

7<sup>e</sup> JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

MARSEILLE - 8, 9, 10 MARS 1999

**Modélisation des structures souples  
réticulées et immergées  
- Contribution à l'étude des cages piscicoles et à la  
sélectivité des chaluts -**

**F. LE BRIS, Ch. JACQUOT, D. MARICHAL**

L.M.F - Division Hydrodynamique Navale

École Centrale de Nantes

1, Rue de la Noë - BP 92101 -

44321 Nantes Cedex 3

E-Mail : [Fabien.Lebris@ec-nantes.fr](mailto:Fabien.Lebris@ec-nantes.fr)

**Résumé**

Notre objectif est de modéliser le comportement dynamique des filets souples immergés dans un courant relatif quelconque. De part la nature discontinue et souple des alèses et de la complexité des écoulements à travers les mailles, cette étude relève à la fois de la mécanique des structures et de la mécanique des fluides. Nous proposons une méthode numérique de résolution de ce problème complexe de **couplage fluide-structure**. Nous avons appliqué cette méthode pour étudier des structures en filet souple dans les domaines de la pêche en mer et de l'aquaculture. Les comparaisons de formes obtenues numériquement et expérimentalement sur des maquettes de filets permettent d'apprécier les résultats.

**Abstract**

Our aim is to model the dynamic behaviour of submerged flexible nets in any relative current. Due to both the discontinuous and highly flexible nature of the nets and the complexity of the flow through the mesh, this study involves both structure mechanics and fluid mechanics. We propose a numerical method to resolve this complex **fluid-structure coupling** problem. We applied this method to study net structures in the fishery and aquaculture domains. The observation of the deflections of the model nets allows a comparison with the shapes determined from calculation.

## 1 Introduction

En raison de l'accroissement démographique, la consommation de produits de la mer est, aujourd'hui encore, appelé à augmenter. En effet, entre 1950 et 1990 le total des prises de pêche (en mer et en eau douce) a été multiplié par cinq tandis que la flotte mondiale de pêche atteignait les 3,5 millions de bateaux immatriculés (six fois plus qu'il y a 20 ans). Autrement dit, jamais la mer et les fleuves n'ont été autant labourés pour d'aussi faibles prises, ce qui explique d'innombrables conflits sur les bancs de pêche. Les ressources halieutiques ne sont pas pour autant inépuisables, même si elles sont renouvelables relativement rapidement. Il est donc du plus grand intérêt d'en gérer l'exploitation. Les enjeux économiques, étroitement liés à la gestion de l'environnement, justifient à nos yeux les recherches entreprises depuis une dizaine d'années en collaboration avec l'IFREMER<sup>1</sup> sur la modélisation et le comportement des filets souples immergés.

Or les filets sont des structures à la fois discontinues, anisotropes et très souples. La perméabilité des mailles du filet permet un passage plus ou moins important de l'eau à travers les alèses. Cependant, l'obstacle que constitue la structure immergée peut aussi imposer au fluide de la contourner. La souplesse de la structure fait qu'elle change de forme sous l'action des efforts extérieurs (courant, houle, lests, flotteurs, ...). Nous avons donc à résoudre un problème complexe de **couplage fluide-structure**.

## 2 Objectifs

Nous proposons une méthode numérique de détermination des formes et des tensions d'une structure réticulée souple, immergée dans un courant relatif quelconque. Après avoir décrit la théorie, nous discutons le modèle de Landweber-Richtmeyer utilisé pour déterminer les efforts hydrodynamiques agissant sur les mailles du filet. Des mesures d'efforts hydrodynamiques sur des panneaux de filets tendus en travers d'un courant permettent de vérifier l'adéquation de ce modèle et d'en identifier les coefficients.

Afin de contribuer à résoudre un certain nombre de problèmes liés aux difficultés de la pêche ou à la surexploitation des ressources naturelles, nous proposons deux exemples d'applications. Quelques visualisations de déformées de maquettes de filets en canal à circulation d'eau permettent d'apprécier les formes obtenues par le calcul.

## 3 Modélisation numérique des structures réticulées souples immergées

### 3.1 Décomposition en éléments rigides

La structure est modélisée à l'aide d'un assemblage de barreaux cylindriques circulaires articulés autour de rotules supposées parfaites (Théret, 1993). Chaque côté de maille est décomposé en deux barreaux rigides articulés autour d'une rotule intermédiaire afin de prendre en compte la souplesse du fil (figure 1). Nous supposons ainsi que les forces de liaison internes se réduisent à une composante de traction  $T$  uniforme dans chaque barre. Afin de réduire à des proportions raisonnables le nombre d'inconnues du problème, une méthode de "globalisation" a été mise au point. Celle-ci consiste à modéliser un nombre donné de mailles avec une maille fictive équivalente du point de vue mécanique et hydrodynamique (même masse, poids apparent et même surface de traînée).

<sup>1</sup>Institut Français de Recherche pour l'Exploitation des MERs

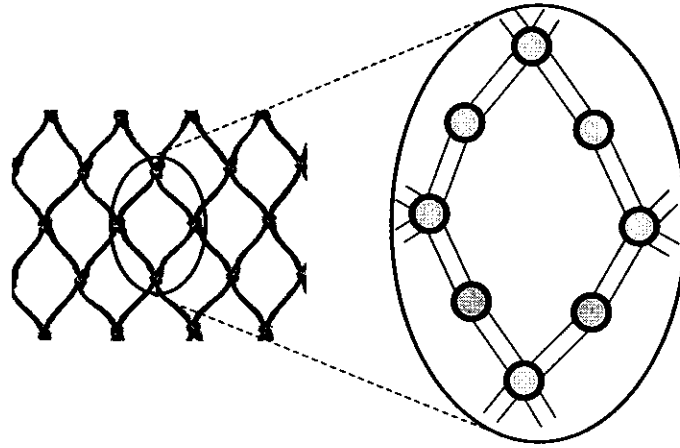


FIG. 1: Décomposition en éléments rigides

### 3.2 Mise en équation et résolution

Les inconnues du problème sont les coordonnées  $\overline{OM}_i$  des noeuds "i" et les forces de tensions  $T_{ij}$  dans les barres "ij" à chaque instant.

On choisit de répartir également la masse des éléments rigides à leurs extrémités. On répartit également aux extrémités les efforts qui s'exercent sur ceux-ci. Le théorème de la résultante dynamique écrit en chaque noeud de la structure s'écrit:

$$\left( m_i + \sum_{k=n_1(i)}^{n_2(i)} \frac{1}{2} m_{ik} \right) \vec{\Gamma}_i = \sum_{k=n_1(i)}^{n_2(i)} \left( T_{ik} \frac{\overline{M_i M_k}}{l_{ik}} + \frac{1}{2} \vec{F}_{ik} \right) + \vec{S}_i \quad (1)$$

$m_i$  : masse de la singularité affectée au noeud  $i$  (lest, flotteur, ...)

$m_{ik}$  : masse affectée au fil "ik"

$k$  : noeud  $k$  entourant le noeud  $i$

$T_{ik}$  : force de tension dans l'élément rigide "ik"

$l_{ik}$  : longueur de l'élément rigide "ik"

$\vec{F}_{ik}$  : ensemble des efforts extérieurs à l'élément rigide "ik" comprenant les efforts de pesanteur et hydrodynamiques.

$\vec{S}_i$  : ensemble des efforts extérieurs au noeud  $i$ .

Les déplacements des noeuds doivent être compatibles avec l'hypothèse d'inextensibilité des fils.

Soit pour chacun des  $m$  fils "ij",

$$\left\| \overline{M_i M_j} \right\|^2 = l_{ij}^2 \quad (2)$$

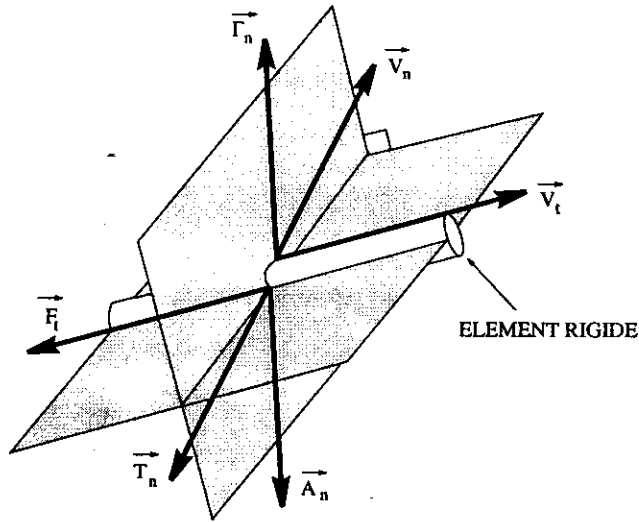
Le système d'équations (1) et (2) forme un système différentiel algébrique fermé à  $3n+m$  inconnues ( $3n$  coordonnées des noeuds et  $m$  forces de tension). Celui-ci est résolu avec une méthode d'Euler demi-explicite.

## 4 Efforts hydrodynamiques sur les filets souples

### 4.1 modèle de calcul

Nous décomposons les efforts hydrodynamiques agissant sur un élément rigide cylindrique en un effort de traînée normale  $\vec{T}_n$ , un effort de frottement tangentiel  $\vec{F}_t$  et une force d'inertie ajoutée

$\vec{A}_n$  (figure 2). Les efforts hydrodynamiques sur les nœuds du filet présentant une surépaisseur ne sont pas inclus. Nous écrivons  $\vec{T}_n$  et  $\vec{F}_t$  en utilisant le modèle de Landweber-Richtmeyer.



$$\vec{A}_n = -\rho \frac{\pi D^2}{4} \ell C_m \vec{\Gamma}_n \quad (3)$$

$$\vec{T}_n = -\frac{1}{2} \rho (\ell \cdot D) C_d \|\vec{V}_n\| \vec{V}_n \quad (4)$$

$$\vec{F}_t = -f \cdot \frac{1}{2} \rho (\ell \cdot D) C_d \|\vec{V}_t\| \vec{V}_t \quad (5)$$

Les coefficients de traînée  $C_d$  et de frottement  $f$  seront supposés constants. Le coefficient de masse ajoutée est pris égal à 1. Cette valeur de  $C_m$  est directement déduite des calculs de masse ajoutée des cylindres circulaires dans le cas des écoulements potentiels.

FIG. 2: Projections des vitesses et accélérations des écoulements autour et à travers les nappes de filet.

- nous supposons les interactions entre les fils négligeables. Les efforts hydrodynamiques sont calculés sur chaque côté de maille comme s'il était isolé;
- nous considérons que la structure perturbe peu l'écoulement.

La validité de ces hypothèses est conditionnée par de nombreux paramètres de l'alèse : type du filet, longueur du côté de maille, diamètre du fil, ouverture de maille.

## 4.2 Identification des coefficients

Afin d'apporter les premiers éléments de validation du modèle de Landweber-Richtmeyer et identifier les valeurs des coefficients, nous avons mesuré les forces de portance et de traînée d'un panneau de filet tendu en travers d'un courant (figure 3).

La nappe de filet est tendue sur un cadre rigide rectangulaire présentant une surface de travail de  $1m^2$ . Le cadre est fabriqué par assemblage de barreaux cylindriques circulaires. Des gorges sont usinées à intervalles réguliers afin d'y attacher les nœuds du filet et assurer une ouverture de maille constante sur tout le panneau. Les paramètres régissant le filet et son montage sur le cadre sont l'ouverture de maille  $\beta$  et le quotient de *solidité*  $S$ , défini comme le rapport de la surface de fil sur la surface de travail.

Pour un filet à mailles losange ,

$$S = \frac{2D}{\ell \sin \beta} \quad (6)$$

Le dispositif cadre et filet est fixé sur une balance à six composantes (capteurs de 15 à 50 daN). Le cadre est orientable par rapport au courant de 0 à 360 degrés par pas de 15 degrés. Les efforts sur le filet sont déduits par différence entre les efforts sur le filet tendu sur le cadre et les efforts mesurés préalablement sur le cadre seul. On néglige ainsi les interactions hydrodynamiques entre le cadre et le filet.

En composant les efforts de traînée et de frottement (4) et (5) sur chacun des fils constituant une maille losange (figure 3), nous reconstituons par projection des efforts, les coefficients  $C_L$

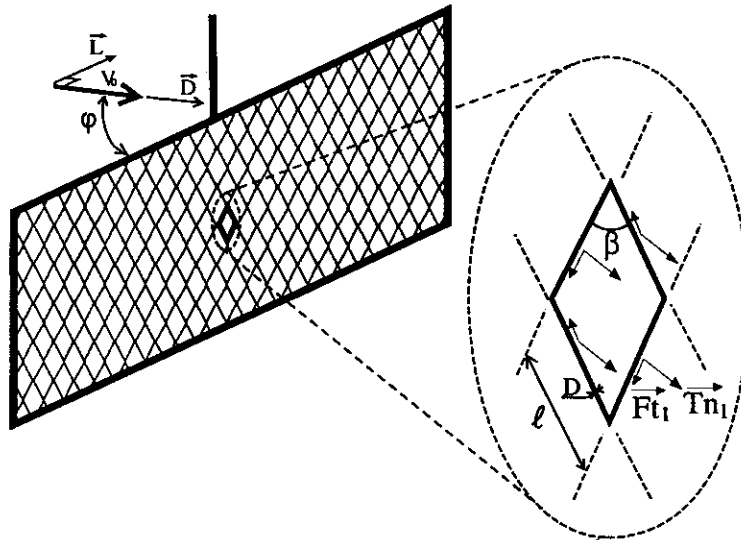


FIG. 3: Projection des efforts de traînée et de frottement sur un filet à mailles losanges

de portance et  $C_D$  de traînée d'un panneau de filet tendu orienté d'un angle  $\varphi$  par rapport au courant.

$$C_L(\varphi, \beta, C_d, f) = \frac{\sum_{i=1}^4 (\vec{T}n_i + \vec{F}t_i) \cdot \vec{L}}{\frac{1}{2}\rho (4\ell D) V_0^2} \quad C_D(\varphi, \beta, C_d, f) = \frac{\sum_{i=1}^4 (\vec{T}n_i + \vec{F}t_i) \cdot \vec{D}}{\frac{1}{2}\rho (4\ell D) V_0^2} \quad (7)$$

La figure 4 montre quelques relevés expérimentaux des coefficients de traînée et de portance d'un panneau de filet tendu sur un cadre rigide en fonction de l'angle d'incidence  $\varphi$ .

La reconstitution des résultats expérimentaux avec les formules (7) donne les meilleurs résultats au sens des moindres carrés pour les valeurs de  $C_d$  et  $f$  respectivement égales à 1,36 et 0,07. La valeur de  $C_d$  est en accord avec celles généralement constatées sur les filets à faible quotient de solidité (figure 5) où les interactions hydrodynamiques entre les côtés de maille peuvent être négligées. Il est intéressant de comparer cette valeur avec la valeur 1,2 du coefficient de traînée d'un cylindre circulaire infini dans un courant uniforme aux mêmes nombres de Reynolds.

Pour les faibles incidences, le modèle ne tient pas compte du fait qu'un fil peut être situé dans le sillage d'autres fils. Cet effet de "masque" se traduit par une surestimation des efforts de traînée.

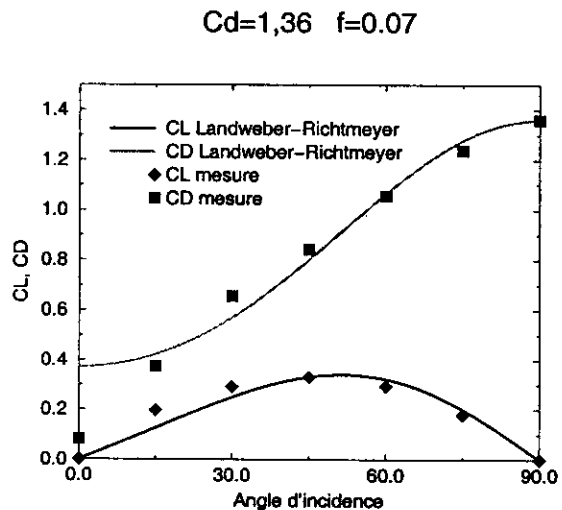


FIG. 4: relevés expérimentaux CL et CD

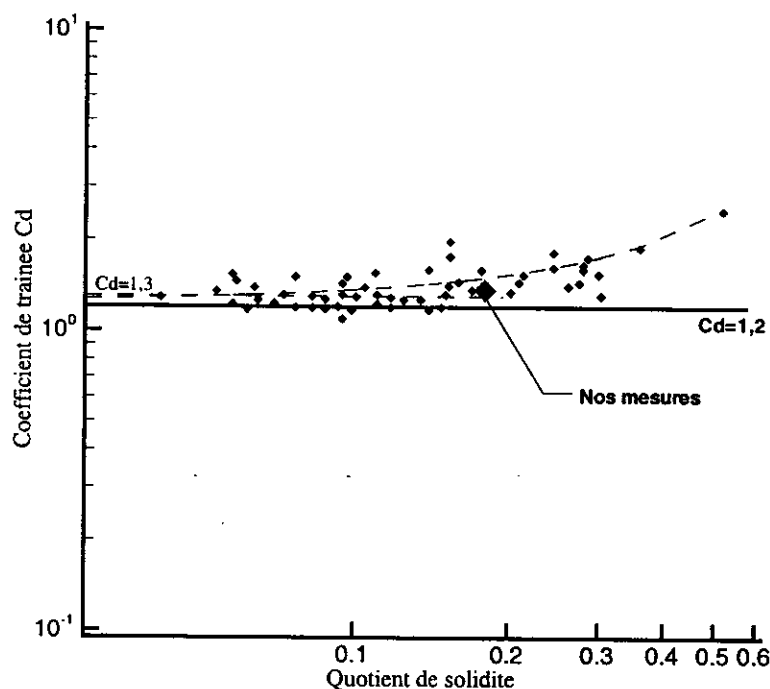


FIG. 5:  $C_d$  du côté de maille en fonction du quotient de solidité (d'après Carrothers and Baines, 1975)

## 5 Contribution à l'amélioration de la sélectivité des chaluts

Les études qui ont été faites jusqu'à présent ( voir Bessonneau, 1997 et Bessonneau et al., 1998 ) concernaient principalement la modélisation et le comportement des **chaluts** en conditions d'utilisation.

L'algorithme a été appliqué à un certain nombre de manœuvres de train de pêche (figure 6). Ces études étaient motivées par le souci de diminuer les coûts d'exploitation et d'améliorer la sécurité en pêche. Les premières modélisations n'intégraient pas la présence d'une capture dans le cul du chalut.

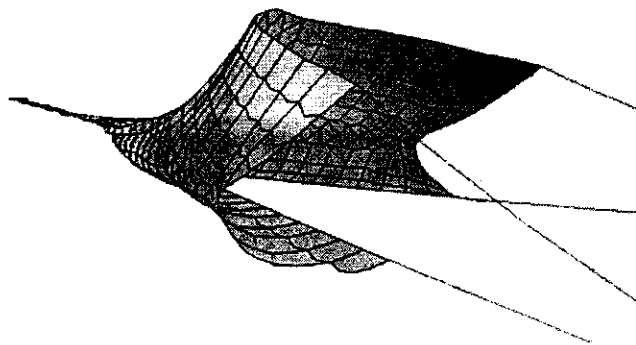


FIG. 6: croche de chalut

Le problème ne peut être résolu que si la forme du cul de chalut, pour une masse de capture

Le souci de préserver la ressource en évitant de capturer les juvéniles (sélectivité) nécessite de pouvoir déterminer, en configuration réelle de pêche, la forme prise par le cul de chalut si on suppose connue la masse de poissons capturés (figure 7). Dans ce premier exemple d'application proposée, nous déterminons numériquement la géométrie des mailles en amont de la poche et les tensions dans leurs fils, grandeurs qui conditionnent les possibilités d'échappement des poissons capturés (O'Neill F.G., 1997).

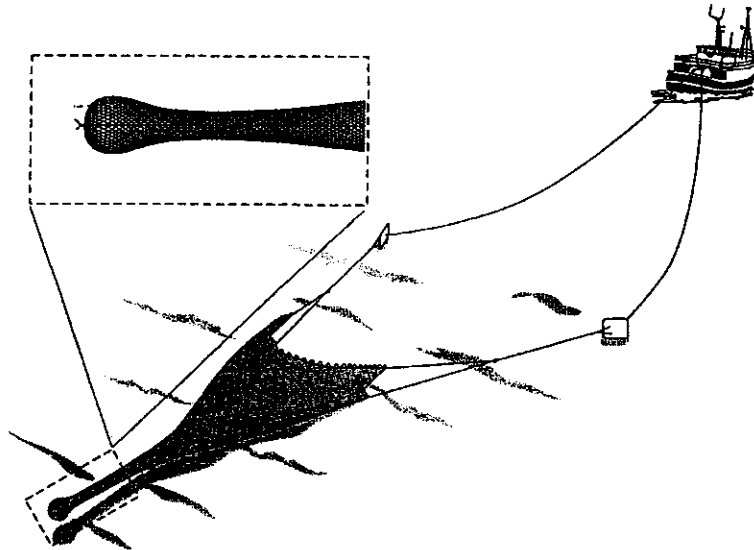


FIG. 7: Etude de la géométrie du cul de chalut

donnée, est connue. Mais les modélisations expérimentales ou les visualisations sur un chalut en pêche ne nous permettent pas de connaître avec précision la distribution des poissons dans la poche.

L'étude théorique et numérique présentée se double d'essais menés parallèlement par le DIFTA<sup>2</sup> en canal de circulation sur une maquette d'un chalut à l'échelle 1/2. Ces essais nous donnent la forme du cul de chalut ainsi que la surface de filet en contact avec la capture pour une masse donnée de "poissons" simulés par des pochons remplis d'eau.

Nous nous sommes placés dans l'hypothèse d'un écoulement relatif stationnaire, colinéaire à l'axe du chalut, correspondant aux conditions expérimentales. La vitesse de l'écoulement a été fixée à 1m/s et nous nous sommes intéressés à la configuration d'équilibre obtenue pour différents volumes de capture.

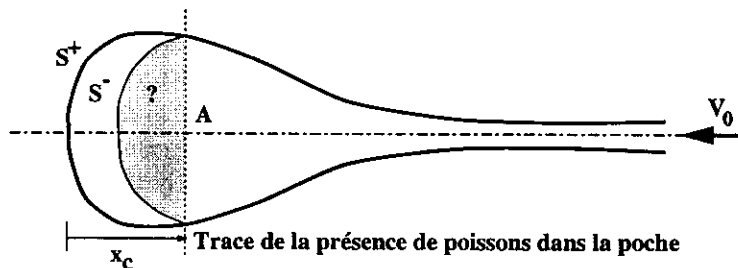


FIG. 8: Modélisation de la capture

Les résultats d'essais du DIFTA nous indiquent deux valeurs qui peuvent nous servir à paramétrer notre étude (figure 8):

- la masse de poissons capturés. Nous pouvons admettre que la masse volumique de la capture est très proche de celle de l'eau et que la capture est à peu près inerte. Nous représentons donc cette capture par un volume d'eau au repos.
- La position du plan vertical en amont duquel le filet est vide. Ce plan et la capture limitent un autre volume d'eau que l'on peut considérer comme globalement au repos. Nous avons

<sup>2</sup>Danish Institute for Fisheries Technology and Aquaculture

donc considéré que la poche est remplie, jusqu'au plan  $x_c$ , d'eau en équilibre relatif. Il y règne donc une pression constante. Sa valeur est celle déterminée au point d'arrêt  $A$ ,  $\frac{1}{2}\rho V_0^2$ .

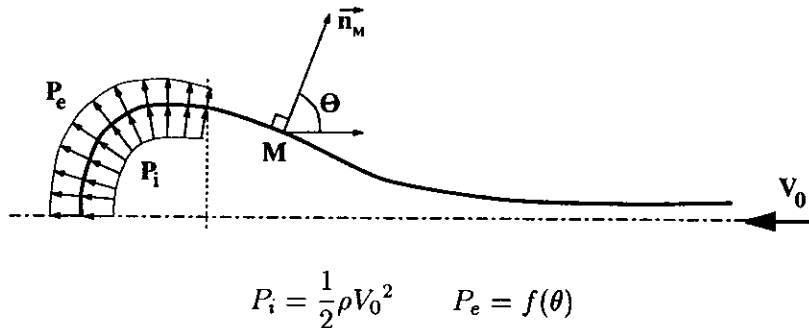


FIG. 9: Répartition de pression

Ainsi l'action de la capture sur le filet, se traduit par une pression uniforme sur la surface  $S^-$  du filet. Pour la surface  $S^+$ , l'opacité du filet aux courants transverses et la forme globale de la partie arrière du chalut nous a conduit à choisir une répartition de pression analogue à celle mesurée autour d'une sphère placée dans un écoulement uniforme en régime subcritique (Schlichting, 1968). Ces efforts intérieurs et extérieurs sont calculés comme si les mailles étaient des surfaces étanches, et répartis aux noeuds de celles-ci.

Une autre difficulté réside dans la détermination de l'écoulement au voisinage de la capture. Nous avons supposé que chaque barre du treillis modélisant la structure du filet était soumise aux efforts hydrodynamiques de l'écoulement non perturbé quand il n'y a pas de contact capture-filet.

Le filet traité en canal à 150 mailles de circonférences et 140 mailles de long; il est constitué de fils élémentaires de diamètre 0.52mm, pratiquement sans raideur de flexion. Nous avons traité numériquement ce filet dont les caractéristiques physiques nous étaient connues. De façon à réduire le nombre d'inconnues, et donc les temps de calcul, nous avons travaillé sur un filet "globalisé". Le facteur de globalisation choisi est de 10 (10x10 mailles physiques remplacées par une seule).

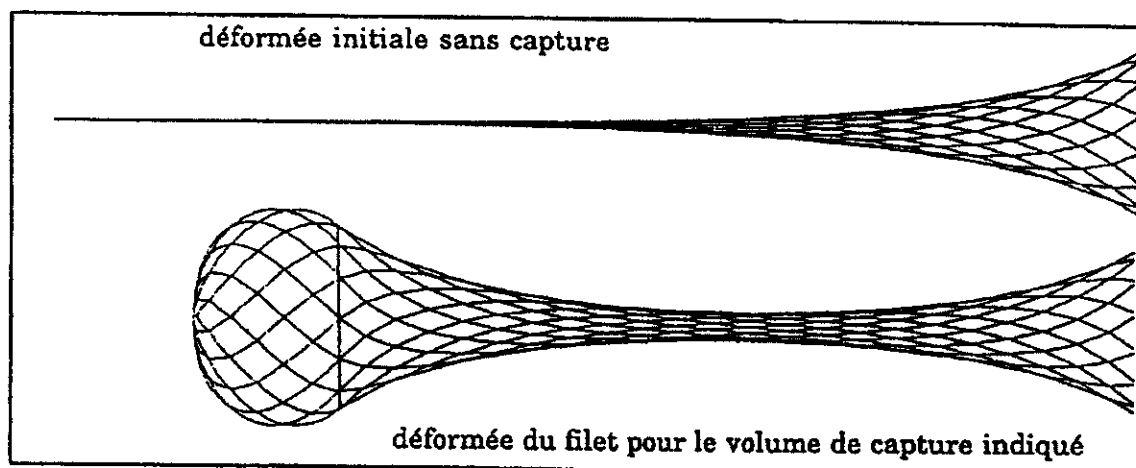


FIG. 10: Déformée initiale et forme d'équilibre

La forme initiale choisie est celle du cul de chalut vide, fixé sur un cerceau d'entrée fixe (correspondant aux conditions expérimentales) placé dans le courant uniforme ( $V=1\text{m/s}$ ). Nous appliquons ensuite progressivement la répartition de pression sur tous les fils du cul de chalut situés entre l'extrémité du chalut et un plan arbitrairement prédéfini passant par toutes les rotules



de même abscisse  $x$  et nous laissons le programme converger jusqu'à ce que la vitesse quadratique relative de l'ensemble des noeuds soit égale à la vitesse du courant (figure 10). Nous voyons ainsi l'intérêt du programme dynamique pour déterminer la forme d'équilibre.

Les calculs ont été menés pour une dizaine de positions du plan frontal de la capture et nous donnent la géométrie de chacune des mailles, le volume de la poche et la traînée globale du chalut.

La figure 11 montre l'exploitation que nous pouvons faire des résultats obtenus pour une position  $x_c$  donnée du plan de capture. Nous obtenons la forme de la génératrice du cul de chalut, l'ouverture des mailles entre le plan de capture et l'entrée du cul de chalut et la force qu'il faudrait exercer sur la petite diagonale des mailles pour obtenir une ouverture de 30 degrés. Cette force peut représenter l'effort que devrait fournir un poisson pour se frayer un passage à travers une maille.

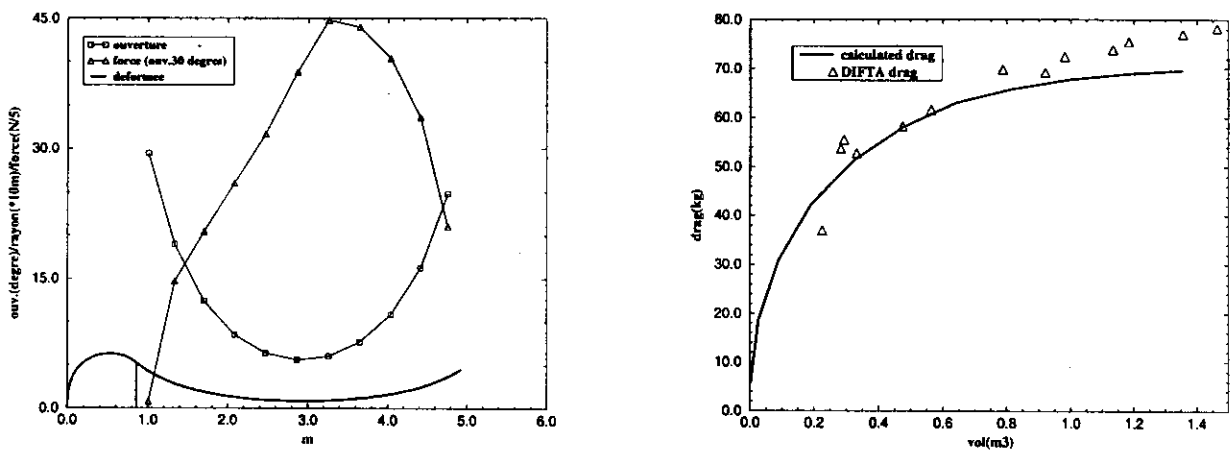


FIG. 11: Déformée, ouverture et force d'ouverture - Comparaison de la traînée

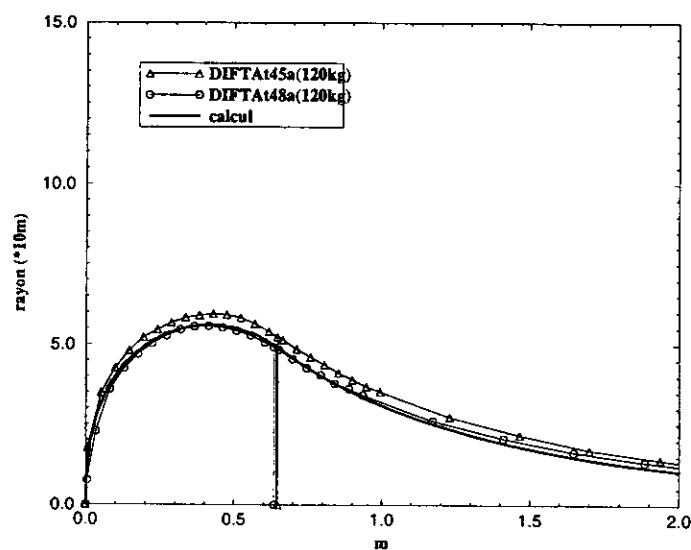


FIG. 12: Comparaison de forme

La comparaison de la traînée globale avec celle mesurée (figure 11) montre une bonne concordance des résultats. Les valeurs plus faibles de nos résultats de calcul peuvent, en partie, s'expliquer par la prise en compte dans la traînée expérimentale fournie par le DIFTA de celle du cerceau sur lequel est fixé le cul du chalut.

Les résultats obtenus, compte tenu des hypothèses formulées et de la comparaison avec les mesures effectuées en canal, nous semblent encourageants. Pour améliorer le schéma théorique il semble nécessaire de prendre en compte de manière plus fine l'écoulement qui traverse les mailles devant la capture, d'avoir une idée plus précise de la forme réelle de la face frontale de la capture et parallèlement de poursuivre les mesures systématiques en améliorant, si possible, la précision de ces mesures.

## 6 Contribution au développement de l'élevage en mer

En ce deuxième millénaire finissant, l'aquaculture prend peu à peu la place de la pêche. Certaines prévisions comme celle mentionnée par Beveridge(1996) suggèrent que d'ici les 25 prochaines années, la principale ressource proviendra non plus de la capture en pêche mais de l'élevage. La cage flottante que nous nous proposons d'étudier représente la majorité des supports d'élevage en mer (figure 13).

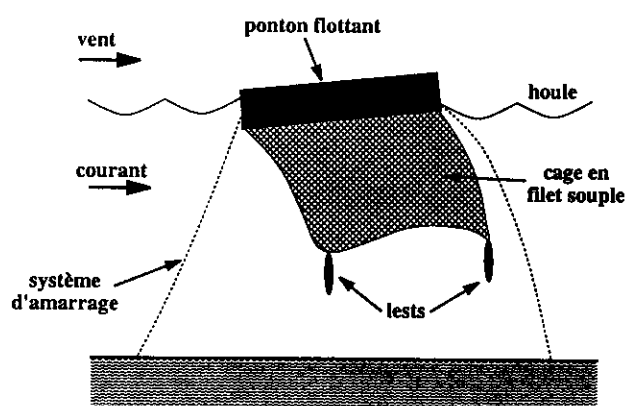


FIG. 13: Cage piscicole souple flottante

d'une maquette de cage en filet souple et de comparer la forme avec celle obtenue par le calcul.

Pour ce faire, une maquette de cage de forme cubique a été construite par assemblage de cinq panneaux de filets rectangulaires à mailles losanges (quatre côtés et un fond). Les noeuds supérieurs de la cage sont attachés à un cadre rigide de forme carré (1m x 1m) fixé au niveau de la surface libre. La maquette est lestée à l'aide d'ogives de plomb d'une masse totale de 12kg régulièrement répartie dans chaque coin inférieur.

En première approximation, nous adoptons l'hypothèse de non-perturbation du fluide par la structure réticulée. Pour une cage piscicole, nous ne prenons pas en compte la réduction de la vitesse moyenne de l'écoulement dans le sillage d'une nappe de filet (effet de "masque").

Les figures 14 et 15 permettent de comparer les formes expérimentales et numériques de la cage au repos et avec un courant incident (1m/s). Sur la représentation graphique de la forme numérique, les lignes en surépaisseurs matérialisent les coutures entre les différents panneaux de filet. La densité du fil est inférieure à 1 ce qui explique pourquoi le panneau du fond tend à remonter à la surface. Ces comparaisons qualitatives de formes numériques et expérimentales montrent l'efficacité de la méthode même dans les zones détendues du filet.

La détermination des déformées de cage et des efforts internes trouve son application dans la conception de ce genre de structures. Les résultats peuvent être exploités afin de réduire les incertitudes sur la détermination des efforts internes et optimiser le dimensionnement des systèmes d'amarrage dans un environnement donné.

Nous nous proposons d'exploiter, dans un premier temps, les résultats d'une campagne d'essais conduite au canal à circulation d'eau d'IFREMER à Boulogne Sur Mer. Il s'agit de visualiser la déformation

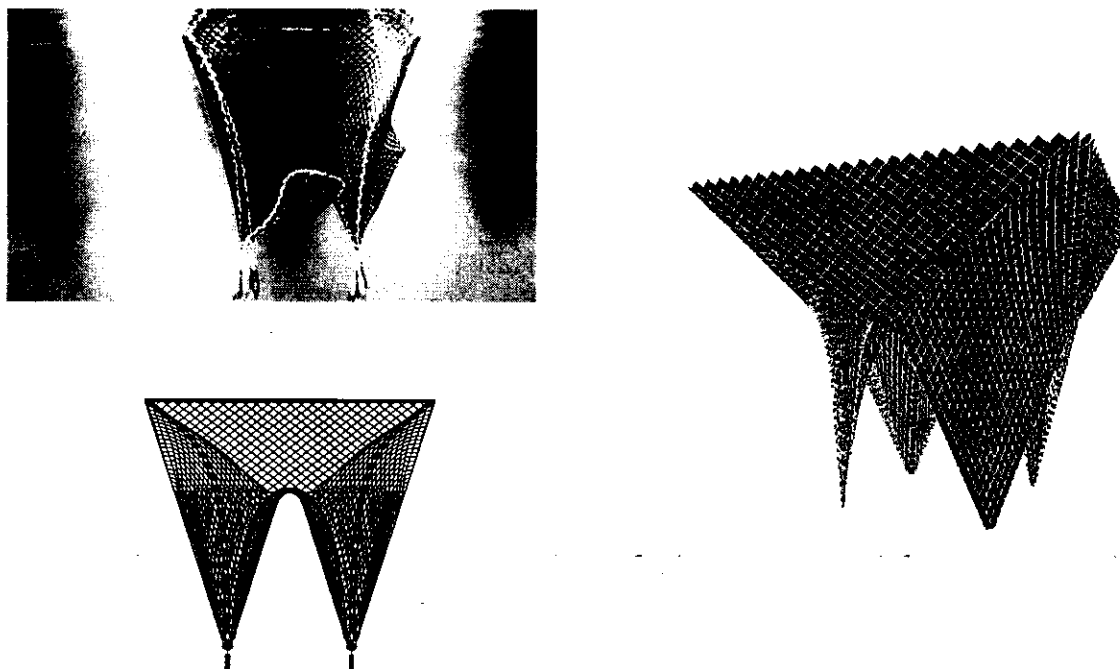


FIG. 14: Cage piscicole fixe immergée au repos

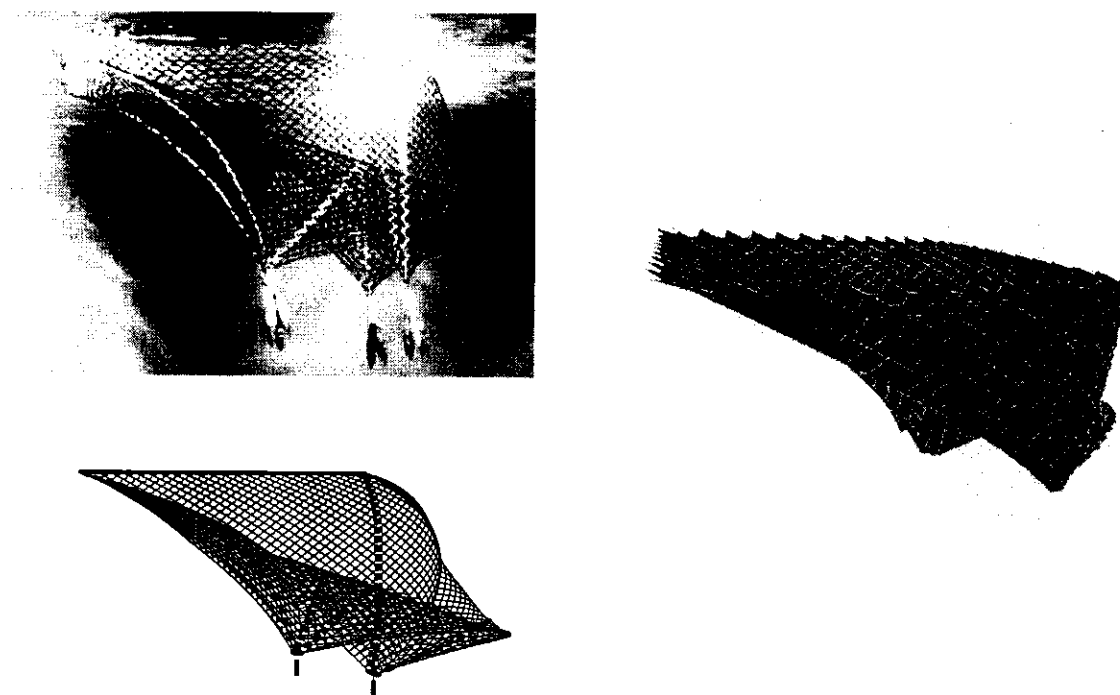


FIG. 15: Cage piscicole fixe immergée avec courant transversal

Le calcul tient compte du fait que lorsque la cage se déforme, deux faces de celle-ci peuvent se toucher et même se croiser “numériquement” (figure 16).

Nous avons en effet inclus dans l’algorithme de calcul, un module de simulation du contact sans frottement en dynamique. La force de réaction à appliquer aux noeuds potentiellement en contact est déterminée par une méthode de prédiction - correction (figure 17).

Dans la phase de prédiction, le déplacement des noeuds est calculé sans prendre le contact en compte. On évalue alors la variable algébrique  $h_i$  représentant l’écart du noeud à la surface de

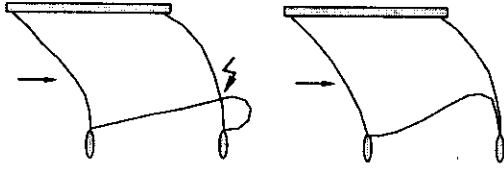


FIG. 16: Mise en évidence du contact sur une cage

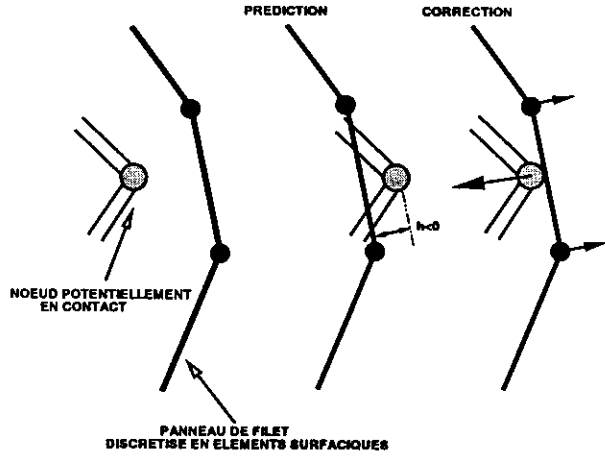


FIG. 17: prédiction-correction

contact. Si  $h_i < 0$  (pénétration), nous calculons la force de contact nécessaire afin de corriger le déplacement du noeud et le ramener à une distance nulle à la surface de contact. Lors de la phase de correction, les équations de la dynamique du filet sont alors à nouveau résolues en incluant les forces de réaction.

L'expérience des aquaculteurs montre l'importance de la diminution du volume disponible due aux déformations de la cage sur la santé et la croissance du poisson (Løland, 1993 et Rudi et al., 1998). La figure 18 montre le volume disponible à l'intérieur de la cage en pourcentage du volume initial sans courant incident. Celui ci est calculé en fonction de la vitesse du courant et pour différents lestages de la cage. Les résultats montrent une réduction évidente du volume pour la cage soumise à des courants incidents élevés. Pour les valeurs de courant incident inférieures à 0,5 m/s, l'augmentation du volume est due aux déformations du fond de la cage.

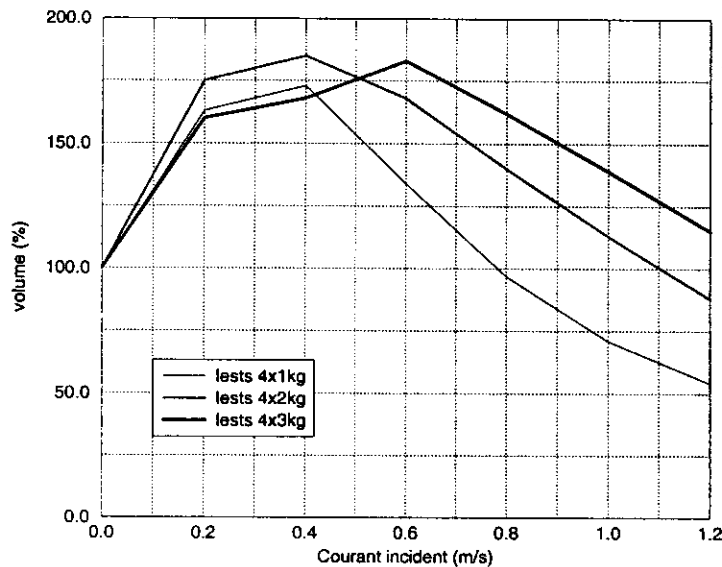


FIG. 18: Volume résiduel

L'étape suivante consiste à modéliser les cages piscicoles flottantes. Dans ce cas, le cadre rigide n'est plus fixé au niveau de la surface libre mais amarrée à l'aide de câbles. Le cadre constituant le ponton possède une flottabilité excédentaire de manière à supporter son poids, ceux de l'alèse et des lests. Nous modélisons les câbles par un ensemble de barres cylindriques articulés. Les éléments rigides constituant ainsi les amarres sont des mailles particulières de la structure réticulée et obéissent aux mêmes équations de la dynamique (1).

Les noeuds du filet liés au ponton sont particuliers car ils doivent décrire le mouvement du ponton. Nous écrivons sur ces noeuds les équations de la dynamique pour un corps rigide. Ces équations sont ainsi couplées avec celles de la dynamique du filet en utilisant le même schéma temporel d'Euler demi-explicite.

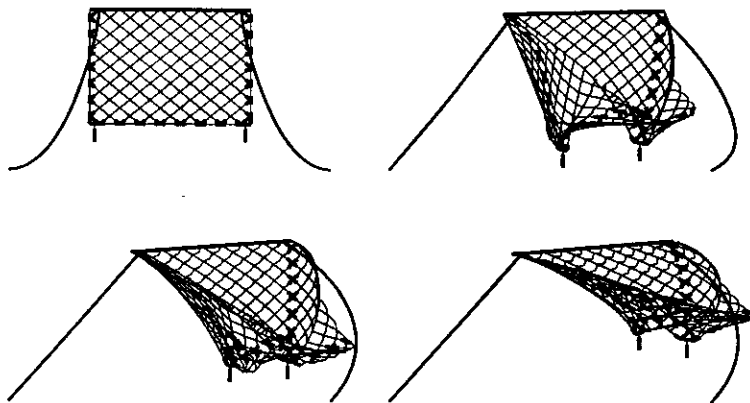


FIG. 19: Cage flottante immergée dans un courant transversal

La figure 19 montre l'évolution au cours du temps d'une cage amarrée dans un courant transversal uniforme, jusqu'à sa forme d'équilibre. Le processus de calcul démarre à partir de la forme initiale cubique.

## 7 Conclusion

Nous avons proposé une méthode numérique permettant de simuler le comportement dynamique des filets souples immergés. La méthode générale est fondée sur la résolution des équations de la dynamique en chaque noeud de la structure discrétisée en barreaux rigides cylindriques. Nous l'avons ainsi adapté à l'étude des culs de chalut et des cages piscicoles en filet souples. Les efforts ont alors été portés sur la prise en compte de conditions initiales particulières, de contact avec des obstacles et de couplage avec un corps rigide.

Pour le calcul des efforts hydrodynamiques, les mesures sur des panneaux de filets tendus en travers d'un courant sont en accord avec le modèle de Landweber-Richtmeyer. Nous devons toutefois étudier le cas des filets à quotient de solidité élevé où les interactions hydrodynamiques entre les côtés de maille ne peuvent plus être négligées. Des études sont également en cours afin d'étudier les effets de "masque" et quantifier la quantité de fluide qui passe à travers la nappe de filet et celle qui la contourne.

## Références

- Bessonneau J.S. (1997). "Etude dynamique de surfaces réticulées souples et immergées (application aux chaluts)", thèse de Doctorat Nantes
- Bessonneau J.S., Marichal D. (1998). "Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls)", *Ocean Eng* , Vol 25, No 7, pp 563-583.
- Beveridge M. (1996). *Cage Aquaculture* , second edition, Fishing New books Ltd.
- Carrothers P. J. G., Baines W. D. (1975). "Forces on screens inclined to a fluid flow", *J Fluids Eng* , Vol 97, pp 116-117
- Løland G. (1993). "Current forces on, and water flow through and around, floating fish farms" , *Aquaculture Int* , No.1, pp 72-89
- O'Neill F.G. (1997). "Differential Equations governing the Geometry of a diamond Mesh Cod-end of a trawl net", *J. of Applied Mech.* , Vol 64, pp 7-14
- Rudi H., Frøydis S., Slaattelid O. (1998). "Importance of current and waves on localization and design of fish farms", In Proc. of the *17th International Conference On Offshore Mech. and Artic Eng.* .
- Schlichting H. (1968). "Boundary-Layer Theory", *McGraw-Hill series in mechanical engineering* , page 21
- Théret F. (1993). "Etude de l'équilibre de surfaces réticulées placées dans un courant uniforme (application aux chaluts)", thèse de Doctorat Nantes