

ETUDE DYNAMIQUE D'UN TRAIN DE PECHE COMPLET

DYNAMIC BEHAVIOUR OF A COMPLETE TRAWL GEAR

DOMINIQUE MARICHAL^{*}, BENOIT VINCENT^{**}

^{*}Ecole Centrale de Nantes

1 rue de la Noë 44300 Nantes 33 (0)2 40 37 16 32 dominique.marichal@ec-nantes.fr

^{**}IFREMER

8 rue François Toullec 56100 Lorient 33 (0)2 97 87 38 04 benoit.vincent@ifremer.fr

Résumé

Nous présentons ici la synthèse de l'ensemble des travaux que nous avons effectués ces dernières années afin de parvenir à l'étude dynamique du train de pêche complet.

Le chalutier est modélisé par les équations (et les coefficients hydrodynamiques) classiques des théories de tenue à la mer et de manœuvrabilité des navires. Il est soumis à l'action des fûnes.

Les funes et les filets constituent un problème de couplage fluide-structure complexe. Le filet est une structure souple dont la forme dépend des efforts auxquels il est soumis. Mais ces efforts dépendent eux-même de la forme prise par les mailles. Nous avons développé une méthode originale et efficace pour résoudre ce problème.

Les panneaux sont des profils portants très particuliers. Nous avons étudié en détail un type de panneau. Le logiciel FLUENT nous a permis calculer les efforts engendrés par le panneau. Nous avons aussi estimé les masses ajoutées du panneau autour de sa position nominale en simulant numériquement des accélérations dans les différentes directions.

Lorsque tous ces éléments sont rassemblés, « il suffit » d'écrire les équations de la dynamique pour chacun des objets considérés. Une résolution à pas de temps permet de suivre la déformation du train de pêche complet, l'évolution des tensions en tout point du chalut et de son gréement, les mouvements du chalutier...

Abstract

We present hereafter the whole work that has been undertaken for many years to develop a complete numerical model of a full trawl gear and the vessel. The trawler is modelled by equations and hydrodynamic coefficients which are classically used for ship behaviour and ship manoeuvrability studies. It is submitted to the action of the cables used to tow the trawl (warps). The warps and the net are part of a complex fluid-structure coupling problem. The net is a supple structure and its shape depends on the forces that are acting on it. Now, these forces themselves depend of the net meshes shape. We have developed an original and efficient method to solve this problem. The otter boards (doors) are most particular wings. Many different kinds of doors being available, we have only studied one particular type. The CFD software Fluent enabled us to determine the forces acting on this door. We have also determined the added masses around the nominal position (working position) of the door by simulating accelerations in the different directions. Then all these elements have been put

together by writing their dynamics equations. A time step method enables the calculation of the shape, the forces and the motion of each element in the whole system.

I. Introduction

I.1 Etat de l'art

Les “Arts traînants” et le chalutage sont des techniques de pêche ancestrales utilisant comme constituant principal un filet. Les utilisations très variées de ces dispositifs suivant les espèces recherchées et les conditions de pêche ont conduit des générations de marins-pêcheurs à faire preuve d’une grande imagination technologique. Pendant longtemps, la validation des idées nouvelles résultait seulement d’une augmentation de la capture, ou d’une amélioration des conditions de travail. Ce qui se « passait » sous l’eau était pratiquement inconnu.

Puis, la construction de moyens d’essais importants - en particulier des « bassins d’essais de chaluts » : veines de circulation d’eau munies d’un fond mobile – a permis l’observation de modèles réduits de train de pêche. Malgré des difficultés liées aux effets d’échelle difficilement maîtrisable, ces observations ont apporté de nombreux renseignements sur la forme prise par les chaluts suivant les conditions de mise en œuvre.

Le développement d’équipements de mesure sous-marins de plus en plus performants est venu compléter ces informations par des observations et des résultats quantitatifs de plus en plus nombreux et précis dans les conditions d’utilisation réelle. On peut citer parmi ces équipements différents capteurs permettant la mesure de la sonde (immersion du filet), de ses ouvertures horizontale et vertical, de la tension des funes etc. On dispose aussi de caméras sous-marines de haute sensibilité fixées en des points particuliers du train de pêche ou sur des engins mobiles d’observation des chaluts

Toutes ces techniques expérimentales ont beaucoup contribué à une meilleure connaissance des engins de pêches et à leur amélioration. Cependant la complexité de leur mise en œuvre – rappelons qu’il s’agit le plus souvent de mesures en mer – limite leur utilisation à l’étude de quelques cas spécifiques. C’est pourquoi nous nous attachons depuis plusieurs années à développer l’étude numérique des trains de pêche. Après avoir traité la dynamique des filets immergés dans un courant (absolu ou (et) absolu), nous nous sommes intéressés à la modélisation de tout l’environnement du chalut : panneaux d’ouverture, contact avec le fond, flotteurs... Nous sommes maintenant en capacité de traiter l’étude de dynamique d’un train de pêche complet en incluant la dynamique du chalutier et éventuellement l’état de la mer ou les ordres du commandant !

Avec ces méthodes nous pouvons étudier rapidement l’influence de la modification d’un ou plusieurs paramètres sur la forme du chalut. Les objectifs de ces études sont multiples. Une meilleure connaissance du comportement du train de pêche permet sûrement d’en améliorer l’efficacité, non pas tant en augmentation des captures qu’en diminution des coûts de fabrication, d’exploitation et d’entretien. Mais c’est surtout dans un contexte de respect de l’environnement et des ressources marines que ces outils numériques facilitent les recherches visant à améliorer la sélectivité des chaluts ou à diminuer l’impact des trains de pêche sur le fond marin. Enfin, la simulation de manœuvres ou d’accidents fréquemment rencontrés au cours de campagnes de pêche pourra également améliorer la sécurité des pêcheurs.

1.2 Description sommaire d'un train de pêche

La figure 1 extraite du livre « Les croches et les arts traînants » [1] présente rapidement les principaux éléments d'un train de pêche et précise quelques termes de vocabulaire.

Enfin, afin de situer certains ordres de grandeur possibles, nous pouvons signaler que le plus grand des chaluts « Gloria » (chalut pélagique à très grande ouverture) a un périmètre d'ouverture de 3 km et une surface d'ouverture de 51 600 m², soit environ la surface de 7 terrains de football. Certes, il s'agit d'un cas extrême.

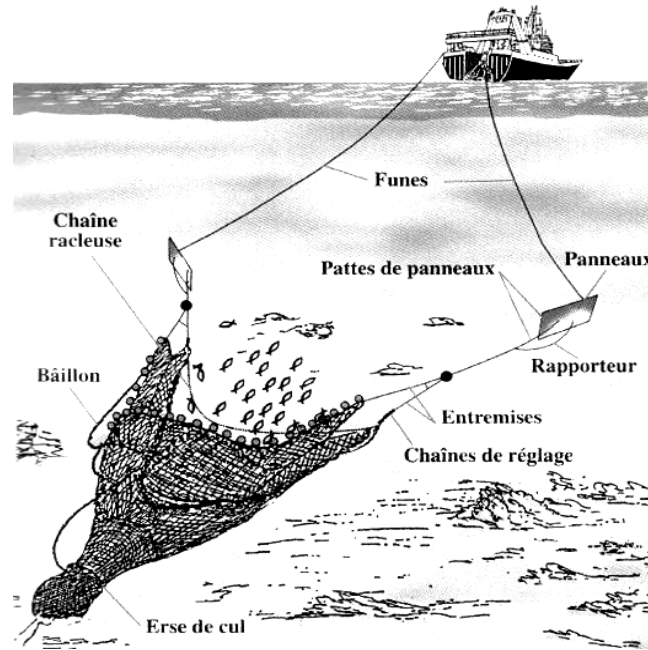


Figure 1. Train de pêche d'un chalut de fond à 2 faces (document IFREMER)

II. Méthode générale pour l'étude dynamique d'un filet immergé

II.1 Un problème de couplage fluide-structure original et complexe

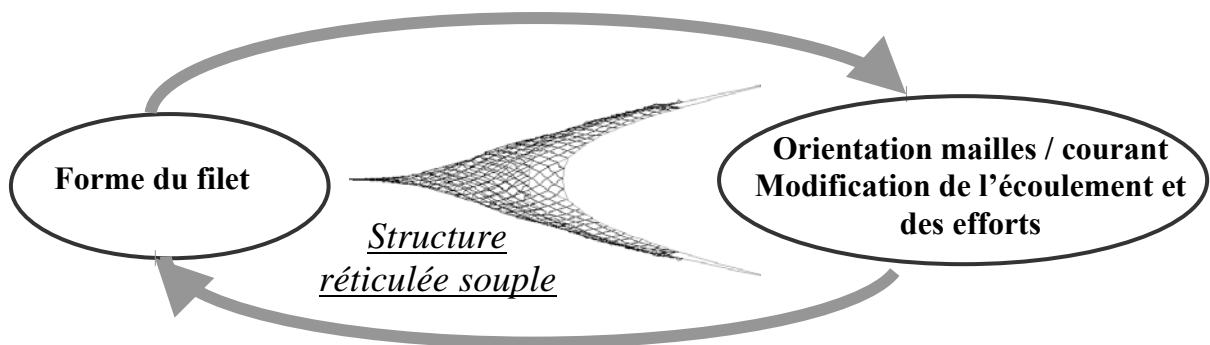


Figure 2. Un problème complexe de couplage fluide-structure

Un chalut est une surface souple réticulée et immergée, dont l'interaction avec l'écoulement est particulièrement complexe. Les difficultés rencontrées dans l'étude du comportement dynamique de ces surfaces 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 lorsque ce n'est pas contradictoires. Ils proviennent généralement d'essais sur des panneaux rectangulaires ou des troncs de cônes de filets rigidifiés par des enduits ou soumis à des tensions non réalistes. Il n'apparaît pas de lois de similitude 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-même 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 dynamique 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 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, V.A. Belov par exemple [2]. Cette démarche ne permet pas l'innovation car elle n'est applicable qu'à des filets de même type que ceux déjà essayés. La méthode que nous proposons nous semble une approche originale et plus générale. Elle est facilement adaptable à de nombreux problèmes.

II.2 Méthode générale pour l'étude dynamique d'un filet immergé

Un chalut réel comporte un nombre de mailles extrêmement important. La recherche connaissance détaillée de la forme et de la position de chacune conduirait à considérer un nombre d'inconnues irréaliste. De plus, considérer chaque maille en détail ne serait sans doute pas en corrélation avec les hypothèses que nous devons formuler, en particulier en ce qui concerne la modélisation des efforts hydrodynamiques. Nous avons donc introduit [3] et [4] une méthode de globalisation : on remplace un groupe de mailles réelles par une maille virtuelle. Sa longueur de son coté est défini par le nombre et le coté des mailles globalisées. Son diamètre est calculé de façon à ce qu'elle génère les mêmes efforts hydrodynamiques que le groupe de mailles qu'elle représente. Les poids apparents sont également répartis.

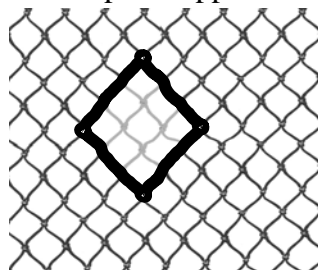


Figure 3. Globalisation du maillage

Une maille globalisée est représentée par un ensemble de barres cylindriques rigides reliées entre elles par des liaisons rotule. Chaque coté de la maille est coupé en deux segments de même longueur. Une liaison rotule intermédiaire permet de rendre compte de la souplesse des cotés de maille.

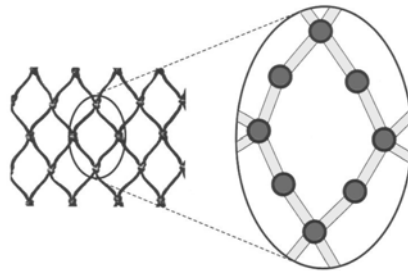


Figure 4. Modélisation de la maille globalisée

La plupart des nœuds sont donc reliés à deux fils (nœuds intermédiaires) ou quatre (nœuds physiques). Cependant, étant donné qu'un chalut est constitué par l'assemblage de différentes pièces de filets, on peut trouver à certains endroits, notamment sur les coutures, des configurations plus complexes. Afin de limiter la dimension des différents tableaux, nous avons limité dans notre programme le nombre de fils liés en un même nœud à cinq.

Nous nous proposons d'étudier l'équilibre dynamique des barres rigides, qui sont soumises aux actions de l'écoulement relatif, des barres adjacentes et des poids apparents. Les barres étant supposées être reliées par des liaisons rotules, on considère qu'aucun moment n'est transmis d'une barre à l'autre. Cette hypothèse résulte davantage d'une mauvaise connaissance du filet que d'une difficulté à écrire les équations correspondantes.

a) Modélisation des efforts hydrodynamiques agissant sur les cotés de maille

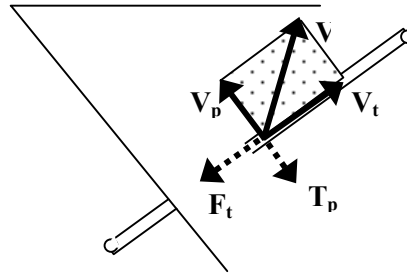
En se limitant au cas des mailles losanges, ces efforts dépendent de très nombreux paramètres. Citons au moins :

- la constitution de l'alèse elle-même : longueur du coté de maille, diamètre du fil (fil simple ou fil double), diamètre des nœuds...
- l'ouverture de la maille qui impose un certain rapport entre la surface offerte au passage de l'eau et la surface obstruée par les fils et nœuds (« coefficient d'armement »).
- l'orientation de la maille par rapport au courant relatif

Quelques études expérimentales ont été menées. Mais elles sont très délicates et ne peuvent pas être exhaustives. Il s'agit généralement de tendre une pièce d'alèse sur un cadre rigide. On mesure les efforts hydrodynamiques qui agissent sur l'ensemble et on soustrait ceux qui agissent sur le cadre seul placé dans le même courant (cela suppose que la traînée du cadre n'est pas affectée par les modifications de l'écoulement dues au filet). On a pu aussi vérifier certaines hypothèses en comparant des résultats numériques et des formes relevées pour des dispositifs simples (alèses rectangulaires, tubes cylindriques...). Mais, ces expériences seront toujours très limitées par rapport la multitude des situations réelles.

Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés. Afin de ne pas surcharger la présentation, nous n'en présentons ici que deux. L'un, celui que nous avons établi depuis plusieurs années [3], est d'essence plus théorique. Il est fondé sur une généralisation des hypothèses de Landweber [5] pour les écoulements autour de cylindres circulaires. L'autre, Aarnes [6] est issu de mesures en laboratoire.

Hypothèses de Landweber



$$\mathbf{T}_p = -\frac{1}{2} \rho d \ell C_d \mathbf{V}_p \|\mathbf{V}_p\| \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_t = -\frac{1}{2} \rho d \ell f C_d \mathbf{V}_t \|\mathbf{V}_t\|$$

Figure 5. Décomposition des efforts agissant sur un coté de maille

Les efforts hydrodynamiques sont calculés sur chacun des cotés des mailles comme s'il était un cylindre circulaire isolé. Ils sont décomposés en une traînée normale au coté de maille et un effort de frottement tangentiel. Nous introduisons pour le coefficient de traînée la valeur 1,2 (valeur usuelle pour un cylindre ne vibrant pas) et 0,1 pour le coefficient de frottement. Les valeurs de ces coefficients ont été obtenues par des expériences en canal à circulation d'eau et par la bonne concordance des résultats pour des formes réelles.

Le modèle de J.V. Aarsnes

J.V. Aarnes a proposé un modèle semi-empirique qui permet d'estimer la traînée et la « portance » d'une maille de filet placée dans un courant uniforme. Ce modèle est, pour partie, fondé sur des résultats expérimentaux (identification des coefficients). Il comporte une restriction importante : la maille doit présenter une symétrie par rapport à l'écoulement incident (pas d'effort transversal).

La force qui agit sur une maille se décompose en une force de traînée (parallèle à la vitesse de l'écoulement à l'infini) et une force de « portance » (orthogonale à l'écoulement):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d A U^2 n_D \quad \text{et} \quad F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A U^2 n_L \quad (2) \text{ et } (3)$$

avec :

$$C_d = 0,04 + (-0,04 + S_n - 1,24 S_n^2 + 13,7 S_n^3) \cos \alpha \quad (4)$$

et

$$C_L = (0,57 S_n - 3,54 S_n^2 + 10,1 S_n^3) \sin \alpha \quad (5)$$

Dans ces formules, A est la surface totale de la maille, A_n la surface frontale des cotés de maille et des nœuds. S_n est le « coefficient d'armement », il caractérise la surface offerte au passage de l'eau : $S_n = \frac{A_n}{A}$. Les auteurs indiquent que l'usage de ces formules doit être limité à des coefficients d'armement inférieur à 0,3.

Utilisation du logiciel FLUENT [7]

Nous avons utilisé un logiciel « CFD » industriel pour compléter la validation des modèles des efforts hydrodynamiques qui agissent sur une maille. Les formulations précédentes font appel à des définitions très différentes de coefficients hydrodynamiques. Il est donc difficile de les comparer directement. Nous comparerons donc des résultats dimensionnels concernant des exemples typiques tels que celui que nous présentons ici.

Nous considérons une alèse dont le coté de maille est de 20 mm, le diamètre du fil 1,5 mm et le diamètre des nœuds 3 mm. Nous étudierons trois ouvertures de maille (90° - maille carrée-, 60° et 30°-maille très étirée). Nous supposons l'alèse plane et placée orthogonalement à un plan vertical contenant la vitesse de l'écoulement à l'infini. De plus, ce plan passe par les nœuds des grandes diagonales d'une rangée de maille. Nous nous plaçons ainsi dans les conditions d'applications des formules de Aarnes.

L'écoulement à travers une maille présente, d'une part, des symétries par rapport aux plans verticaux passant par des nœuds alignés, d'autre part, une périodicité de maille en maille. La prise en compte de ces deux propriétés de l'écoulement complet permet de réduire l'étude à celle de l'écoulement autour d'une seule demi-maille (deux cotés de maille et trois demi-sphères représentant les nœuds). Une telle restriction du domaine permet de réaliser un maillage suffisamment fin pour bien représenter les fils et les nœuds. Nous considérons différents courants de 1 m/s et dont l'angle avec l'alèse varie de 90° (perpendiculaire à l'alèse) à 15° (pratiquement parallèle à l'alèse).

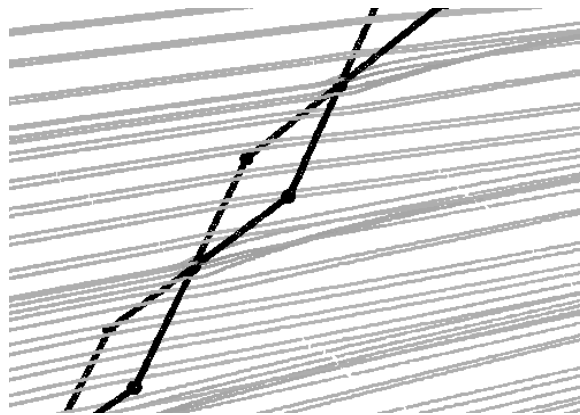


Figure 6 Ecoulement à travers une maille

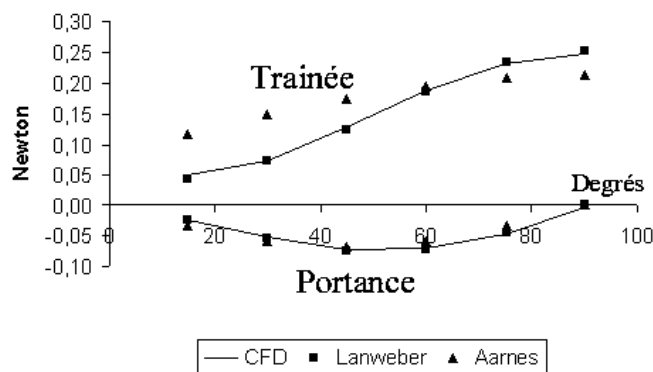


Figure 7 Traînée et portance d'une maille

La figure 7 présente l'évolution de la traînée et de la « portance » pour une maille complète (4 cotés, 4 demi-sphères, ouverture de 60 degrés). Nous obtenons des résultats semblables pour d'autres ouvertures de mailles (inférieure à 90 degrés – maille carrée) sauf pour de très faibles ouvertures (inférieures à 15 degrés environ) où les deux modèles présentés ne donnent pas de bons résultats. Les mailles sont très fermées et le filet se comporte plus comme une surface poreuse. Cette limitation correspond à celle indiquée par Aarnes.

La figure 7 met en évidence une très bonne corrélation entre les résultats obtenus par la CFD et par l'utilisation des hypothèses de Landweber.

b) Liaisons internes

Chaque fil exerce une tension \mathbf{t}_{ij} sur les nœuds i et j situés à ses deux extrémités. Nous devons tenir compte de cette répartition d'efforts internes dans l'étude du comportement dynamique du train de pêche. Ces tensions sont liées aux cordonnées des nœuds par l'élasticité des cotés de mailles.

$$l_{ij} = l_{0ij} (1 + \chi \mathbf{t}_{ij}), \text{ soit } \mathbf{t}_{ij} = \frac{1}{\chi} \frac{l_{ij} - l_{0ij}}{l_{0ij}}, \quad (6) \text{ et } (7)$$

$$\text{avec } l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \text{ la longueur de la barre } ij, \quad (8)$$

l_{0ij} sa longueur non tendue, et χ son élasticité.

De plus, les cotés de mailles sont des fils souples et ne peuvent donc pas transmettre un effort de compression. Nous tenons compte du caractère non holonôme de ces liaisons en imposant que la tension d'un fil est nulle si la distance qui sépare ses deux extrémités est plus courte que sa longueur non tendue.

II.3 Efforts ponctuels particuliers

Certains nœuds sont soumis à des forces supplémentaires s'ajoutant aux précédentes. Ainsi, les nœuds liés aux flotteurs subissent également une force verticale, le poids apparent des flotteurs, et une force de traînée qu'on exprime en utilisant le coefficient de traînée d'une sphère d'une valeur proche de 0,45.

De même, les lests sont soumis à des forces analogues à celles agissant sur les flotteurs. Mais ils peuvent être en contact avec le sol. Nous introduisons des ressorts virtuels pour modéliser cette condition. Le contact avec le sol crée aussi une force de frottement que l'on exprime selon la loi de Coulomb. La raideur des ressorts fictifs et le coefficient de frottement sont déterminés de manière encore très empirique. Elles dépendent beaucoup de la nature du sol.

L'action des panneaux sera décrite en détail dans la partie suivante.

Enfin, les funes peuvent être considérées comme de très grandes mailles particulières. Nous les modélisons de la même façon sauf que, compte tenu de leur longueur, nous introduisons un grand nombre de nœuds intermédiaires. De plus, elles sont soumises à des vibrations importantes dues à des lâchers de tourbillons, ce qui modifie les valeurs des efforts hydrodynamiques. On utilisera les coefficients de traînée de pression et de frottement généralement admis pour les câbles sous-marins : $C_d = 1,8$ et $f = 0,01$.

II.4 Mise en équations et résolution

Nous considérons que les efforts appliqués aux barres rigides sont répartis également entre leurs deux extrémités. De plus, certains nœuds, par exemple ceux liés aux flotteurs ou aux panneaux, sont soumis à des efforts extérieurs ponctuels \mathbf{L}_i . Les équations de la dynamique de chacun des nœuds peuvent s'écrire sous la forme générale :

$$\gamma_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=n_1(i)}^{n_k(i)} \left\{ \mathbf{t}_{ij} + \frac{1}{2} (\mathbf{T}_{p_{ij}} + \mathbf{F}_{t_{ij}}) + \mathbf{L}_i \right\} \quad (9)$$

en notant k le nombre de nœuds adjacents au nœud i et $n_1(i), \dots, n_k(i)$ leurs numéros.

Pour résoudre ce système d'équations différentielles chaque équipe utilise sa propre méthode.

a) Ifremer Lorient (Benoît Vincent) – Logiciel DynamiT

Pour calculer les efforts hydrodynamiques agissant sur les cotés de mailles, nous calculons les vitesses tangentielles et normales à l'aide du produit scalaire de la vitesse et du vecteur $\vec{\ell}$, tangent au coté de maille et de composantes ℓ_x, ℓ_y et ℓ_z .

$$\vec{V}_t = \frac{\vec{V} \cdot \vec{\ell}}{\|\vec{\ell}\|^2} \vec{\ell} \quad \text{soit} \quad \vec{V}_t = \frac{1}{\ell^2} \begin{pmatrix} V_x \ell_x^2 + V_y \ell_x \ell_y + V_z \ell_x \ell_z \\ V_x \ell_x \ell_y + V_y \ell_y^2 + V_z \ell_y \ell_z \\ V_x \ell_x \ell_z + V_y \ell_y \ell_z + V_z \ell_z^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{V}_n = \vec{V} - \vec{V}_t \quad \text{soit} \quad \vec{V}_n = -\frac{1}{\ell^2} \begin{pmatrix} V_x (\ell_x^2 - \ell^2) + V_y \ell_x \ell_y + V_z \ell_x \ell_z \\ V_x \ell_x \ell_y + V_y (\ell_y^2 - \ell^2) + V_z \ell_y \ell_z \\ V_x \ell_x \ell_z + V_y \ell_y \ell_z + V_z (\ell_z^2 - \ell^2) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Le principe fondamental de la dynamique constitue alors un système d'équations linéaires où il est possible « d'impliciter » partiellement (termes diagonaux) les vitesses afin de pouvoir augmenter fortement le pas de temps de la résolution, sans mettre en cause la stabilité du processus itératif.

b) ECN (Dominique Marichal)

Tous les efforts qui interviennent dans l'équilibre dynamique des noeuds ne dépendent que des coordonnées des noeuds et de leurs dérivées temporelles. En notant \mathbf{Y} , \mathbf{Y}' et \mathbf{Y}'' les vecteurs regroupant les coordonnées de tous les noeuds étudiés, et leurs dérivées temporelles premières et secondes, nous écrivons le système d'équations sous la forme générale :

$$\mathbf{Y}'' = \Phi(t, \mathbf{Y}, \mathbf{Y}') \quad (12)$$

Nous obtenons ainsi un système d'équations différentielles du second ordre qui peut être résolu en utilisant une méthode de Runge-Kutta du quatrième ordre.

III. Modélisation des efforts hydrodynamiques agissant sur un panneau

III.1 Description du panneau – choix du repère – déformation du domaine de calcul

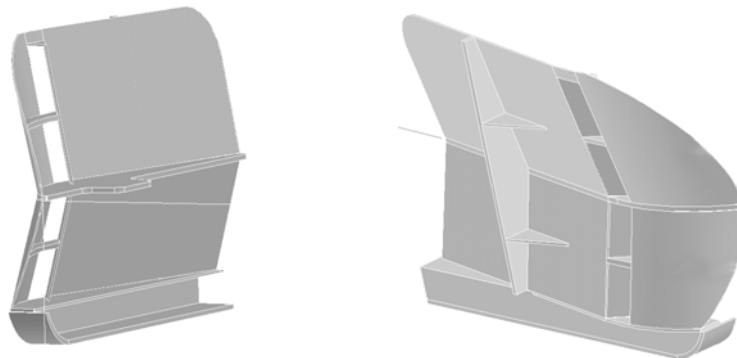


Figure 8. Panneau du NO Gwendrez (vu des deux cotés)

Les panneaux de pêche sont des surfaces portantes destinées à créer une force orthogonale à la vitesse d'avance afin d'assurer l'ouverture horizontale du filet. Pour des raisons de stabilité de l'équilibre du train de pêche, ils travaillent avec des incidences élevées

(30 à 45 degrés). Pour des raisons de solidité et de mise en œuvre, et bien que les plus élaborés utilisent des principes issus de la théorie des ailes, leur forme est assez différente de celle d'une aile classique.

La connaissance des efforts hydrodynamiques auxquels ils sont soumis à longterm a été très empirique. Les bassins d'essais de chalut ont permis de mesurer, avec une précision limitée, les efforts principaux (portance et traînée). Les méthodes CFD permettent maintenant de déterminer le torseur complet des efforts hydrodynamiques stationnaires et instationnaires agissant sur un panneau de chalut. Il s'agit d'une étude complexe que nous résumons rapidement ici pour le cas particulier les panneaux du NO Gwendrez (chalutier de recherche IFREMER).

Nous nous proposons donc de calculer des efforts instationnaires liés aux différents mouvements du panneau autour de différentes positions d'équilibre relatif (cavalement, pilonnement, embardée, roulis, tangage). Nous les définissons le repère d'étude en conformité avec le système d'axes utilisé pour l'étude des mouvements des navires.

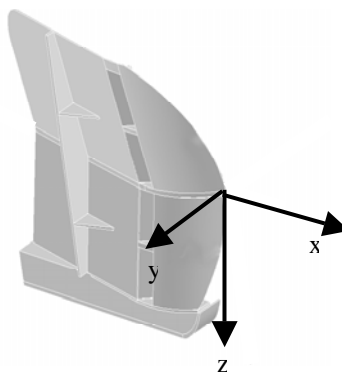


Figure 9. Axes liés au panneau

L'origine du repère est un point du panneau : nous la prenons tout à l'avant du panneau, au milieu du raidisseur « horizontal ». L'axe ox est parallèle au bord extérieur du raidisseur et dirigé de l'arrière vers l'avant. L'axe oz est vertical, dirigé vers le bas lorsque le panneau est posé à plat sur sa semelle. L'axe oy est tel que le repère soit direct. On décrit les mouvements du panneau à l'aide de trois rotations successives, lacet, tangage et roulis définies dans trois repères successifs et dans cet ordre (pour plus de détails voir la référence [8]).

La détermination des efforts hydrodynamiques stationnaires est faite en considérant l'écoulement relatif, c'est à dire le panneau fixe dans un écoulement uniforme à l'infini de vitesse égale à l'opposé de la vitesse d'avance réelle du panneau. En mouvement stationnaire, les efforts exercés sur l'objet par le fluide sont les mêmes que ce soit le fluide ou l'objet qui soit en mouvement. Les résultats sont donc les mêmes en mouvement relatif ou absolu. L'usage du mouvement relatif permet de définir un volume de calcul fixe et indéformable. Par contre les efforts hydrodynamiques instationnaires ne sont pas identiques suivant que l'on considère le mouvement absolu ou le mouvement relatif.

L'étude des efforts dans le mouvement absolu suppose que le panneau soit animé d'une vitesse moyenne égale à la vitesse de chalutage et subi des accélérations autour de cette vitesse moyenne. Une modélisation CFD du mouvement absolu nécessite donc que l'avance du panneau déforme le volume de contrôle. Dans le mouvement absolu strict ces déformations sont importantes à cause de la vitesse d'avance moyenne du panneau. Le remaillage automatique de FLUENT ne semble pas être adapté à des déformations de cette importance.

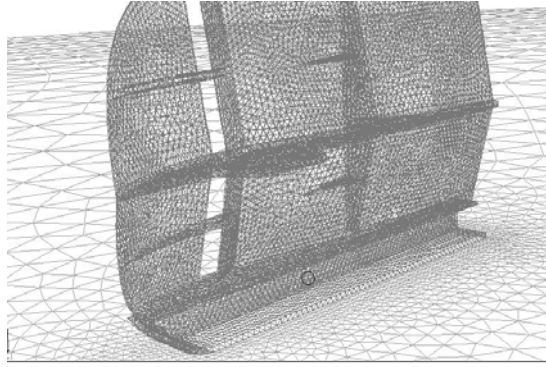


Figure 10 Détails du maillage du panneau et du fond (roulis 0°)

Compte tenu de toutes ces remarques nous avons adopté une démarche intermédiaire qui sera totalement justifiée par la représentation linéarisée des efforts que nous adopterons in fine. Nous modélisons la partie stationnaire de l'écoulement en considérant l'écoulement relatif. Nous plaçons donc le panneau dans un volume fixe traversé par l'écoulement relatif. Puis nous imposons au panneau un mouvement (absolu) correspond à la partie instationnaire du mouvement désiré. Nous limitons ainsi les déformations du maillage et rendons possible l'utilisation d'un maillage déformable.

III.2 Modélisation des efforts hydrodynamiques agissant sur un panneau

Dans son cours M.A. Abkowitz [9] propose un modèle linéarisé pour calculer les efforts agissant sur un corps en mouvement dans un fluide. Cette approche nous semble tout à fait justifiée dans notre étude compte tenu du grand nombre de paramètres à prendre en compte (6 degrés de liberté simultanément et leurs dérivées) et de la relative simplicité du modèle proposé.

Un panneau de chalut est un corps rigide ayant un mouvement complexe faisant intervenir simultanément ses 6 degrés de liberté en tant que positions, vitesses et accélérations. Les paramètres de positions $(x, y, z, \psi, \theta, \varphi)$ interviennent en définissant la position du panneau par rapport au fond et son orientation par rapport au courant relatif. Les 6 composantes de vitesse $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi})$ sont, très globalement, à l'origine de termes que l'on peut qualifier de traînée. Les six composantes d'accélération $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\psi}, \ddot{\theta}, \ddot{\varphi})$ conduisent aux efforts d'inertie ajoutée. Nous noterons les six composantes du torseur des efforts hydrodynamiques X, Y, Z, K, M, N . Il s'agit respectivement des composantes de la résultante dans les trois directions du repère et des trois composantes du moment résultant par rapport à l'origine du repère.

Pour le calcul des efforts hydrodynamiques, on considère que les paramètres de positions $(x, y, z, \psi, \theta, \varphi)$, les vitesses $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi})$ et les accélérations $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\psi}, \ddot{\theta}, \ddot{\varphi})$ sont des paramètres indépendants. Bien que ces paramètres soient liés entre eux par des relations de dérivation, - plus ou moins simples - par rapport au temps, un panneau réel peut avoir à un instant t la même position avec des vitesses et accélérations totalement différentes. Nous pouvons donc écrire qu'une composante du torseur des efforts hydrodynamique est une fonction (compliquée et inconnue) des 18 paramètres de position, vitesse et accélération. On linéarise l'expression de ces efforts en développant ces fonctions inconnues en séries de Taylor, autour de la position nominale du panneau et limitées au premier ordre. Ainsi les composantes du torseur des efforts peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned}
X &= X_0 + X_u u + X_v v + X_w w + X_p p + X_q q + X_r r + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\dot{v}} \dot{v} + X_{\dot{w}} \dot{w} + X_{\dot{p}} \dot{p} + X_{\dot{q}} \dot{q} + X_{\dot{r}} \dot{r} \\
Y &= Y_0 + Y_u u + Y_v v + Y_w w + Y_p p + Y_q q + Y_r r + Y_{\dot{u}} \dot{u} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{w}} \dot{w} + Y_{\dot{p}} \dot{p} + Y_{\dot{q}} \dot{q} + Y_{\dot{r}} \dot{r} \\
Z &= Z_0 + Z_u u + Z_v v + Z_w w + Z_p p + Z_q q + Z_r r + Z_{\dot{u}} \dot{u} + Z_{\dot{v}} \dot{v} + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{\dot{p}} \dot{p} + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_{\dot{r}} \dot{r} \\
K &= K_0 + K_u u + K_v v + K_w w + K_p p + K_q q + K_r r + K_{\dot{u}} \dot{u} + K_{\dot{v}} \dot{v} + K_{\dot{w}} \dot{w} + K_{\dot{p}} \dot{p} + K_{\dot{q}} \dot{q} + K_{\dot{r}} \dot{r} \\
M &= M_0 + M_u u + M_v v + M_w w + M_p p + M_q q + M_r r + M_{\dot{u}} \dot{u} + M_{\dot{v}} \dot{v} + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_{\dot{p}} \dot{p} + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_{\dot{r}} \dot{r} \\
N &= N_0 + N_u u + N_v v + N_w w + N_p p + N_q q + N_r r + N_{\dot{u}} \dot{u} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{w}} \dot{w} + N_{\dot{p}} \dot{p} + N_{\dot{q}} \dot{q} + N_{\dot{r}} \dot{r}
\end{aligned} \tag{13}$$

Dans un premier temps nous calculons les composantes stationnaires pour différentes combinaisons d'angles de lacet, tangage et roulis pour une vitesse de l'écoulement relatif de 1 m/s (mouvement relatif permanent).

Puis nous imposons au panneau, placé dans l'écoulement relatif défini par ses orientations, une accélération constante et suivant une seule direction (1 m/s² ou 1 rd/s²). Nous lisons par une droite la courbe d'évolution de chacune des six composantes des efforts hydrodynamiques pour chacun des six mouvements imposés.

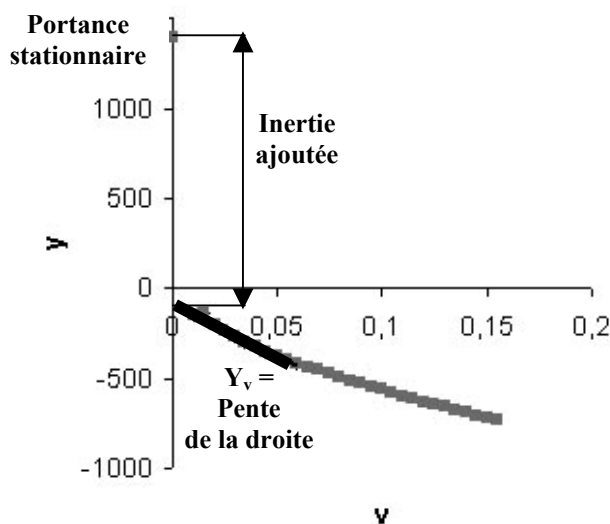


Figure 11 Détermination des efforts instationnaires (roulis 0° - lacet 30° - tangage 0°)

Le décalage entre la valeur à l'origine de cette droite et la valeur stationnaire de la composante considérée correspond aux effets de l'inertie ajoutée. La pente de la droite l'évolution de la composante considérée en fonction de la vitesse imposée. (La figure 11 illustre ce propos pour la composante perpendiculaire au panneau (portance) lorsqu'on impose un mouvement d'embarquée. On obtient la masse ajoutée en embarquée Y_v et le coefficient Y_v . (Un exemple de résultats est donné dans le tableau 1 de la page suivante)

III.3 Efforts hydrodynamiques stationnaires agissant sur les panneaux

Nous avons ainsi étudié les efforts stationnaires agissant sur un panneau pour 170 positions différentes du panneau. (Le calcul des efforts instationnaires n'a, pour l'instant, été fait qu'autour de la position d'équilibre obtenue dans les conditions usuelles de chalutage - roulis 30°, tangage 0°, lacet variable-).

Pour chaque triplet lacet – tangage – roulis du panneau, nous avons relevé les six composantes d'efforts calculés. Pour faciliter l'interprétation des résultats par le lecteur, nous

les présentons dans le repère absolu (Ox dirigé suivant la vitesse de chalutage, Oz dirigé vers le bas).

Les composantes X, Y et Z représentent respectivement la traînée, la force d'écartement latéral et la force de soulèvement qui s'exercent sur le panneau. Ces efforts sont exprimés sous forme de coefficients adimensionnels, en utilisant comme surface de référence la surface obtenue lorsque le panneau est posé à plat sur le sol. Les coefficients se déduisent des valeurs des forces et des moments X_0, Y_0, Z_0, K_0, M_0 et N_0 par application des trois matrices des rotations successives (lacet, tangage, roulis).

La figure 12 (planche couleur) présente les variations de ces coefficients en fonction des angles de lacet et roulis pour un angle de tangage nul. Nous avons obtenu le même type de variations pour des valeurs de tangage de plus et moins 15° .

On observe que le coefficient de portance C_y est maximal pour une incidence voisine de 30° quel que soit le roulis, ce qui est en accord avec les observations des pêcheurs. Cependant le coefficient de traînée C_x n'est pas minimal pour ces mêmes positions. La position optimale du panneau pourrait être définie soit comme la position pour laquelle la portance est maximale, soit comme celle qui induit le plus grand rapport portance / traînée. Les pêcheurs recherchent plutôt la force d'écartement maximale (plus grande ouverture du chalut).

$X_0= 97$					
$Y_0= 1393$					
$Z_0= 38$					
$K_0= -13$					
$M_0= 21$					
$N_0= -1030$					
$X_u= -297$	$X_v= -678$	$X_w= -73$	$X_{up}= -53$	$X_{vp}= 43$	$X_{wp}= -3$
$Y_u= 893$	$Y_v= -5659$	$Y_w= -505$	$Y_{up}= 34$	$Y_{vp}= -1476$	$Y_{wp}= -69$
$Z_u= 12$	$Z_v= -237$	$Z_w= -786$	$Z_{up}= -3$	$Z_{vp}= -70$	$Z_{wp}= -173$
$K_u= -13$	$K_v= 123$	$K_w= -318$	$K_{up}= 0$	$K_{vp}= 115$	$K_{wp}= -40$
$M_u= -13$	$M_v= -176$	$M_w= -507$	$M_{up}= 0$	$M_{vp}= -55$	$M_{wp}= -153$
$N_u= -768$	$N_v= 4362$	$N_w= 401$	$N_{up}= -1124$	$N_{vp}= 479$	$N_{wp}= -972$
$X_p= 44$	$X_q= -14$	$X_r= 50$	$X_{pp}= 0$	$X_{qp}= -1$	$X_{rp}= -97$
$Y_p= -214$	$Y_q= -499$	$Y_r= 7067$	$Y_{pp}= 118$	$Y_{qp}= -54$	$Y_{rp}= 1483$
$Z_p= -271$	$Z_q= -769$	$Z_r= 226$	$Z_{pp}= -41$	$Z_{qp}= -151$	$Z_{rp}= 58$
$K_p= -476$	$K_q= -349$	$K_r= -206$	$K_{pp}= -104$	$K_{qp}= -43$	$K_{rp}= -118$
$M_p= -167$	$M_q= -728$	$M_r= 142$	$M_{pp}= -45$	$M_{qp}= -169$	$M_{rp}= 49$
$N_p= 281$	$N_q= 462$	$N_r= -6751$	$N_{pp}= -1152$	$N_{qp}= -983$	$N_{rp}= -2719$

Tableau 1 Coefficients hydrodynamiques du panneau (Roulis 0° - Lacet 30°)

IV. Etude des mouvements du chalutier

IV.1 Equations du mouvement du navire – coefficients hydrodynamiques

Pour des raisons d'homogénéité et de facilité de programmation, nous étudions les mouvements du chalutier en utilisant encore les équations proposées par M.A. Abkowitz [9]. Toujours pour faciliter la lecture les équations présentées ci-dessous correspondent au cas d'un mouvement dans un plan horizontal (celles que nous pouvons utiliser pour l'étude de la manoeuvrabilité du train de pêche en eau calme). Mais nous pouvons aussi utiliser le système d'équations correspondant à un mouvement quelconque avec six degrés de liberté (cavalement, embardée, pilonnement, lacet, roulis et tangage). Ces équations sont linéarisées autour d'une position d'équilibre définie comme le navire avançant en ligne droite à vitesse constante. .

$$\begin{aligned}(X_u - m)\dot{u} + X_u(u - U_0) + X_v\dot{v} + X_v v + X_r\dot{r} + X_r r &= 0 \\ Y_u\dot{u} + Y_u(u - U_0) + (Y_v - m)\dot{v} + Y_v v + (Y_r - mx_G)\dot{r} + (Y_r - mU_0)r &= 0 \\ N_u\dot{u} + N_u(u - U_0) + (N_v - mx_G)\dot{v} + N_v\dot{v} + N_v v + (N_r - I_z)\dot{r} + (N_r - mx_G U_0)r &= 0\end{aligned}\quad (14)$$

Le calcul des différents coefficients hydrodynamiques du navire a été fait par Lionel Gentaz pour le NO Gwendrez (chalutier de recherche Ifremer) à l'aide d'un code « fluide parfait ».

Ce code ne prend donc pas en compte les effets de la viscosité. Mais l'influence la plus importante de la viscosité se trouve dans la résistance à l'avancement. Celle-ci est compensée par la poussée de l'hélice. C'est pourquoi ni la traînée du bateau ni la poussée de l'hélice n'interviennent explicitement dans ces équations.

Si le chalutier est soumis à d'autres actions extérieures qui modifient son état d'équilibre dynamique, les équations précédentes sont utilisables à condition d'y introduire les forces correspondantes. On peut le faire facilement en les écrivant dans le second membre, en pensant à les changer de signe (Pour écrire ces équations M.A. Abkowitz a écrit le principe fondamental de la dynamique sous la forme générale $\sum \vec{F}_{\text{ext}} - m\vec{\gamma} = 0$).

IV.2 Liaison chalutier – train de pêche

Pour l'instant nous n'étudions pas de manoeuvres de filage et ravalage. La longueur déroulée des funes est donc constante. Nous considérons qu'elles sont fixées sur le navire au niveau des axes des poulies du portique.

La liaison entre le navire et le train de pêche est donc modélisée en exprimant que l'action des funes sur le chalutier est due à la tension de leur premier élément et que le mouvement de l'extrémité des funes est imposé par le mouvement du bateau (relations cinématiques dans le repère lié au bateau).

IV.3 Autres forces extérieures agissant sur le chalutier

a) Poussée de l'hélice

Pour le navire seul et avançant à vitesse constante, nous avons déjà rappelé que la poussée de l'hélice compensait les efforts de traînée. Mais lorsque le chalutier est en pêche, l'hélice doit aussi compenser la traînée du chalut et de son gréement. Pour évaluer cet effort, il est nécessaire de faire un premier calcul en imposant au chalutier une vitesse constante

égale à la vitesse nominale du chalutage. On introduit dans les équations de nouvelles inconnues représentant les composantes du torseur de l'action de l'hélice. Il n'est pas nécessaire de trouver de nouvelles équations pour fermer le système, on remplace en fait la détermination de 6 paramètres de position par celle de six composantes d'un torseur.

Lorsque l'équilibre du chalutier est perturbé particulièrement en vitesse et en tangage la poussée de l'hélice peut varier. Nous ne sommes pas encore en mesure de tenir compte de ces modifications de poussée. Nous maintenons donc celle-ci généralement constante.

Nous pouvons aussi introduire une modulation de la poussée pour représenter, empiriquement et assez grossièrement, l'action du capitaine sur sa barre d'avance.

b) Action du safran

Nous ne disposons pas d'études précises sur les efforts engendrés par le safran du Gwendrez. Pour provoquer une giration du chalutier, on applique donc une force transversale au centre du safran. Cette force est déterminée empiriquement pour obtenir le rayon de giration souhaité.

V. Exemples

V.1 Equilibre du chalut

Les figures 13 (planche couleur) présente la forme prise par un chalut remorqué à vitesse constante. Le dégradé de couleur permet de visualiser les variations de la tension des fils : en rouge les plus élevées, en bleu les plus faibles. (Attention les flotteurs sont représentés en bleu et les lests en rouge). On observe la très bonne symétrie de la forme obtenue. Le chalut apparaît bien réglé. On peut cependant remarquer un certain flou au niveau des pointes d'ailes. Il n'a pas été recherché, mais il montre l'aptitude de notre méthode à prendre en compte des mailles détendues.

V.2 Simulation d'une croche

La croche est un événement ponctuel particulièrement dangereux pour les arts traînants. Elle peut non seulement causer des avaries à l'engin mais aussi compromettre la sécurité de l'équipage et du navire dans des conditions extrêmes (d'après Jean-Paul George [1]). Elle est due au blocage d'un élément du train de pêche par obstacle sur le fond (ou entre deux eaux).

L'étude des accidents de pêche pour en rechercher les causes et en comprendre le déroulement est fondamental pour diminuer le nombre de ces accidents et en limiter les conséquences. Ces études peuvent aussi être utiles pour la recherche d'éventuelles responsabilités. Or, par nature ces accidents n'ont pas de témoins. L'essentiel se passe sous la mer, donc sans observateur. Souvent, la rapidité de l'évènement ne permet même pas aux personnes à bord du chalutier de bien réaliser ce qui s'est passé et donc d'en faire un récit précis. Les trains de pêche ne sont pas équipés d'enregistreurs des nombreux paramètres qui seraient utiles pour une analyse même grossière. Principalement pour des raisons d'échelle et de modélisation des obstacles, une reconstitution des accidents à l'aide de modèles réduits n'est pas envisageable. La modélisation numérique apparaît alors comme le seul outil réellement utilisable. C'est pourquoi nous présentons l'étude d'un accident fréquent en pêche : la croche.

Nous présentons ici l'étude de croche comme étant l'arrêt brutal d'un point du bourrelet situé environ au quart de la longueur de ce dernier du côté tribord. La croche est dissymétrique. Pour la simuler nous bloquons les coordonnées du nœud correspondant. Dans

cet exemple nous maintenons la poussée de l'hélice constante (le pilote ne s'est pas rendu compte de l'accident !). Il serait possible de prévoir une réaction du pilote qui arrêterait la poussée de l'hélice avec un certain retard.

Les figures 14 et 15 (planche couleur) présentent l'évolution de la forme du chalut durant la croche. Le bourrelet est stoppé. Le filet s'arrête donc aussi. L'action des flotteurs soulève la corde de dos.

La tension de la fune tribord croît très rapidement et de manière très importante (figure 16). Elle est multipliée par un facteur 8 en 2,5 secondes ! Par contre, la fune bâbord se détend complètement.

Dans le même temps, l'importance de la tension la tension tribord arrête complètement le chalutier et le fait même reculer malgré la poussée de l'hélice (figure 17).

Puis le train de pêche va tendre vers un nouvel équilibre où la tension de la fune tribord sera compensée par l'action de l'hélice. La durée de recherche de cet équilibre est assez longue car elle fait intervenir tous les couplages entre tous les mouvements du navire et la forme du chalut. Dans cette phase les amortissements visqueux jouent un rôle important. C'est pourquoi nous arrêtons les calculs assez rapidement.

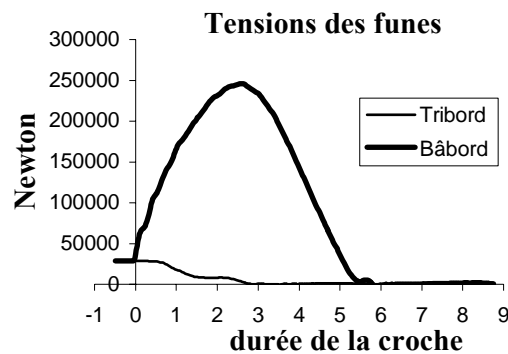


Figure 16. Evolution des tensions des funes durant la croche

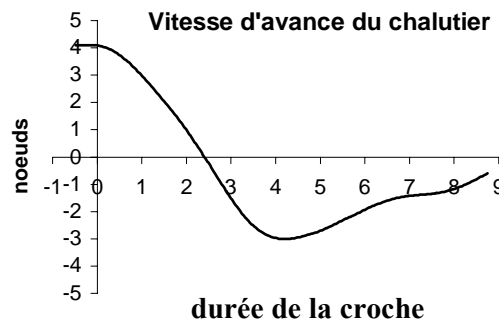


Figure 17. Vitesse « d'avance » du chalutier durant la croche

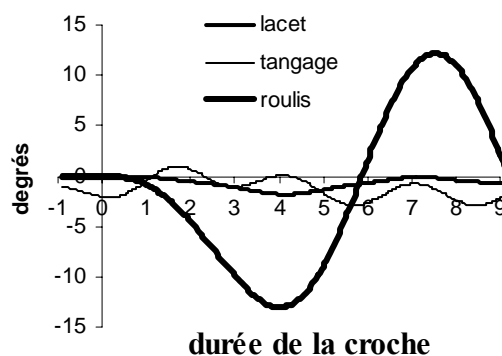


Figure 18. Evolution des angles du bateau durant la croche

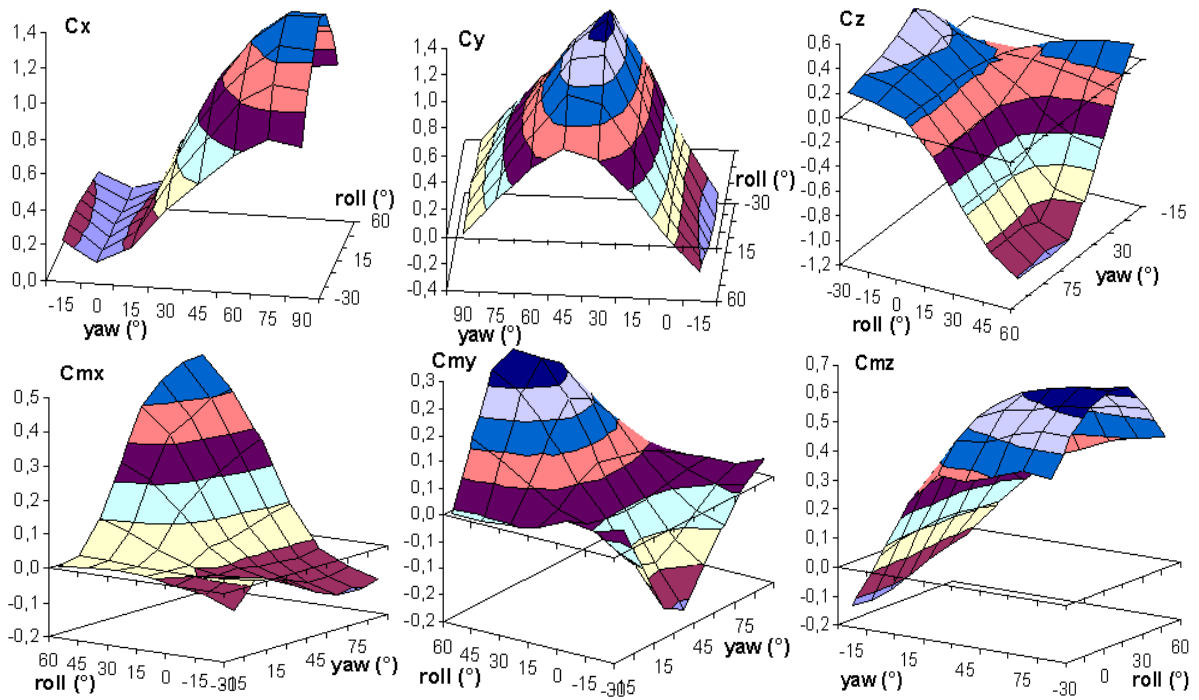
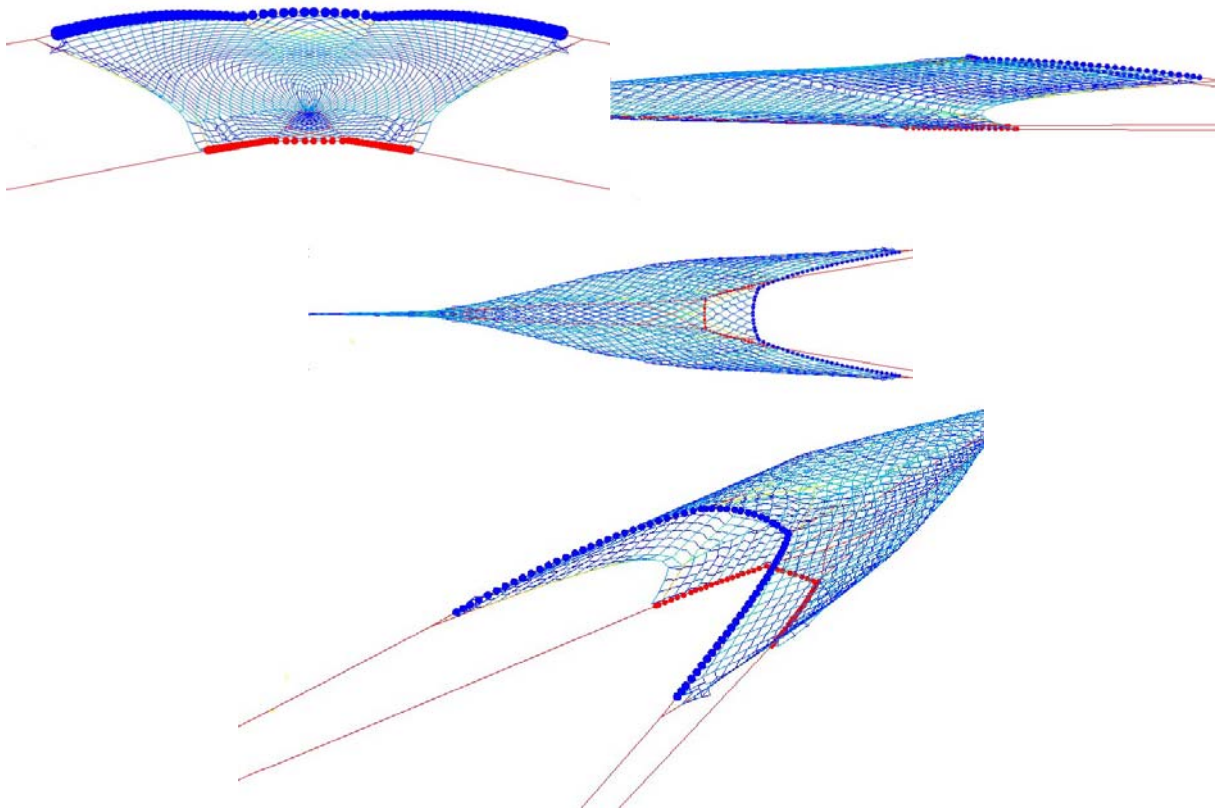
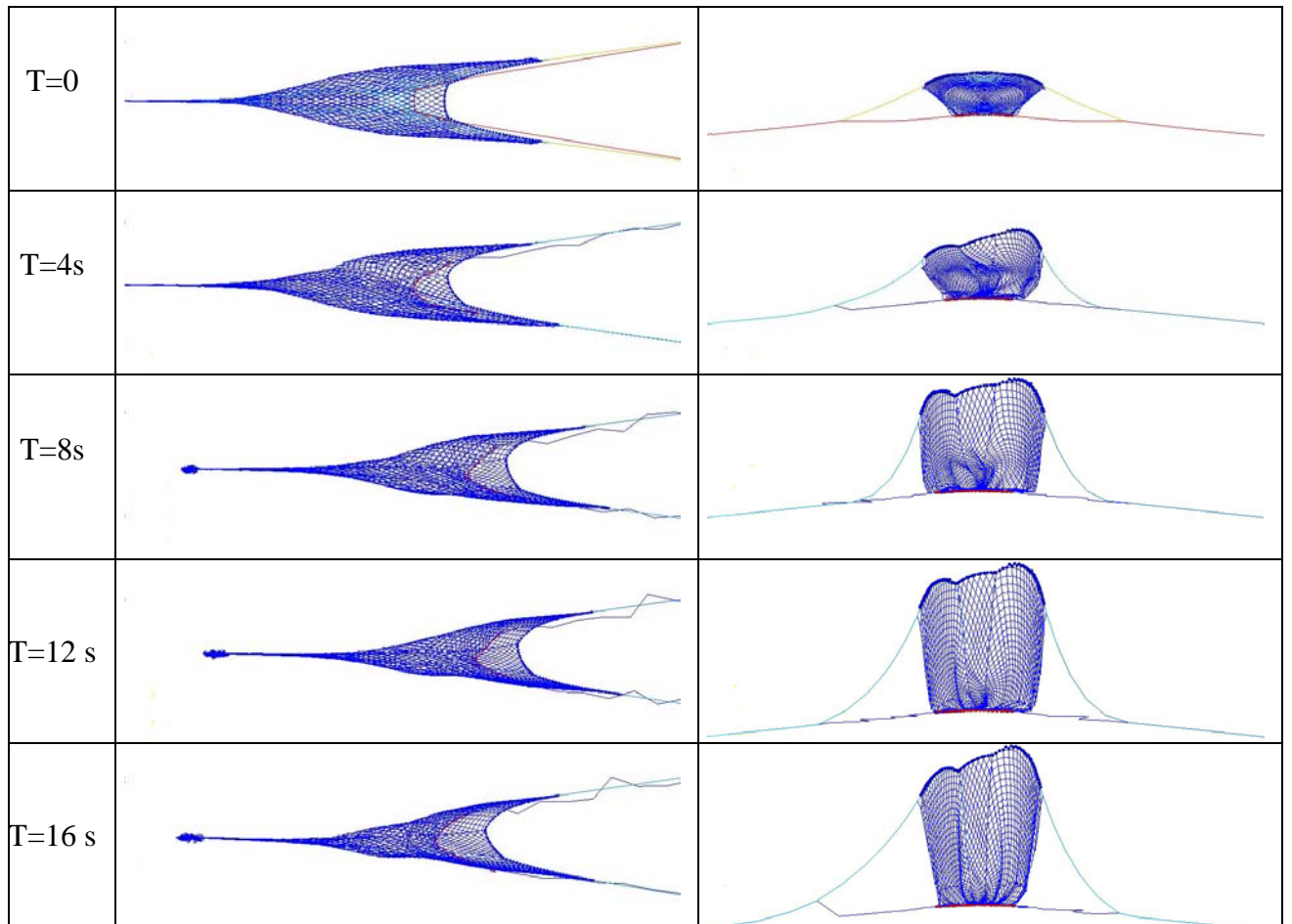


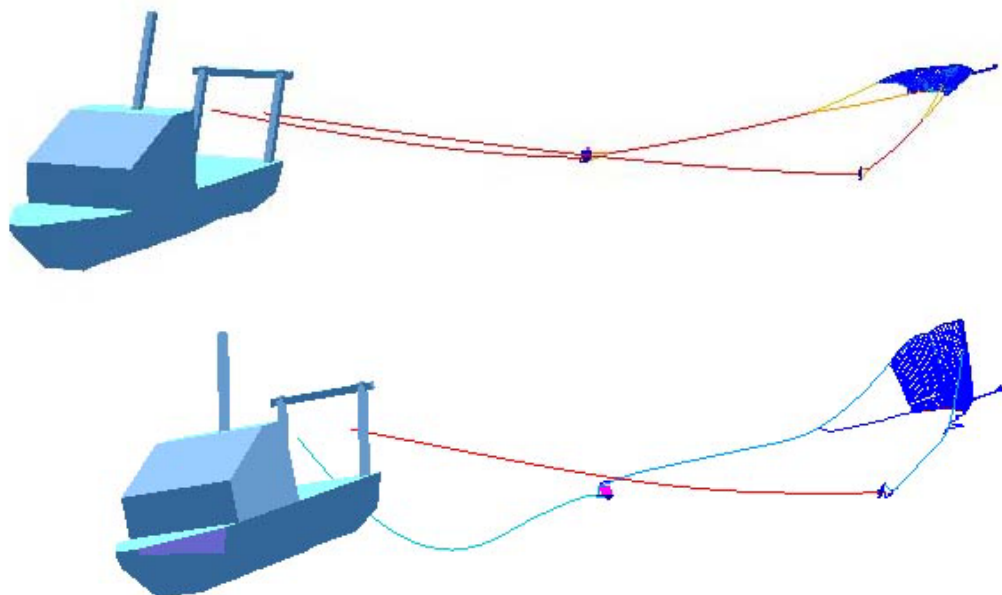
Figure 12. Variations des coefficients pour un tangage nul



Figures 13. Equilibre d'un chalut remorqué à vitesse constante (Vues de face, coté, dessus et perspective)



*Figures 14. « Chronophotographie » d'une croche dissymétrique
(Vues de dessus et de face)*



Figures 15. Aspect global du train de pêche avant la croche et à la fin de la croche

La figure 18 présente l'évolution des angles caractéristiques du navire. Les inerties du chalutier font que c'est avec un certain retard (une seconde environ) que l'on peut constater les effets de la croche sur angles du chalutier. Le roulis provoqué par la dissymétrie de la croche devient très important. Les effets de la croche sur le lacet et le tangage sont plus limités. En ce qui concerne le tangage, les oscillations semblent être dues à un couplage entre les mouvements des panneaux et les mouvements du navire. Ces oscillations apparaissent même lorsque l'on recherche "l'équilibre" du train de pêche. Elles ne s'amortissent pas et semblent être entretenues par les effets portants des panneaux qui sont animés de mouvements périodiques semblables dans l'écoulement relatif.

VI. Conclusion

L'exemple proposé montre l'efficacité de notre méthode. Les résultats obtenus sont satisfaisants et conformes aux observations pratiques. Mais il met aussi en évidence que malgré l'importance du travail déjà réalisé, il reste encore beaucoup à faire. Il faut sans doute affiner le calcul des coefficients hydrodynamiques du chalutier, en particulier, les coefficients d'amortissement si on veut obtenir une simulation précise de la seconde phase de la croche. Les méthodes employées sont lourdes et il n'est pas encore possible d'envisager de les appliquer couramment. Enfin, nous espérons pouvoir valider certains résultats par des essais à la mer.

Bibliographie

- [1] George J.P. (2005) *Les croches et les arts traînants* Editions Ifremer
- [2] Belov V.A. et autres (1987) *Engins de pêche remorqués* Editions Agropromizdat Moscou
- [3] Théret F. (1993): *Etude de l'équilibre de surfaces réticulées placées dans un courant uniforme*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes
- [4] Bessonneau J.-S. (1997): *Etude dynamique de surfaces réticulées souples et immergées*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes
- [5] Landweber L. and Protter M.H. (1947): *The shape of a light flexible cable in a uniform current*, Journal of Applied Mechanics, June 1947, pp. 121-126
- [6] Aarnes J.V., Rudi H., Loland G. *Current forces on cages, net deflection Engineering for offshore fish farming*. Glasgow, UK, Thomas Telford pp. 137-152
- [7] Marichal D. (2005) *Can the CFD help in the conception of the fishing gears? Study of hydrodynamic forces acting on nets* CANCAM 2005, Montréal 30 mai - 2 juin 2005
- [8] Marichal D. (2006) *Etude des efforts hydrodynamiques instationnaires sur les panneaux de chalut* Etude pour Ifremer contrat 2004 2 2003141
- [9] Abkowitz M. A. (1969): *Stability and Motion Control of Ocean Vehicles, Course of Instruction in Ocean Engineering*, Massachusetts Institute of Technology
- [10] Marichal D. , Gentaz L. *Dynamique du navire appliquée au Gwendrez et ses panneaux pour intégration dans DynamiT* Etude réalisée pour IFREMER Contrat 2005 2 22734203