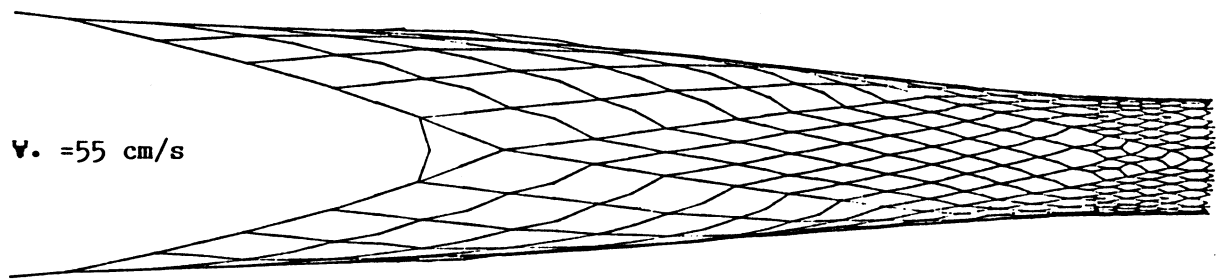
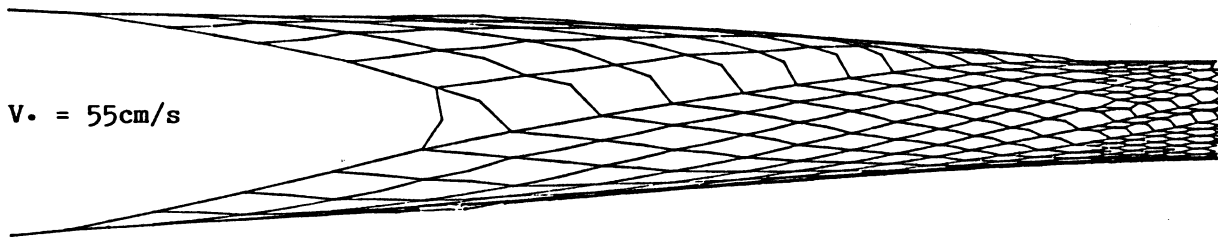


Figure 8. Chalut "mal réglé" (câble inférieur trop court)



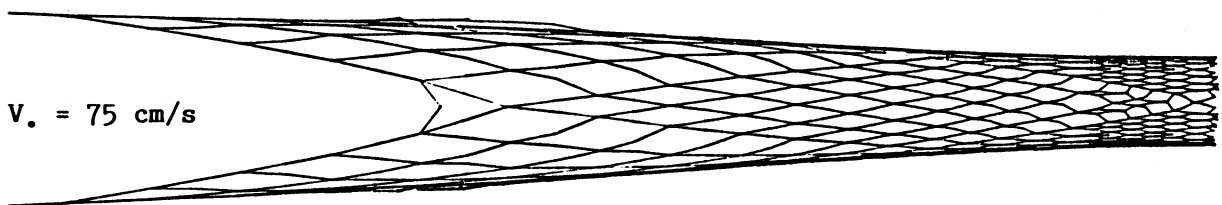
$V. = 55 \text{ cm/s}$

Figure 9. Vue de côté du chalut



$V. = 55 \text{ cm/s}$

Figure 10. Vue de côté dans le cas où le câble situé en avant de l'aile inférieure du chalut est trop court.



$V. = 75 \text{ cm/s}$

Figure 11. Vue de côté du chalut.