

# ETUDE NUMERIQUE DU TRAIN DE PECHE D'UN CHALUTIER

---

D.E.A option hydrodynamique  
Octobre 1990

---

François THERET  
Responsable : Dominique MARICHAL

Laboratoire d'Hydrodynamique Navale  
E.N.S.M  
1 rue de la Noë 44072 Nantes Cedex  
Tel : 40.37.16.00

I.F.R.E.M.E.R  
8 rue François Toullec  
56100 Lorient  
Tel : 97.83.46.47  
97.87.73.10

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	1
INTRODUCTION.....	2
PREMIERE PARTIE : ETUDE NUMERIQUE DES CHALUTS.....	4
1. PRESENTATION DU TRAIN DE PECHE D'UN CHALUTIER.....	4
1.1. <i>Le chalut</i> .....	4
1.1.1. Le chalut de fond.....	5
1.1.2. Le chalut pélagique.....	6
1.2. <i>Le gréement</i> .....	6
1.3. <i>Les panneaux divergents</i> .....	7
1.4. <i>les funes</i> .....	7
1.5. <i>Cas du chalutage en boeufs</i> .....	7
1.6. <i>Le plan de chalut</i> .....	7
2.METHODE DE RESOLUTION.....	8
3. DESCRIPTION DU CHALUT.....	9
3.1. <i>Description des noeuds</i> .....	9
3.2. <i>Description des fils et des singularités</i> .....	14
3.3. <i>Description de la forme initiale</i> .....	14
4. LES EFFORTS.....	16
4.1. <i>Efforts hydrodynamiques</i> .....	16
4.1.1. Hypothèses de travail.....	16
4.1.2. Repère de travail.....	16
4.1.3. Forces de traînée et de pression.....	18
4.1.4. Forces de frottement.....	19
4.2. <i>Efforts de pesanteur</i> .....	20
4.3. <i>Efforts dûs aux singularités</i> .....	20

5. EQUILIBRE DES NOEUDS.....	21
5.1. Noeuds à deux fils "supérieurs".....	21
5.1.2. Résolution.....	23
5.1.2.1. Calcul des tensions.....	23
5.1.2.2. Calcul des coordonnées des noeuds.....	24
5.1.3. Autres noeuds à deux fils "supérieurs".....	26
5.2. Noeuds à un fil "supérieur".....	26
5.2.1. Cas d'un noeud à quatre fils.....	26
5.2.1.1. Calcul des tensions.....	27
5.2.1.2. Calcul des coordonnées des noeuds.....	27
5.2.2. Autres noeuds à un fil supérieur.....	28
6. PRISE EN COMPTE DE LA SYMETRIE DU CHALUT.....	29
7. METHODE ITERATIVE.....	30
8. PRESENTATION DE QUELQUES RESULTATS.....	32
DEUXIEME PARTIE : DETERMINATION EXPERIMENTALE DES COEFFICIENTS	
HYDRODYNAMIQUES D'UN PANNEAU DE CHALUT.....	
1. DEFINITION.....	33
2. METHODE DE CALCUL DES COEFFICIENTS HYDRODYNAMIQUES.....	34
3. MONTAGE EXPERIMENTAL.....	35
4. MESURES.....	37
4.1. Contrôle de l'inclinaison du panneau.....	37
4.2. Mesure de l'incidence.....	38
4.3. Mesure de la vitesse.....	38
4.4. Mesure des tensions.....	39
5. CALCUL DES COEFFICIENTS HYDRODYNAMIQUES.....	39
5.1. Calcul des coordonnées des points 4 et 5.....	39
5.2. Calcul de $C_d$ et $C_l$ .....	40
6. RESULTATS.....	41
ESSAIS EN MER.....	
1. MATERIEL UTILISE.....	43
1.1. Matériel de pêche.....	43
1.2. Matériel de mesure.....	44
2. METHODOLOGIE.....	44
3. RESULTATS.....	45

# ETUDE NUMERIQUE DU TRAIN DE PECHE D'UN CHALUTIER

## AVANT PROPOS

### " Ma part dans ce travail "

IFREMER s'était associé au LHN (via sa filiale SIREHNA) pour amorcer, dans le cadre d'une thèse d'université, l'étude d'un logiciel de CAO des chaluts.

Après une phase d'études bibliographique et expérimentale et quelques essais numériques le chercheur qui était chargé de cette étude a abandonné ses travaux sans vouloir tester une méthode proposée par Dominique MARICHAL.

IFREMER a bien voulu me libérer d'une partie de mes obligations pour me permettre de préparer ce DEA d'hydrodynamique (je profite de l'occasion pour remercier G.MASSART et Ph.MARCHAND pour m'avoir permis de préparer ce diplôme).

J'ai donc suivi l'enseignement théorique à Nantes jusqu'en février et ensuite J'ai effectué mon stage de recherche au laboratoire d'essais de chaluts de Lorient.

Mon travail de stage peut être décomposé en trois parties :

- la première ne peut être relatée dans un tel rapport mais elle correspond à des heures effectivement passées, à de nombreux problèmes résolus et à plusieurs déplacements. Elle a consisté à implanter à Lorient une station de travail reliée au CYBER 992 du centre de calcul de l'IFREMER à Brest. Outre les problèmes physiques, les habitudes de travail de ce centre sont assez différentes de celles que j'avais prises à Nantes. Il m'a fallu en effectuer une synthèse.

- pour la seconde partie j'ai analysé les premiers résultats de la méthode proposée par D.MARICHAL et j'ai pu apporter une modification qui a supprimé un défaut grave (apparition de fils à tensions négatives).

- la troisième partie s'est effectuée dans le cadre d'un contrat confié par la communauté européenne à l'IFREMER. J'ai participé à la mise au point du montage de la méthode expérimentale et aux essais en bassin (en collaboration avec Marc MEILLAT). Ces essais sur modèles réduits de panneaux ont été complétés par des essais en mer dont j'ai assuré une partie de la responsabilité comme chef de mission lors d'une campagne à bord du GWEN DREZ.

## INTRODUCTION

### Désirs de l'IFREMER.

L'objectif de l'IFREMER est la mise au point d'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.

Au plan international il n'existe que deux stratégies d'approche de ce problème :

- la première repose sur des études statistiques sur des filets existants (limités à pratiquement la reproduction à des échelles différentes), mais cette démarche ne permet pas l'innovation car elle n'est applicable qu'à des filets du même type que ceux déjà essayés.

- la seconde consiste à réaliser un "assemblage" de pièces essayées de manières isolées. Les essais sont réalisés sur des panneaux rectangulaires ou des troncs de cône de filet rigidifiés par des enduits ou des tensions non réalistes. Il n'apparaît pas de lois de similitude et donc de possibilités de généralisation des résultats.

La solution que nous proposons est celle d'un modèle numérique, basé sur une approche originale et plus générale du problème.

### Principe du modèle.

Dans un premier temps nous devons décrire entièrement le filet maille par maille, et donner une forme initiale au chalut.

Puis nous écrivons les équations d'équilibre de tous les noeuds.

Ensuite nous appliquons une méthode itérative qui, partant de la forme initiale, s'arrête lorsque le chalut a trouvé sa forme d'équilibre.

Le travail de Dominique MARICHAL a permis de montrer que la solution était "viable".

On relève pourtant les défauts suivants :

- présence de tensions négatives.
- difficulté pour représenter certaines coupes et coutures.

### Améliorations que j'ai apportées.

- découpage des fils en deux morceaux pour leur permettre de prendre une certaine courbure. Ceci entraîne l'introduction de noeuds fictifs, et multiplie globalement par trois le nombre d'équations à résoudre.
- introduction de la symétrie par rapport au plan vertical.
- introduction de nouveaux types de noeuds.

### Perspectives.

Compte tenu du nombre élevé de noeuds constituant le filet, même dans cas d'une maquette de chalut, le 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.

Une réflexion est déjà amorcée mais il subsiste de nombreuses difficultés liées au fait qu'une structure réticulée est par définition constituée par un matériau discontinu et anisotrope dont les lois de comportement sont inconnues.

Ce travail numérique a été complété par une partie expérimentale liée à un contrat européen confié à l'IFREMER sur l'étude comparative des performances des panneaux de chalut les plus couramment utilisés.

Les résultats de cette étude seront utiles par la suite pour décrire les efforts dus aux panneaux.

## PREMIERE PARTIE

### ETUDE NUMERIQUE DES CHALUTS

Ce travail a donc pour objectif de déterminer les formes et les tensions d'un chalut en pêche, à partir d'un plan de coupe connu.

Dans un premier temps, la méthode itérative que nous proposons permettra de calculer la forme d'équilibre du filet soumis à un courant uniforme correspondant aux conditions moyennes de l'écoulement, à partir d'une forme initiale imposée arbitrairement. Pour cette phase la convergence est longue à obtenir.

Puis, pour étudier l'influence de différents paramètres nous partirons de cette forme.

#### *1. PRESENTATION DU TRAIN DE PECHE D'UN CHALUTIER.*

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

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

##### *1.1. Le chalut.*

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

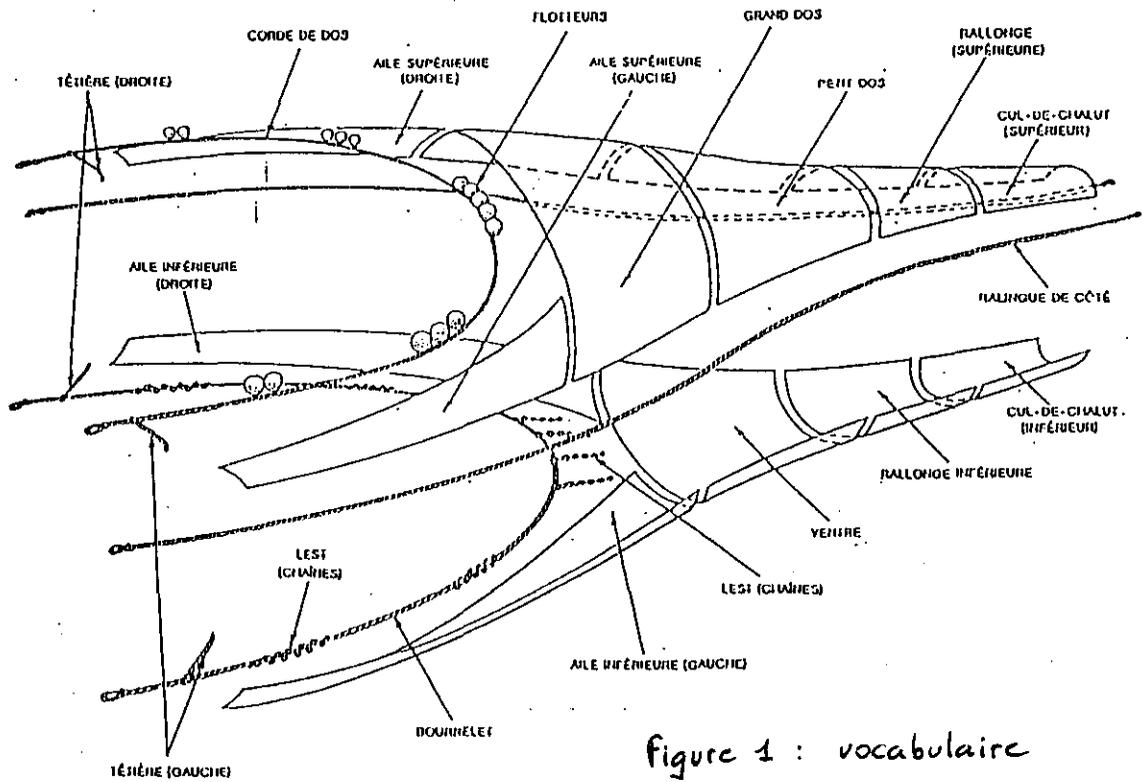


Figure 1 : vocabulaire

### 1.1.1. Le chalut de fond.

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

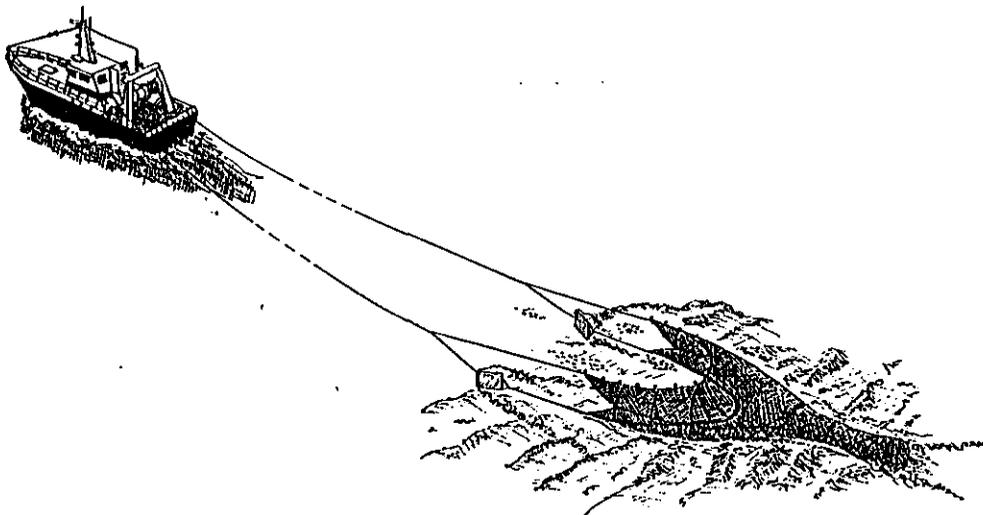


figure 2 : chalutage de fond.

Ce type de chalut est utilisé aujourd'hui dans des fonds de 30 à 1200 mètres. Des campagnes de prospection sont envisagées jusqu'à 1500 mètres.

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

### 1.1.2. Le chalut pélagique.

Les quatre faces qui constituent le filet sont symétriques : sur le plan la face supérieure est identique à la face inférieure, les faces de côté sont les mêmes. L'ouverture verticale du chalut est assurée par des lests situés en avant de sa partie inférieure. L'ouverture horizontale est, ici aussi, réalisée par des panneaux divergents. On obtient ainsi un chalut présentant une réelle symétrie par rapport au plan vertical.

L'ensemble du train de pêche évolue en pleine eau de la surface jusqu'à des sondes pouvant atteindre 300 mètres.

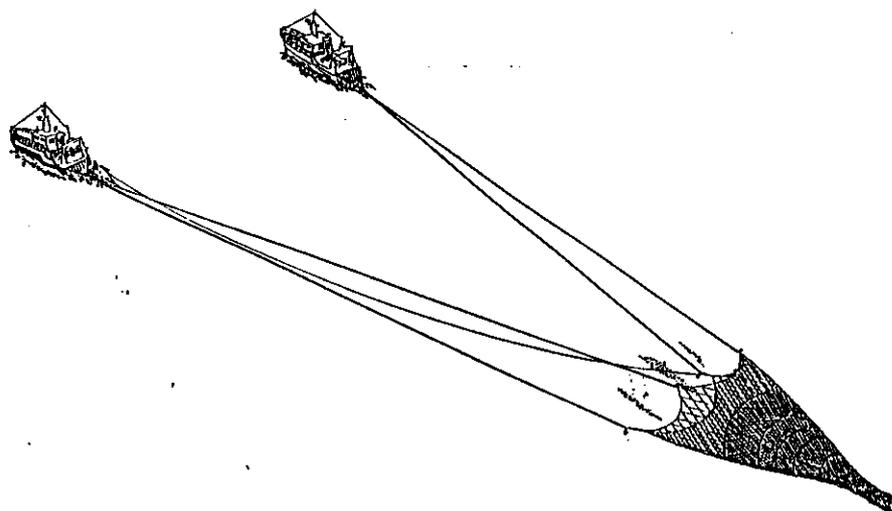


figure 3 : chalutage pélagique.

A titre d'exemple un chalut pélagique remorqué par un navire d'une puissance de 1200 Ch a les caractéristiques suivantes : ouverture verticale 40 m ; ouverture horizontale 80 m ; longueur 250 m.

### 1.2. Le gréement.

Le gréement est constitué de l'ensemble des câbles situés entre le chalut et les panneaux divergents. Leur variété est grande mais étant tous constitués de fils ils pourront tous être pris en compte par notre méthode.

### *1.3. Les panneaux divergents.*

Ces surfaces portantes sont de formes très variées et adaptées au métier pratiqué par le chalutier. En général, en chalutage de fond, leur angle d'attaque est compris entre 35 et 40 degrés (conditions hydrodynamiques défavorables). Dans ces conditions on comprend que leurs performances pourraient être améliorées. Cependant, en pêche, pour être efficaces, les panneaux doivent être très stables de comportement ceci quels que soient la nature du fond (vase, sable, roche,...), les conditions météorologiques (mauvais temps, courants,...) et le travail effectué par le patron du chalutier (virage, demi-tour,...). Ces différentes contraintes ont amené les fabricants à ne pas, jusqu'à ce jour, proposer de divergent du type aile.

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

### *1.4. les funes.*

Les funes sont les câbles qui relient le chalut au navire. Leur prise en compte dans le calcul ne pose pas de problème.

### *1.5. Cas du chalutage en boeufs*

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

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

### *1.6. Le plan de chalut.*

Nous présentons ici le plan du chalut qui est utilisé pour cette étude. Il correspond à la maquette d'un chalut pélagique qui sera utilisé comme modèle réel pour la validation expérimentale de notre code de calcul.

Sur un tel plan on trouve l'ensemble des données qui décrivent le chalut. Les plans de chaluts sont toujours réalisés avec cette présentation.

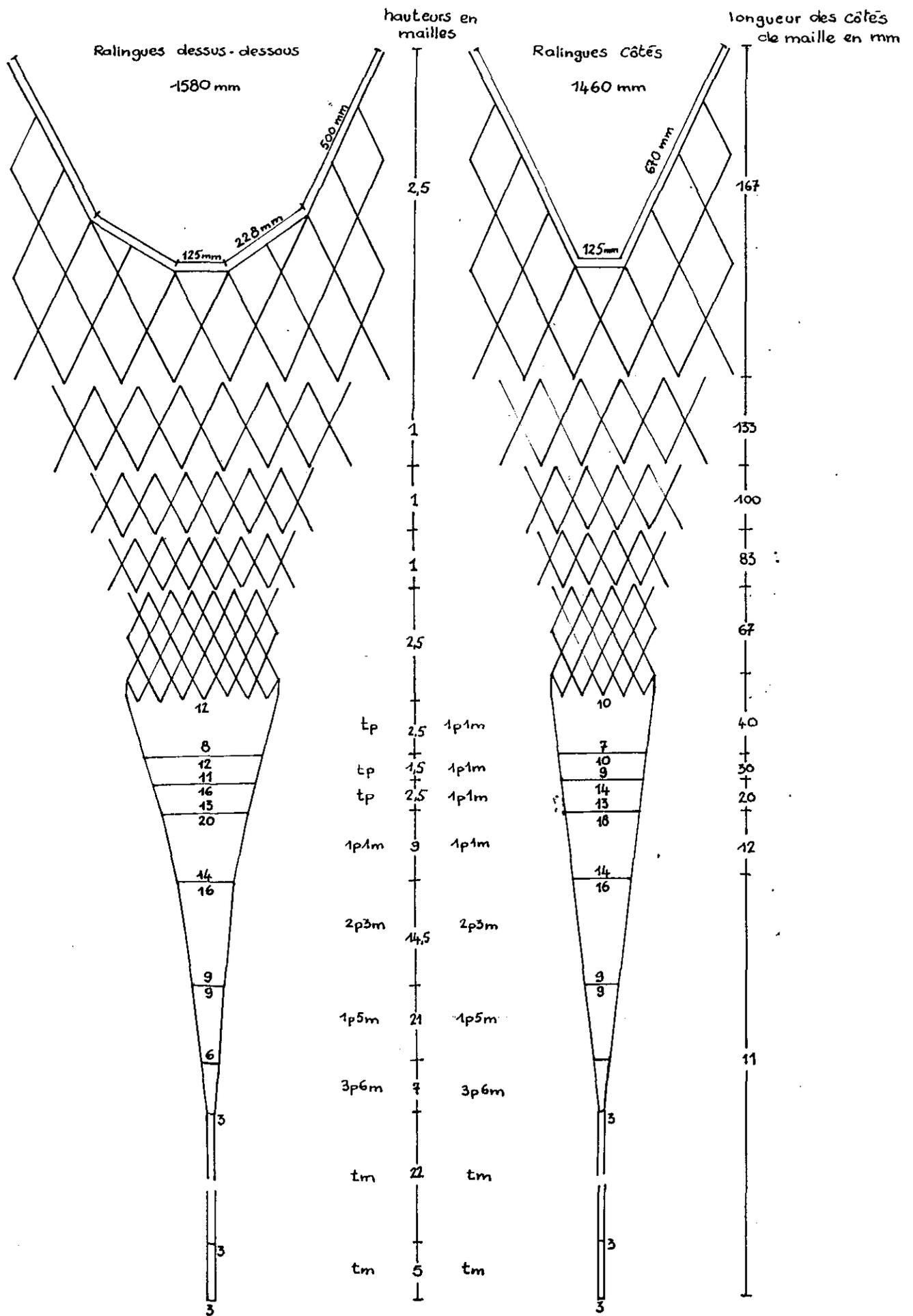


figure: 4

MAQUETTE DU CHALUT PÉLAGIQUE 47,00 x 43,00	
ROSELYS - P 154 modifié.	
INSTITUT DES PÊCHES MARITIMES.	LORIENT . avril 82

Fils

tout en 20.000 m/kg.

Cordages

tout en 20.000 m/kg. à 0,3 mm

Echelle de la maquette : 1/30<sup>e</sup>

## 2.METHODE DE RESOLUTION.

Notre méthode consiste à écrire les équations d'équilibre de chacun des noeuds du chalut, chaque noeud étant assimilé à un point matériel.

Les équations ainsi obtenues sont non linéaires pour plusieurs raisons :

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

- les efforts hydrodynamiques agissant sur les éléments de fil sont des expressions complexes des coordonnées des noeuds.

- le respect de la longueur des côtés de mailles fait intervenir des équations par nature non linéaires.

L'ordre du système est également très élevé puisque si  $N$  est le nombre de noeuds introduits (plusieurs milliers pour une maquette complète) on peut estimer à environ :

- $3N$  le nombre de coordonnées à déterminer

- $2N$  le nombre de tensions

On a donc imaginé une méthode itérative permettant une résolution progressive de ce système.

On part d'une forme arbitraire respectant les liaisons. On calcule les efforts hydrodynamiques qui agiraient dans cette configuration. Puis on utilise une partie des équations d'équilibre pour déterminer les valeurs des tensions pour cette forme. Les équations restantes permettent de calculer une nouvelle forme en accord avec ces efforts internes ....

Il faut définir un critère de convergence. Pour l'instant il porte sur la stabilité de la solution obtenue d'une itération à l'autre.

Cette méthode impose dans un premier temps la création de fichiers décrivant parfaitement le chalut et son gréement. Nous allons donc créer un procédé de numérotation des noeuds et des fils qui permet cette description. Puis nous les positionnerons dans l'espace afin de définir une forme initiale du chalut.

Le repère absolu pour l'étude est le suivant :

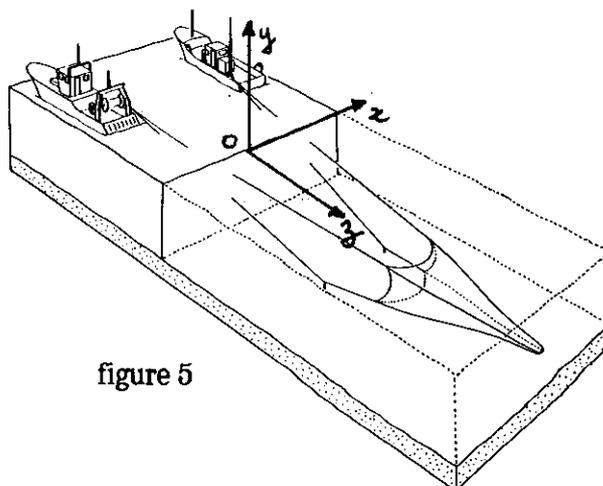


figure 5

### 3. DESCRIPTION DU CHALUT.

A partir du plan du chalut, il faut extraire toutes les données nécessaires au bon fonctionnement du programme informatique.

Ces données sont regroupées dans les 3 tableaux suivants:

- Description des noeuds.
- Description des fils et des singularités.
- Description de la forme initiale.

Ces tableaux doivent aujourd'hui être générés à la main

#### 3.1. Description des noeuds.

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

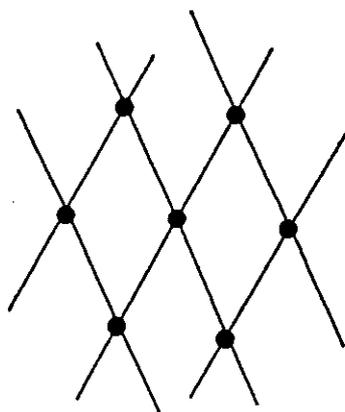


figure 6

Cette limitation à quatre fils est imposée par le nombre d'équations disponibles pour écrire les relations d'équilibre des noeuds

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

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

Nous avons été amenés à distinguer trois familles de noeuds:

- Noeuds à 4 fils.

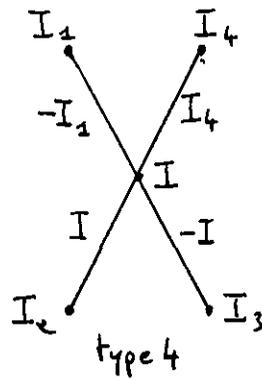


figure 7

- Noeuds à 3 fils.

Ils permettent de décrire des mailles hexagonales ou des coupes :

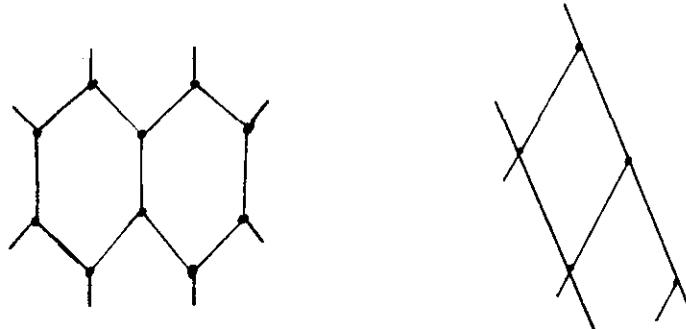


figure 8

Ils sont indispensables pour réaliser les liaisons entre les différentes pièces du chalut.

Nous avons retenu 4 types de noeuds :

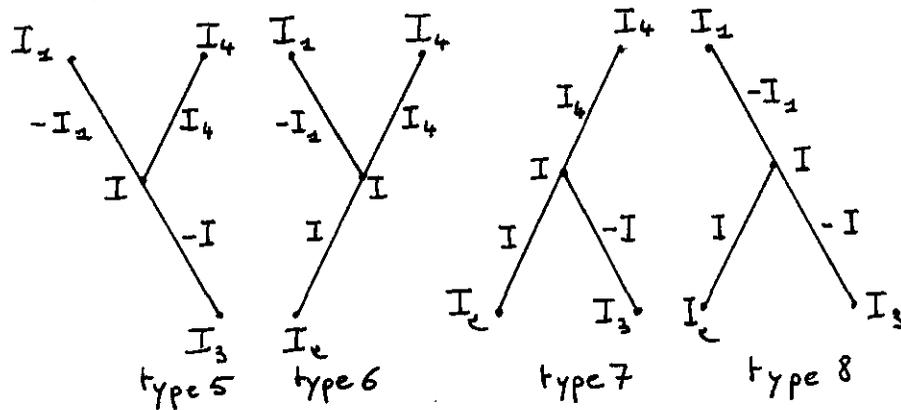


figure 9

- Noeuds à 2 fils.

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

Le milieu de chaque côté de maille sera pour nous un noeud à deux fils.

5 types de noeuds ont été retenus:

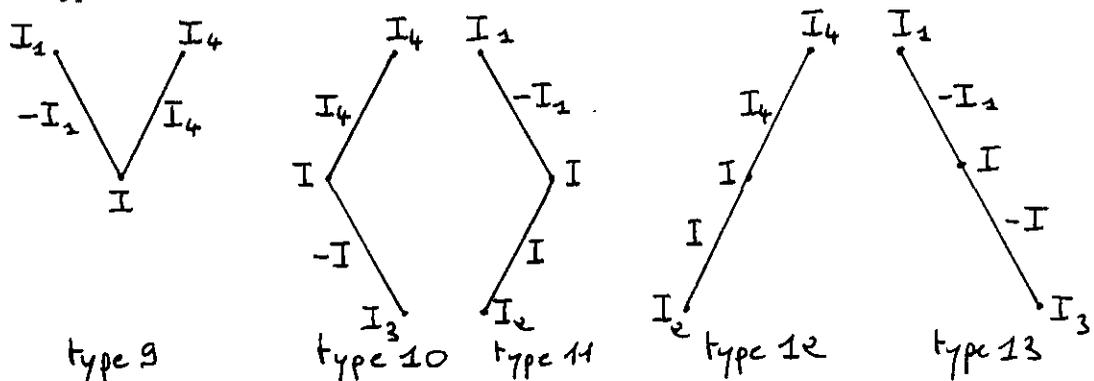


figure 10

Remarque

Il faut distinguer :

- Les noeuds au sens mécanique générale. Ce sont en fait les points géométriques du filet auxquels nous affecterons une masse et dont nous écrirons l'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 alèzes de type "sans noeud". Il s'agit là d'une dénomination commerciale qui précise que ces surépaisseurs sont pratiquement négligeables, mais les fils sont bien reliés entre eux.

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

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

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

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

I	type	$I_2$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$-I_2$	+I	-I	$I_4$
86	18	-89	0	0	89	-86	0	0	-86
87	12	0	100	0	83	0	87	0	83
88	13	83	0	101	0	-83	0	-88	0
89	14	86	103	104	84	-86	89	-89	84
90	4	85	105	106	85	-85	90	-90	85
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

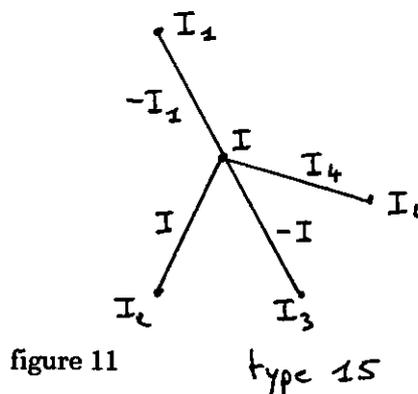
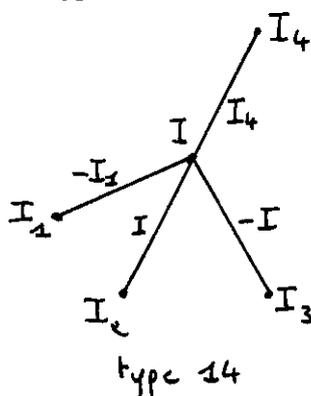
tableau 1 : tableau de liaison

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

#### - Noeuds particuliers

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

Ces deux types de noeuds sont les suivants :



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

- le type 16 pour relier le noeud I de type 14 à son voisin  $I_1$  par l'intermédiaire d'un fil  $-I_1$  :

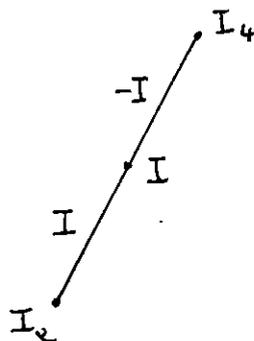


figure 12

- le type 17 pour raccorder le noeud  $I_4$  d'un noeud de type 15 :

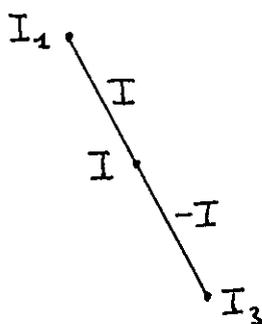


figure 13

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

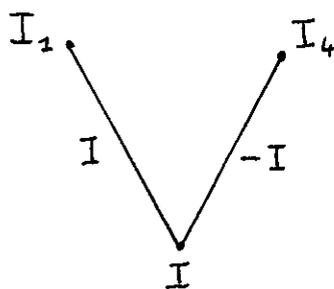


figure 14

A l'aide de ces types de noeuds nous pouvons maintenant entrer dans le tableau de liaison tous les points qui définissent le chalut que nous étudions. Il est possible que nous soyons amenés à introduire de nouveaux "types" lorsque nous étudierons d'autres forme de chaluts.

### 3.2. Description des fils et des singularités.

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

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)	$\eta(I)$	$\eta(-I)$	$S_x(I)$	$S_y(I)$	$S_z(I)$
22	83.5	0.	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
23	0.	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
24	83.5	0.	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
25	0.	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
26	83.5	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
27	83.5	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
28	83.5	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
29	83.5	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
30	83.5	0.	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
31	0.	83.5	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.
32	83.5	0.	0.3	0.3	0.	0.	0.	0.	0.

tableau 2 : extrait d'un fichier fil

Une des difficultés de cette méthode est le temps nécessaire à l'écriture manuelle de ces tableaux. Il sera indispensable, pour une utilisation systématique de ce logiciel de concevoir un mailleur automatique qui génère ces tableaux.

### 3.3. Description de la forme initiale.

Avant de lancer le calcul nous devons donner une forme initiale au chalut. Les coordonnées de chacun des noeuds sont rassemblées dans un tableau "fichier ini":

I	$X_o(I)$	$Y_o(I)$	$Z_o(I)$
38	212.53	-384.44	327.22
39	249.31	-363.83	329.04
40	259.49	-322.51	326.45
41	259.49	-67.49	326.45
42	249.31	-26.17	329.04
43	212.53	-5.56	327.22
44	194.15	-382.87	408.65
45	215.51	-375.38	410.18
46	233.90	-365.08	411.09
47	246.60	-347.08	410.80
48	251.68	-326.42	409.50

tableau 3 : extrait d'un fichier ini

La création de ce fichier est complexe et constitue une des difficultés qu'il faudra résoudre dans l'avenir.

Le principe de détermination de cette forme arbitraire peut être sommairement résumé ainsi :

Pour la partie antérieure du filet qui correspond aux ailes (gueule du chalut) nous enroulons fictivement une nappe rectangulaire de filet sur un cylindre circulaire. Les dimensions de la nappe sont fixées par le nombre de rangées de mailles et le nombre de mailles dans une rangée lorsqu'il n'y a pas de découpe. Le diamètre du cylindre est fixé arbitrairement en fonction des caractéristiques prévisibles (ou souhaitées) de l'ouverture. Le filet est tendu sur ce cylindre de façon à respecter les liaisons des fils. Il est facile de déterminer alors les coordonnées de tous les noeuds introduits. On élimine tous ceux qui n'ont pas d'existence physique pour ne conserver que les ailes.

Puis le chalut comporte un certain nombre de pièces rectangulaires. L'initialisation est alors obtenue par un calcul géométrique qui permet une certaine fermeture du filet. "Étage par étage", les positions des noeuds sont calculées de façon à ce que le filet soit le plus tendu possible ("z" maximum) en respectant les liaisons avec les noeuds précédents.

Enfin lorsque les pièces présentent des découpes obliques, on reprendra le même principe mais il n'est possible de l'appliquer qu'à un (ou à la limite quelques) rang(s) à la fois. Il faut "faire converger" en partie le filet ainsi limité pour permettre aux mailles de trouver une forme régulière éliminant les distorsions et impossibilités physiques que feraient apparaître une simple application de la méthode du "z maximum" dans les zones présentant ces découpes.

On obtient donc une procédure d'initialisation complexe qui utilise déjà le programme de calcul pour permettre la prévision d'une forme plausible.

#### 4. LES EFFORTS.

Les efforts appliqués au chalut, donc à chaque fil du chalut sont de trois nature:

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

##### 4.1. Efforts hydrodynamiques.

###### 4.1.1. Hypothèses de travail.

- Pour chaque fil on applique les hypothèses de Landweber: traînée de pression normale au câble et frottement tangentiel.
- Au stade actuel nous calculons les efforts hydrodynamiques agissant sur chaque côté de maille comme si celui-ci était isolé dans le courant uniforme.
- Les coefficients hydrodynamiques de traînée et de frottement sont supposés identiques pour tous les fils à l'exception des funes.
- Chaque fil est considéré comme un cylindre rigide non déformable.

###### 4.1.2. Repère de travail.

Le repère absolu est orthonormé, l'axe Oz est parallèle à la vitesse du courant, Ox est horizontal et Oy vertical. On associe à chaque côté de maille IJ un repère lié qui se déduit du repère absolu par une translation et deux rotations définies par les angles d'Euler.

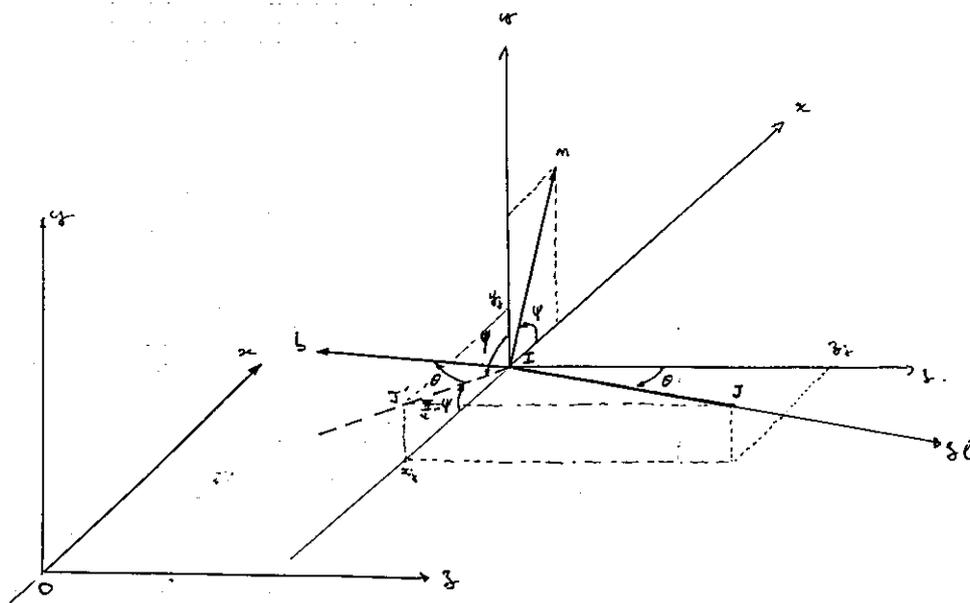


figure 15 : système d'axes.

On passe du repère absolu  $Oxyz$  au repère lié  $Inbz_1$  en effectuant d'abord une translation puis une rotation d'angle  $\Psi$  autour de  $Iz$ , puis une rotation d'angle  $\theta$  autour de  $In$

On peut alors écrire la matrice de changement de repère :

$$T = \begin{bmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi \cos \theta & \sin \Psi \sin \theta \\ \sin \Psi & \cos \Psi \cos \theta & -\cos \Psi \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

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

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

où  $\ell$  est la longueur de l'élément  $IJ$ .

soit

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

De la première équation on déduit

$$(1) \quad \tan \Psi = - \frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}$$

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

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

puis

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

L'angle  $\Psi$  est déterminé par la relation (1) qui conduit à une détermination à  $\pi$  près, sa valeur étant toujours comprise dans l'intervalle  $[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$ . Ceci n'est pas un problème car  $\theta$  est déterminé après  $\Psi$  par la relation (2) et l'angle  $\theta$  change de signe si l'on change de détermination de  $\Psi$ . De plus, on constate que le segment IJ est parfaitement déterminé par le couple  $(\Psi, \theta)$  ou par le couple  $(\Psi + \pi, -\theta)$ .

La vitesse de l'écoulement  $V$  dans le repère lié sera :

$$V = V_\ell = T^{-1} \cdot V_a$$

$$V_a = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \end{vmatrix} \quad \text{soit} \quad V = \begin{vmatrix} V_n = 0 \\ V_b = V_0 \sin \theta \\ V_{3\ell} = V_0 \cos \theta \end{vmatrix}$$

#### 4.1.3. Forces de traînée et de pression.

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

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

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

$$(6) \quad T_{3\ell} = 0$$

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

$$\text{et } |V_b| = V_0 |\sin \theta|$$

on rappelle que nous considérons que  $C_d$  est constant. Des expériences réalisées précédemment ont montré que, dans notre cas, on obtient  $C_d = 1,2$ . Cette valeur correspond à la valeur usuelle du coefficient de traînée d'un cylindre circulaire au même nombre de Reynolds. Nous retiendrons cette valeur pour les éléments qui constituent le chalut; par contre, pour les câbles situés entre le chalut et le navire nous prendrons  $C_d = 1,8$ , cette augmentation étant provoquée par les vibrations des câbles.

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

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

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

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

#### 4.1.4. Forces de frottement

Nous reprenons les hypothèses de Landweber : le frottement tangential est une fraction constante de la traînée du fil lorsqu'il est placé orthogonalement au courant soit :

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

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

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

Expérimentalement, il a été montré que nous devons prendre  $f = 0,1$ . Cette valeur est 10 fois plus élevée que la valeur usuelle du coefficient de frottement pour un cylindre circulaire. Cela est sans doute dû à la présence des jonctions des fils.

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

On obtient alors dans le repère absolu :

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

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

$$(16) \quad F_z = \int R_u \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} \cos \theta$$

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

#### 4.2. Efforts de pesanteur.

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

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

#### 4.3. Efforts dûs aux singularités.

Une singularité peut être placée en tout noeud  $i$ . Elle introduit à ce point des efforts dont les composantes seront notées :  $S_{x_i}$ ,  $S_{y_i}$  et  $S_{z_i}$ .

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

Nous devons les décrire en introduisant :

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

## 5. EQUILIBRE DES NOEUDS

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

### 5.1. Noeuds à deux fils "supérieurs".

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

#### 5.1.1. Equations d'équilibre d'un noeud à quatre fils (type 4).

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

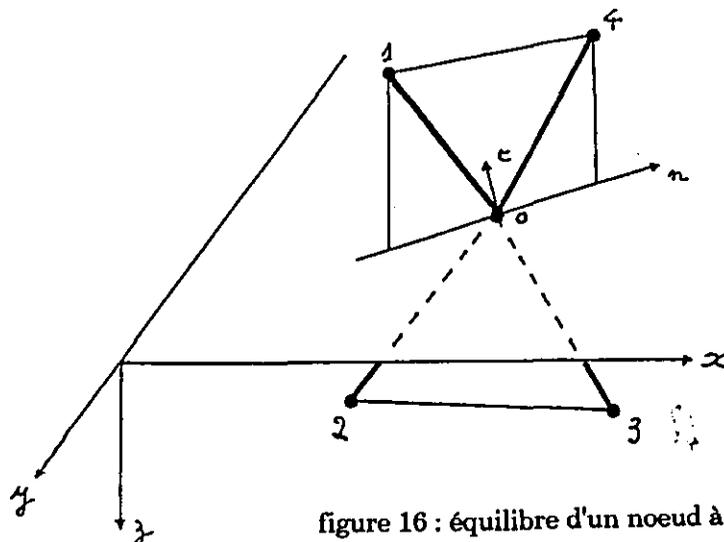


figure 16 : équilibre d'un noeud à quatre fils

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

Les équations d'équilibre s'écrivent donc en les projetant respectivement sur les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  :

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

$$(19) \sum_{i=1}^4 T_i \frac{y_i - y_0}{l_i} + \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hy_i + Pi}{\rho} \right) + S_{y_0} = 0$$

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

On peut écrire ces équations dans le repère  $Oxyz$ . Cette projection permet de s'affranchir des difficultés qui pourraient survenir pour certaines orientations du plan des mailles par rapport au plan  $Oxy$ .

$$(21) \text{ Si } d = \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2}$$

les cosinus directeurs sont :

$$(22) \quad \vec{n} \begin{vmatrix} \frac{x_4 - x_2}{d} \\ \frac{y_4 - y_2}{d} \end{vmatrix} \quad \vec{t} \begin{vmatrix} -\frac{y_4 - y_2}{d} \\ \frac{x_4 - x_2}{d} \end{vmatrix}$$

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

$$(23) \sum_{i=1}^4 T_i \left[ \frac{x_i - x_0}{l_i} (x_4 - x_2) + \frac{y_i - y_0}{l_i} (y_4 - y_2) \right] + (x_4 - x_2) \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hx_i}{\rho} \right) + S_{x_0} \right] + (y_4 - y_2) \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hy_i + Pi}{\rho} \right) + S_{y_0} \right] = 0$$

$$(24) \sum_{i=1}^4 T_i \left[ \frac{x_i - x_0}{l_i} (-y_4 + y_2) + \frac{y_i - y_0}{l_i} (x_4 - x_2) \right] + (-y_4 + y_2) \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hx_i}{\rho} \right) + S_{x_0} \right] + (x_4 - x_2) \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hy_i + Pi}{\rho} \right) + S_{y_0} \right] = 0$$

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

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

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

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

### 5.1.2. Résolution

Afin de permettre au lecteur de suivre la démarche de mise en équations, il est nécessaire de présenter rapidement la méthode de résolution que nous allons employer. Pour plus de détails se reporter au paragraphe 7.

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

A partir d'une forme fixée arbitrairement (disponible dans le fichier ini), ou de la forme calculée à l'itération précédente, on détermine la valeur des efforts hydrodynamiques agissant sur chaque côté de maille. En pratique ces efforts ne seront recalculés que toutes les 100 voir 200 itérations pour accroître la vitesse du calcul.

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

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

Les tensions sont calculées en parcourant le chalut d'arrière en avant, les nouvelles coordonnées sont ensuite déterminées en sens inverse.

#### 5.1.2.1. Calcul des tensions.

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

Balayant le chalut d'arrière en avant lorsque l'on arrive au point 0, les tensions  $T_2$  et  $T_3$  sont connues. Les coordonnées des noeuds, les efforts hydrodynamiques et de pesanteur étant connus, ainsi que les efforts dus aux singularités, les équations (23) et (25) constituent un système de deux équations à deux inconnues  $T_1$  et  $T_4$ . Sa résolution ne sera pas détaillée ici.

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

### 5.1.2.2. Calcul des coordonnées des noeuds.

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

$$A x_0 + B y_0 = C$$

Avec

$$A = \sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{l_i} (-y_4 + y_2) \quad B = \sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{l_i} (x_4 - x_2)$$

$$(28) \quad C = -(y_4 - y_2) \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hx_i}{2} \right) + S_{x_0} \right] + (x_4 - x_2) \left[ \sum_{i=1}^4 \left( \frac{Hy_i + Pi}{2} \right) + S_{y_0} \right] \\ + \sum_{i=1}^4 \left[ T_i \frac{x_i}{l_i} (-y_4 + y_2) + T_i \frac{y_i}{l_i} (x_4 - x_2) \right]$$

Le système d'équations devient :

$$(29) \quad \begin{cases} A x_0 + B y_0 = C \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = l_2^2 \\ (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = l_4^2 \end{cases}$$

En soustrayant la dernière équation de la seconde, on obtient :

$$(30) \quad A x_0 + B y_0 = C$$

$$(31) \quad 2 x_0 (x_4 - x_2) + 2 y_0 (y_4 - y_2) + 2 z_0 (z_4 - z_2) \\ = l_2^2 - l_4^2 + (x_4^2 - x_2^2) + (y_4^2 - y_2^2) + (z_4^2 - z_2^2) \\ = 2 D$$

$$(32) \quad (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = l_4^2$$

Les deux premières équations de ce système peuvent être considérées comme un système d'équations linéaires liant  $x_0$  et  $y_0$  en fonction de  $z_0$ .

$$(33) \quad \begin{cases} A x_0 + B y_0 = C \\ (x_4 - x_2) x_0 + (y_4 - y_2) y_0 = D - (z_4 - z_2) z_0 \end{cases}$$

On en déduit :

$$(34) \quad x_0 = \frac{1}{\text{Det}} \left\{ C(y_4 - y_2) - B[D - (z_4 - z_2)z_0] \right\}$$

$$y_0 = \frac{1}{\text{Det}} \left\{ A[D - (z_4 - z_2)z_0] - C(x_4 - x_2) \right\}$$

avec

$$(35) \quad \text{Det} = A(y_4 - y_2) - B(x_4 - x_2)$$

On obtient alors

$$(36) \quad x_0 = E + F z_0$$

$$(37) \quad y_0 = G + H z_0$$

avec

$$(38) \quad E = \frac{C(y_4 - y_2) - DB}{\text{Det}} \quad F = \frac{(z_4 - z_2)B}{\text{Det}}$$

$$G = \frac{AD - C(x_4 - x_2)}{\text{Det}} \quad H = -\frac{(z_4 - z_2)A}{\text{Det}}$$

En reportant (36) et (37) dans (32) on obtient une équation du second degré en  $z_0$  :

$$a z_0^2 + b z_0 + c = 0$$

où

$$(40) \quad a = F^2 + H^2 + 1$$

$$b = -[(x_4 - E)F + (y_4 - G)H + z_4]$$

$$c = (x_4 - E)^2 + (y_4 - G)^2 + z_4^2 - l_4^2$$

Les coefficients a, b, c ne dépendent que des  $x_i, y_i, z_i$  calculés à l'itération précédente.

On en déduit  $z_0$  :

$$(41) \quad z_0 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - ac}}{a}$$

Ici se pose un problème de détermination de signe. Nous avons choisi arbitrairement de prendre des "z" toujours croissants car dans l'exemple que nous étudions la forme initiale est composée de mailles suffisamment "ouvertes" pour que les fils ne puissent pas présenter de rebroussement lorsqu'ils sont soumis à l'action du courant.

Ce point doit être amélioré, il doit être possible de prévoir en fonction des anciennes coordonnées des points, des nouvelles tensions et des deux valeurs possibles de  $z_0$  celle qui doit être retenue pour le calcul.

### 5.1.3. Autres noeuds à deux fils "supérieurs".

L'écriture des équations d'équilibre relatives à ce type de noeuds (type 5, 6, 9 et 18) ne pose pas de difficulté nouvelle. On considère ces noeuds comme des noeuds à quatre fils et on annule dans les relations (18) à (41) ce qui concerne les points et les fils soit 2, soit 3, soit 2 et 3.

## 5.2. Noeuds à un fil "supérieur".

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

### 5.2.1. Cas d'un noeud à quatre fils.

Le noeud n'ayant plus qu'un fil supérieur il est impossible de définir un repère lié Ontz. La méthode de résolution doit donc être différente.

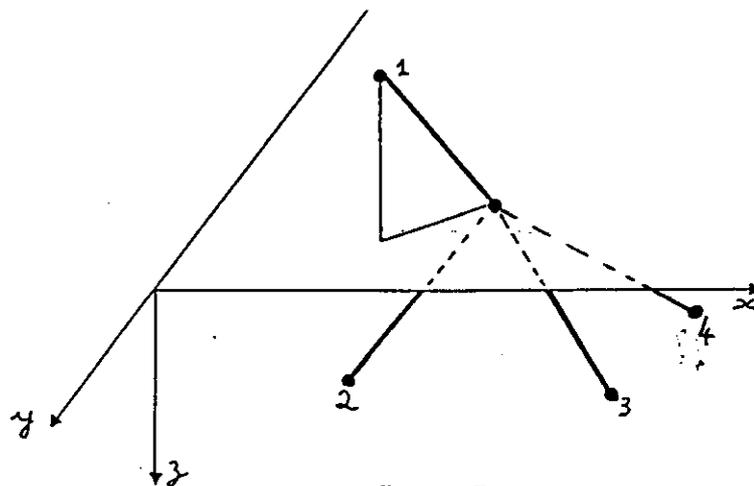


figure 17

## 5.2.1.1. Calcul des tensions.

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

$$(42) \quad T_1 \frac{x_2 - x_0}{l_2} = - \left[ \sum_{i=2}^4 T_i \frac{x_i - x_0}{l_i} + \sum_{i=2}^4 \left( \frac{Hx_i}{2} \right) + Sx_0 \right]$$

$$(43) \quad T_1 \frac{y_2 - y_0}{l_2} = - \left[ \sum_{i=2}^4 T_i \frac{y_i - y_0}{l_i} + \sum_{i=2}^4 \left( \frac{Hy_i + Pi}{2} \right) + Sy_0 \right]$$

$$(44) \quad T_1 \frac{z_2 - z_0}{l_2} = - \left[ \sum_{i=2}^4 T_i \frac{z_i - z_0}{l_i} + \sum_{i=2}^4 \left( \frac{Hz_i}{2} \right) + Sz_0 \right]$$

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

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

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

## 5.2.1.2. Calcul des coordonnées des noeuds.

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

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

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

Nous n'utiliserons pas la relation (20) pour déterminer  $z_0$  car les trois relations (18), (19), et (20) ont déjà été utilisées pour déterminer trois inconnues  $T_1$ ,  $x_0$  et  $y_0$ .

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

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

Nous rencontrons alors le même problème de détermination de signe que dans le cas du noeud à deux fils supérieurs.

### 5.2.2. Autres noeuds à un fil supérieur.

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

## 6. PRISE EN COMPTE DE LA SYMETRIE DU CHALUT.

Un chalut présente toujours un plan de symétrie qui dans notre repère est le plan  $yOz$ .

Pour le moment nous cherchons à déterminer la forme et les tensions d'un chalut dans un courant uniforme. Le gréement du chalut étant symétrique par rapport au plan  $yOz$ , la forme d'équilibre du train de pêche sera également symétrique.

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

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

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

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

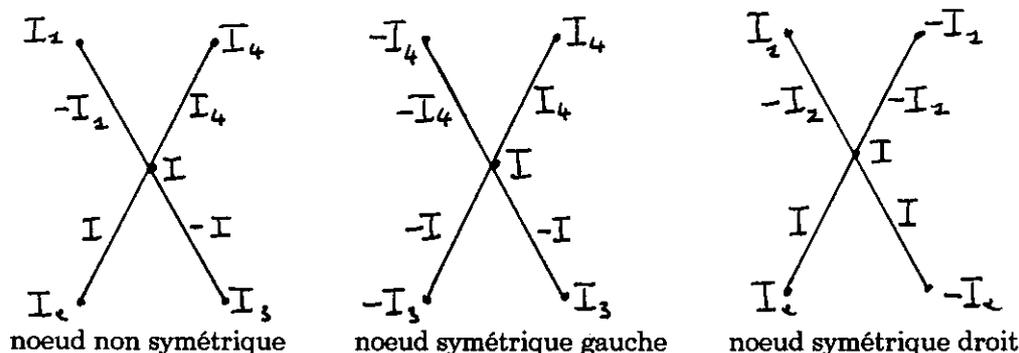


figure 18

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

Ceci signifie par exemple :

$$\begin{aligned} \alpha(-I_3) &= -\alpha(I_3) \\ \gamma(-I_3) &= \gamma(I_3) \\ \delta(-I_3) &= \delta(I_3) \end{aligned}$$

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

## 7. METHODE ITERATIVE.

Nous avons décrit le train de pêche par un ensemble de  $N$  noeuds et de fils que nous avons positionnés dans l'espace (forme initiale) et nous venons d'établir les équations d'équilibre des noeuds et des fils.

Il s'agit maintenant d'obtenir la forme d'équilibre et les tensions du chalut et de son gréement.

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

Nous avons déjà signalé que ces équations sont non linéaires pour de nombreuses raisons :

- les tensions interviennent en facteur des coordonnées (produit des inconnues entre elles).
- les conditions de longueur font intervenir le carré des coordonnées.
- les efforts agissant sur les fils dépendent de la solution (couplage fluide - structure).

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

A partir de la forme initiale (ou de la forme calculée à l'itération précédente) on détermine les efforts en chaque fil ou noeud :

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

Puis on calcule les premières (ou les nouvelles) valeurs des tensions en "remontant" le chalut et le gréement jusqu'au navire.

Ensuite on détermine les coordonnées  $x_i$  et  $y_i$  de chacun des noeuds en partant des points "fixes" (qui sont des données du problème : fixation du modèle en bassin, pont du bateau dans le cas d'un chalutage réel) c'est-à-dire en "descendant" du navire au chalut.

Les " $z_i$ " ne sont pas calculés à ce moment, ils dépendent les uns des autres et leurs variations s'ajoutent tout au long du train de pêche. Nous les calculons dans une troisième boucle

en utilisant les  $x_i$  et  $y_i$  qui viennent d'être calculés dans la boucle précédente et les conditions de longueur des fils.

La nouvelle forme calculée remplace la forme initiale pour l'itération suivante. Le calcul s'arrête lorsque les modifications de forme sont inférieures à un certain critère que nous fixons arbitrairement. Remarquons qu'une très faible variation des paramètres d'une itération à l'autre n'est pas un critère absolu de convergence.

Pour alléger le calcul et ne pas faire trop de modifications à chaque itération les efforts hydrodynamiques ne sont recalculés que toutes les  $n$  itérations. Jusqu'à maintenant nous avons pris  $n$  égal à 200.

De même pour ne pas provoquer de modification brutale de la forme du chalut qui entraîne des non respects des contraintes de longueur, les nouvelles coordonnées ne sont pas utilisées directement pour déterminer la forme initiale de l'itération suivante. On définit cette forme en faisant une moyenne entre ces "nouvelles" coordonnées et celles calculées à l'itération précédente (méthode de relaxation). Cette moyenne permet au calcul d'"absorber" des variations trop importantes des coordonnées.

L'organigramme suivant résume les opérations successives :

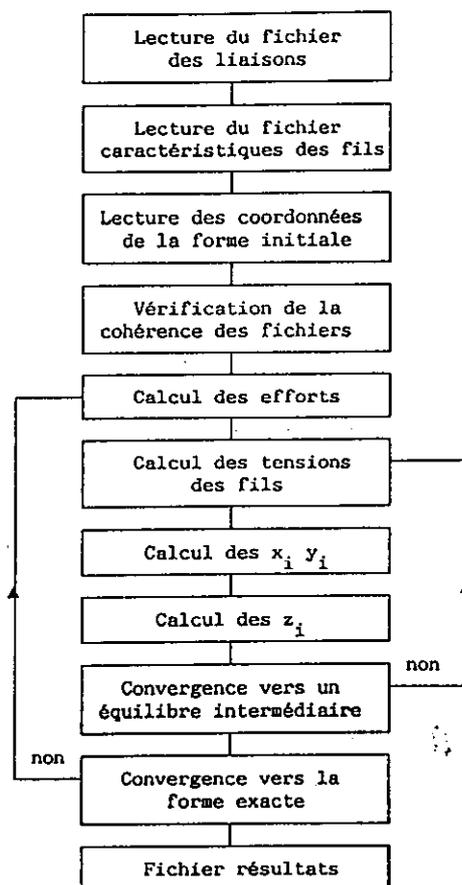


figure 19 : organigramme.

## 8. PRESENTATION DE QUELQUES RESULTATS.

Nous présentons ici quelques résultats obtenus sur notre modèle de chalut pélagique. La situation simulée correspond à celle d'un chalutage en boeufs.

Les figures qui suivent comprennent chacune trois vues qui représentent du haut vers la bas la vue de dessus, la vue de côté et la vue de face.

Sur les figures montrant le chalut et son gréement (le chalut seul) les vues de faces sont dilatées d'un facteur 1.5 (2) par rapport aux vues de côté et de dessus.

La répartition des tensions est visualisée par l'usage des couleurs.

Nous avons simulé deux vitesses : 0.55 (fig. 20, 21, 23 et 24) et 0.75 m/s (fig. 22 et 25).

A 0.55 m/s deux configurations ont été testés : la première (fig. 20 et 23) correspond au chalut utilisé avec son réglage standard. Ayant constaté une déformation du chalut nous avons progressivement raccourci le bras inférieur pour obtenir un chalut correctement réglé pour cette vitesse (fig. 21 et 24).

Sur l'ensemble des vues qui suivent nous constatons que le calcul restitue très bien les évolutions du chalut :

- une diminution du bras inférieur provoque une déformation des mailles dans la zone supérieure du chalut, une diminution de son ouverture verticale et une remonté de l'ensemble du train de pêche.

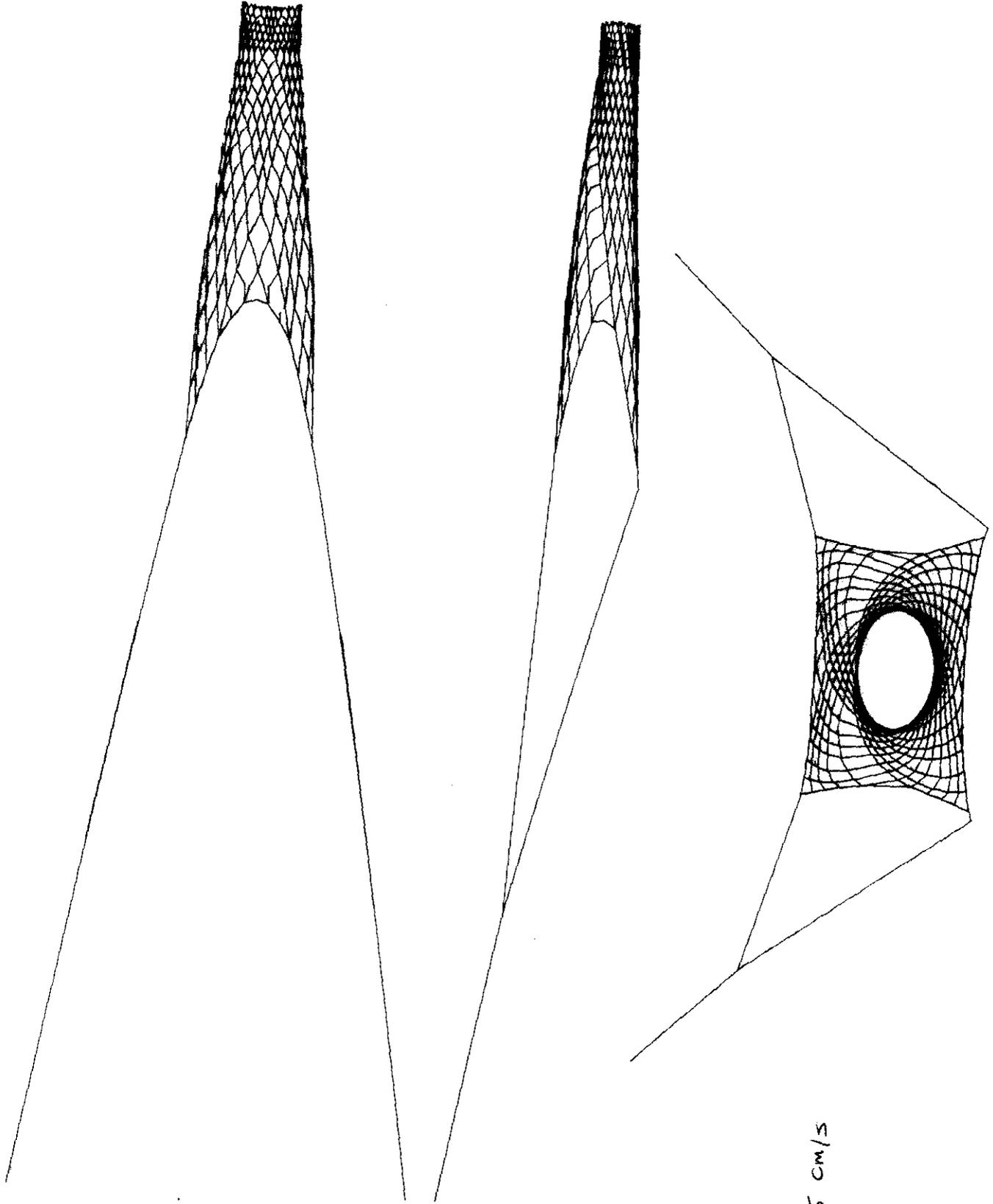
- une augmentation de la vitesse de remorquage se traduit par un mouvement ascendant du train de pêche et une fermeture de la gueule du chalut.

Ces phénomènes correspondent parfaitement à ce qui se produit en réalité (en bassin ou en mer).

Nous constatons également que le fait d'avoir "découpé" chaque côté de maille en deux demi-éléments permet d'une part de faire disparaître certaines tensions négatives et d'autre part de bien restituer les déformations du chalut.

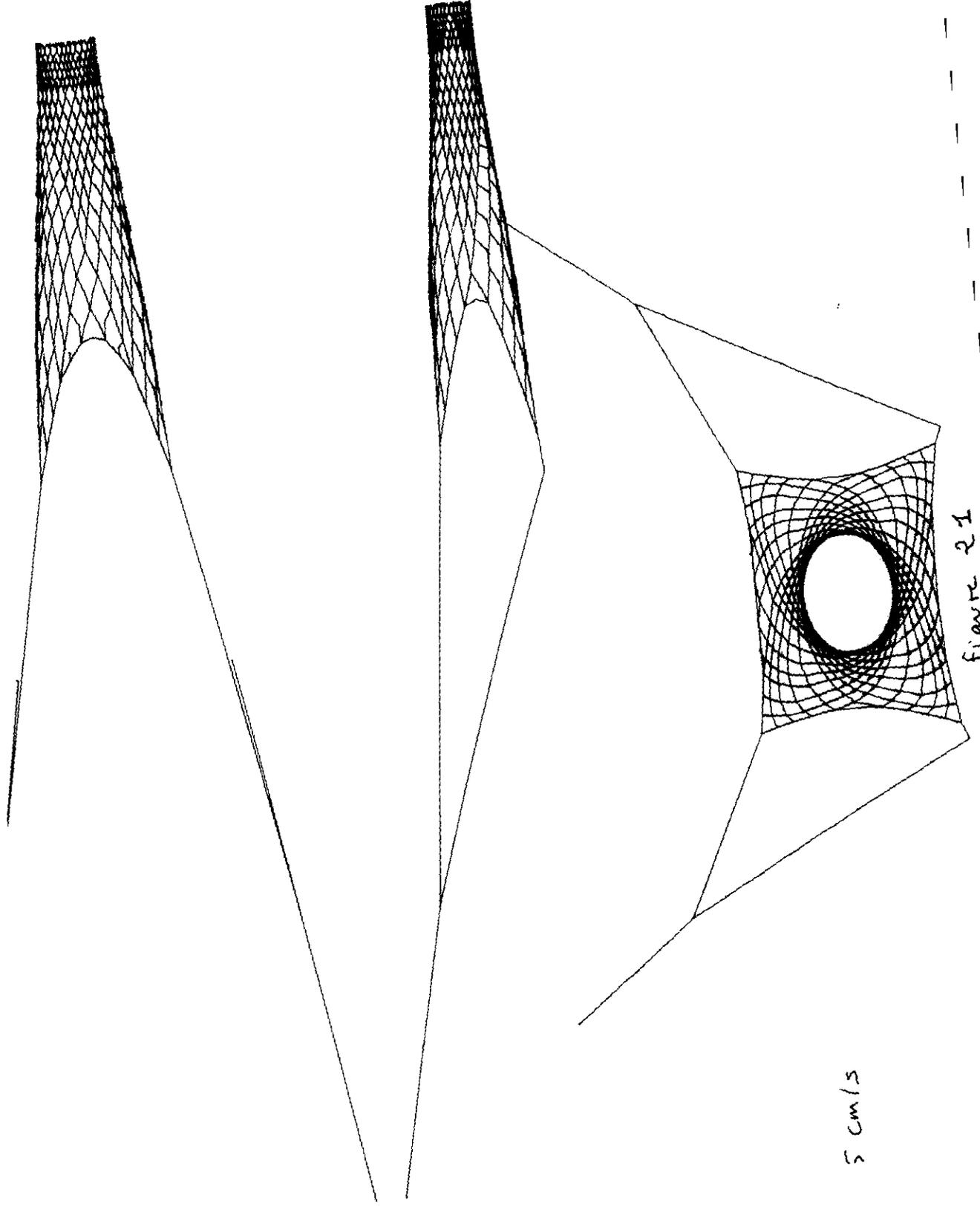
Dans le cas des mailles pendantes (type 9), comme celles qui terminent la partie du chalut numérisé, nous observons un problème numérique que nous résolvons en introduisant une tension fictive, très faible, orientée dans la direction de l'écoulement.

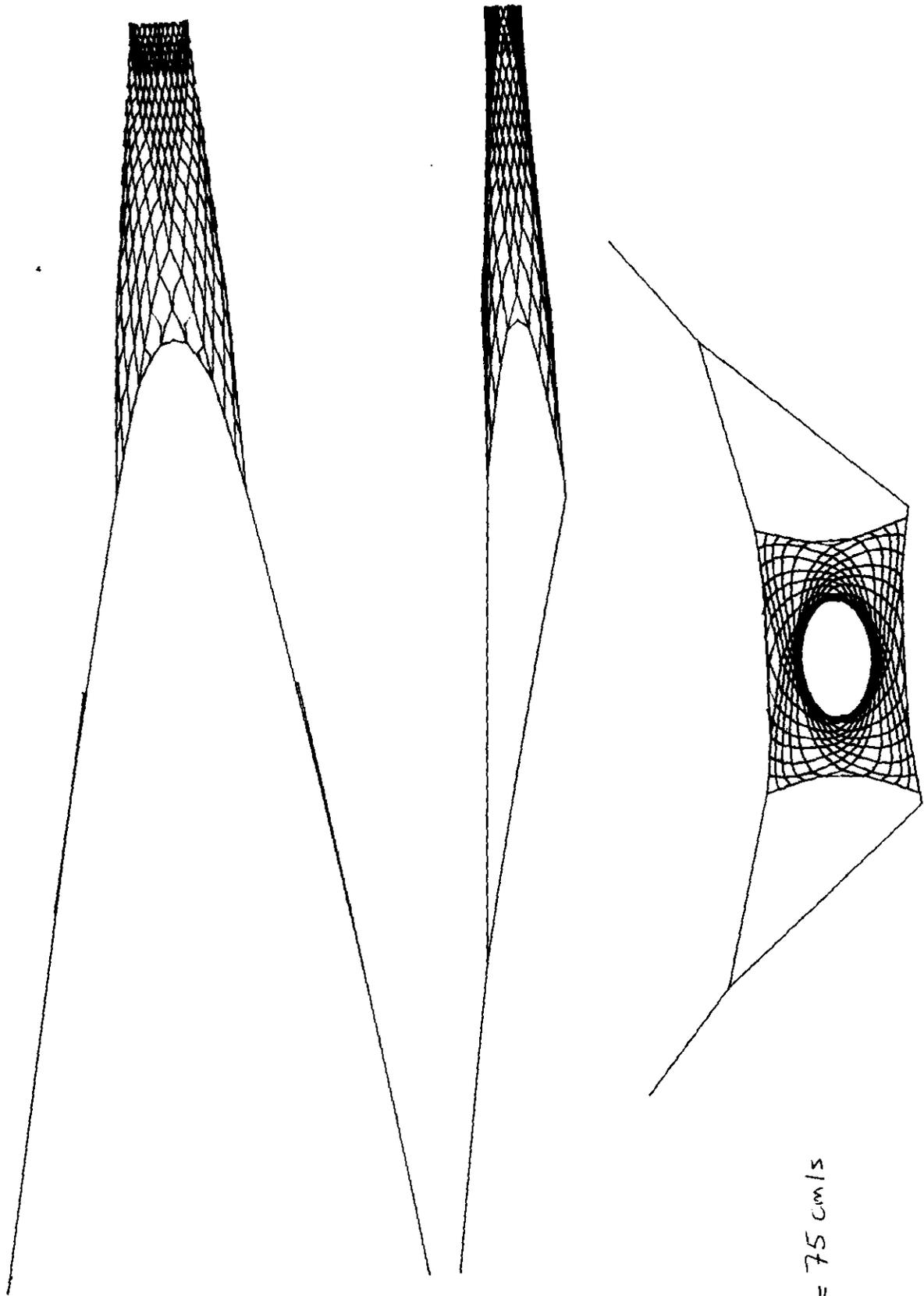
Les tensions de remorquage calculées pour les vitesses 0.55 et 0.75 m/s sont respectivement 1.35 et 2.32 N; ce qui est de l'ordre de grandeur des tensions mesurées en bassin pour des filets comparables.



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

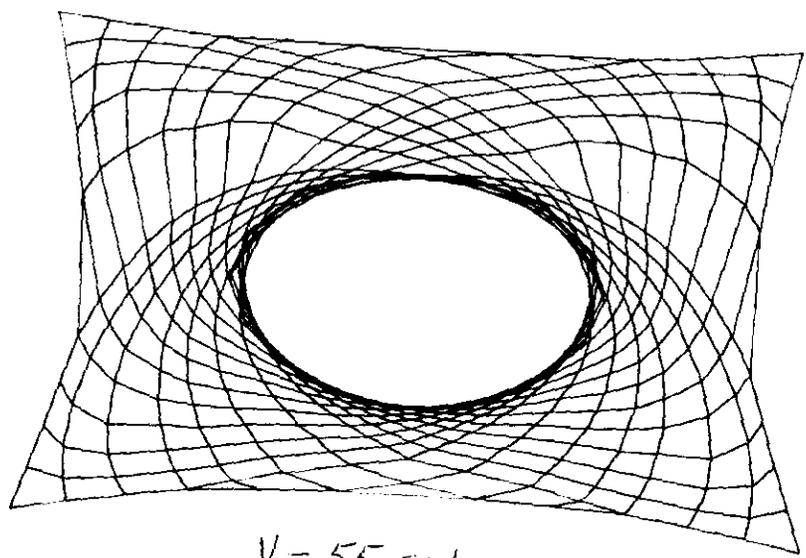
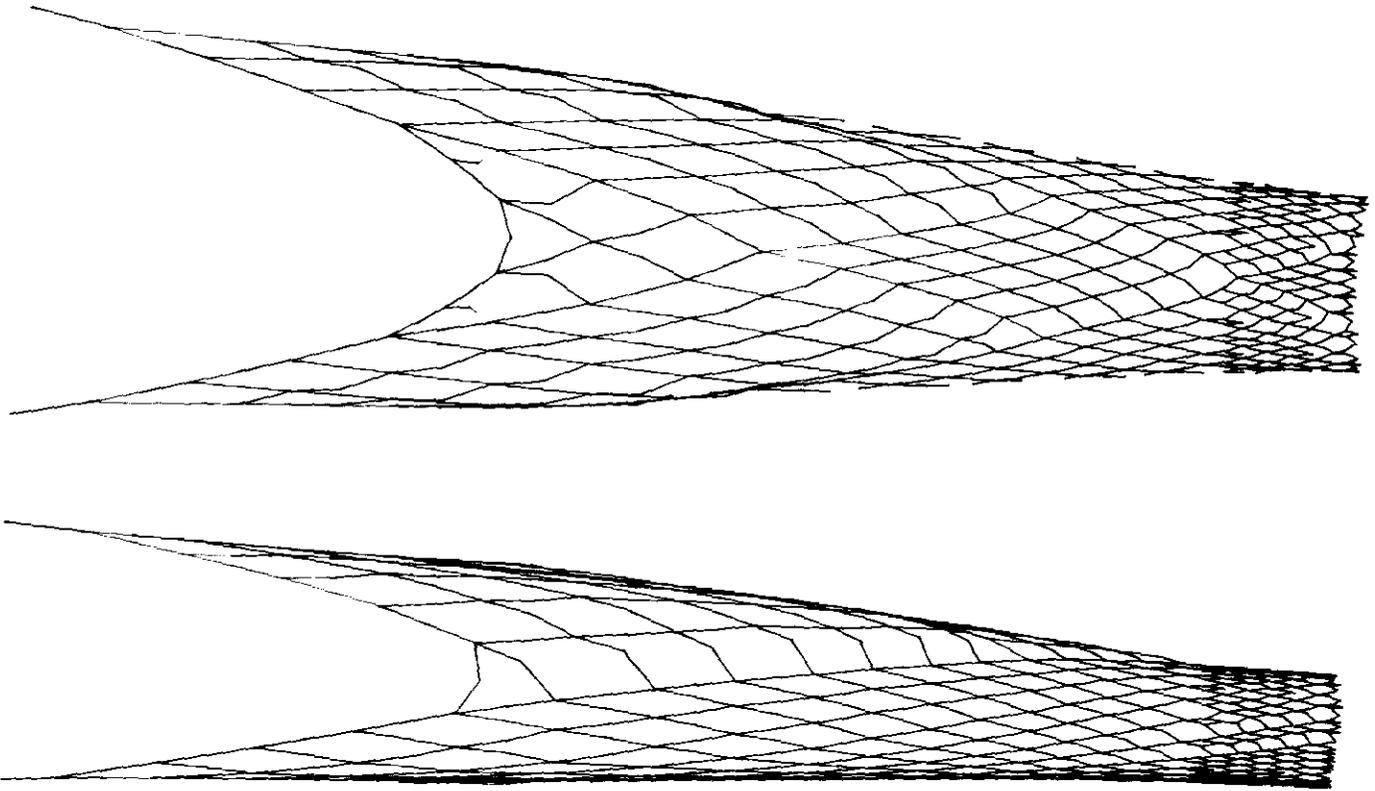
figure 20





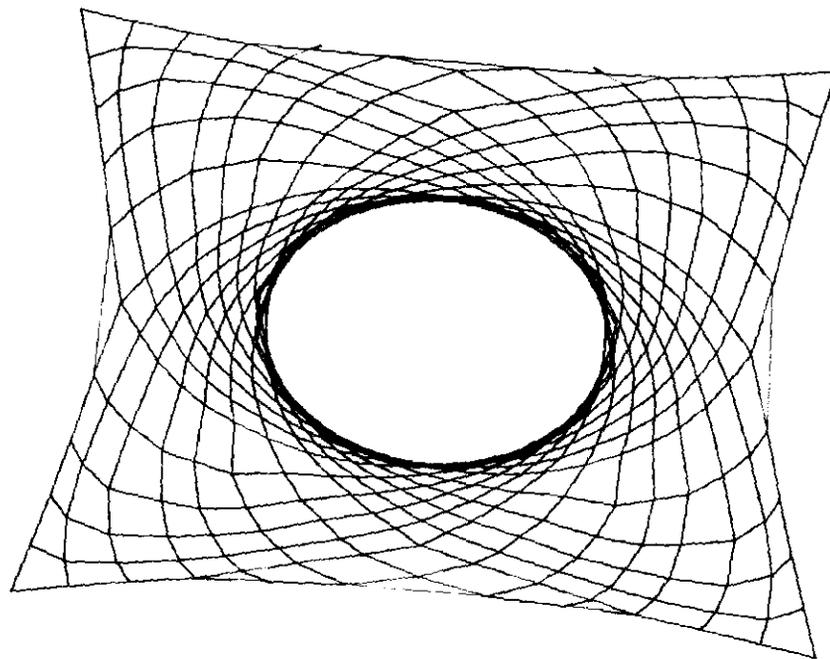
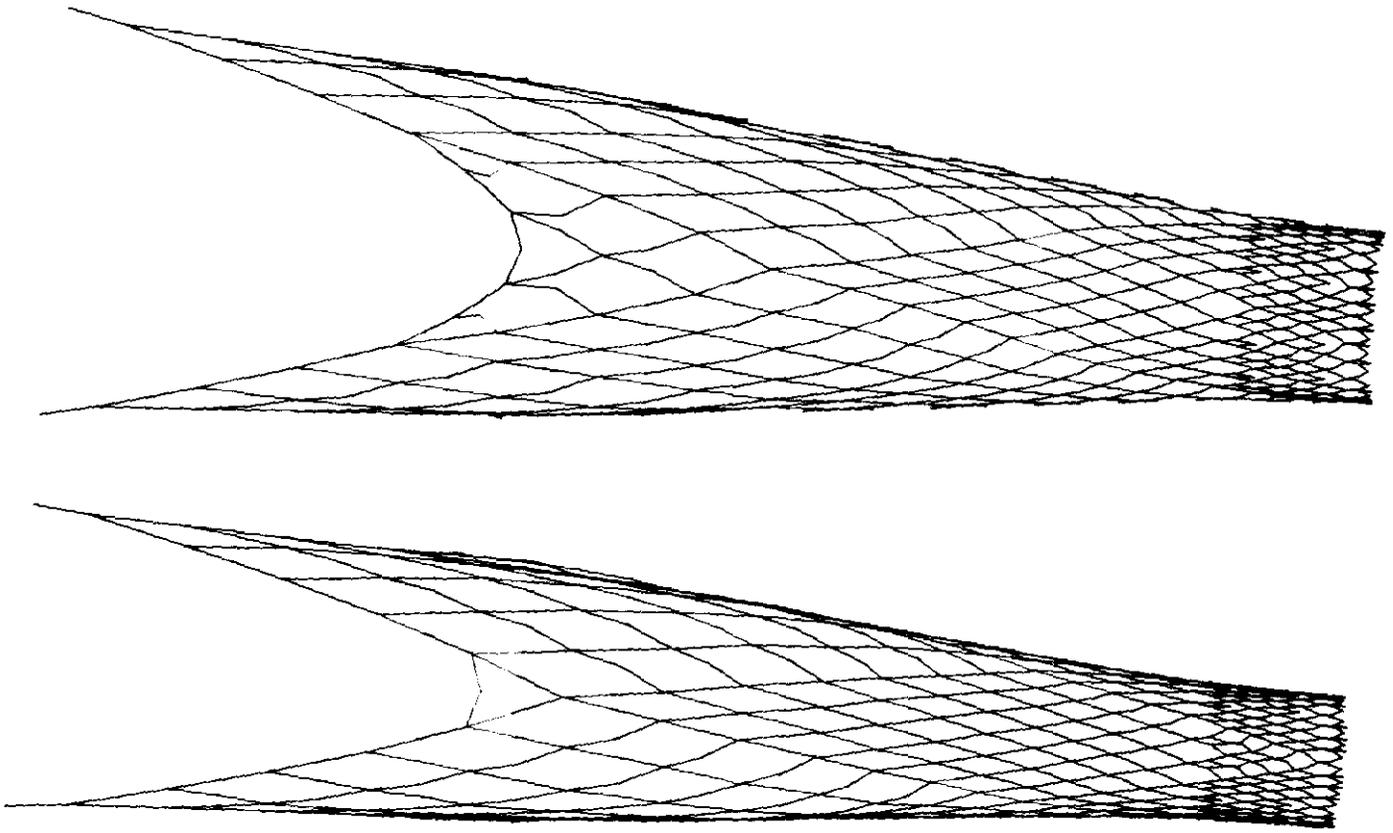
$V = 75 \text{ cm/s}$

Figure 22



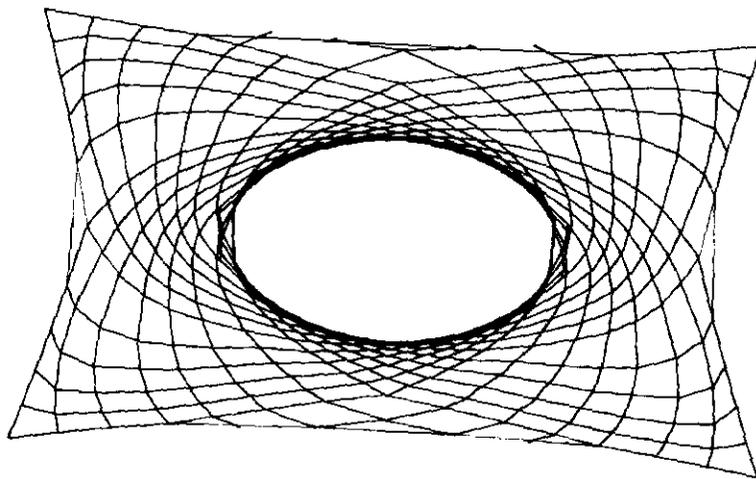
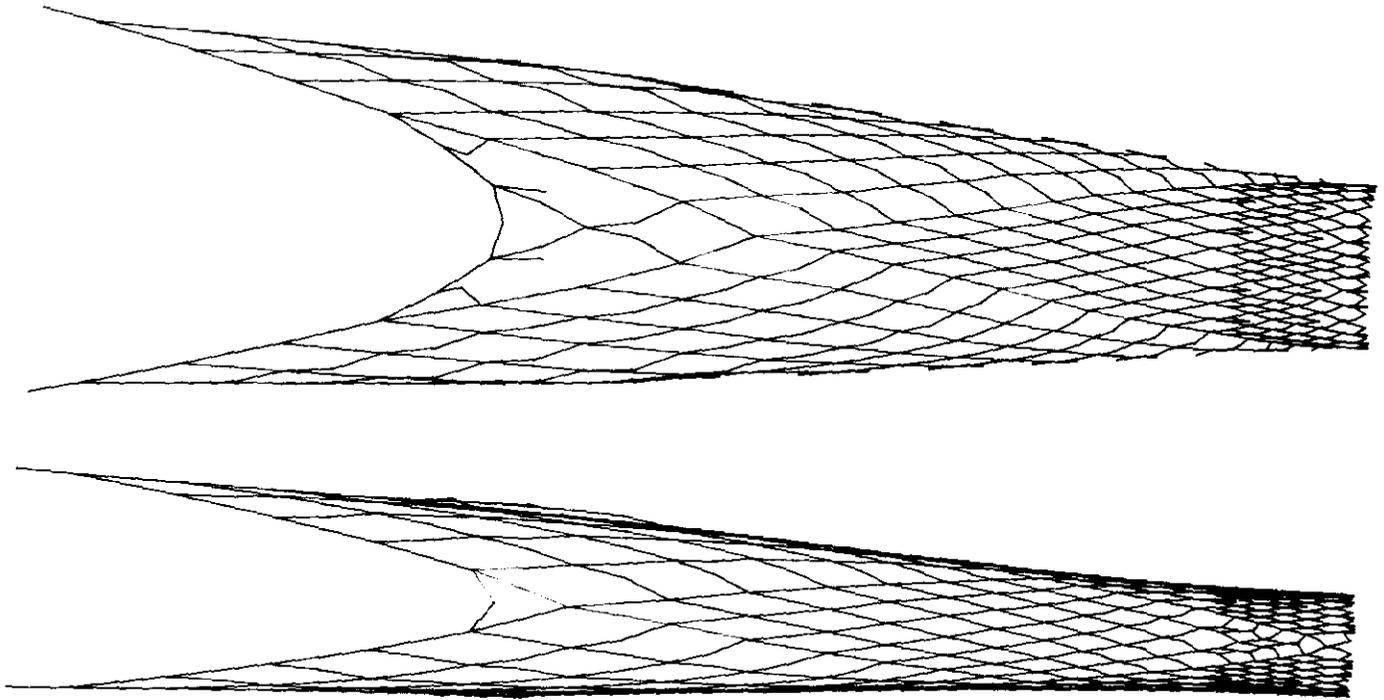
$V = 55 \text{ cm/s}$

Figure 23



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

Figure 24



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

Figure 25

## DEUXIEME PARTIE

## DETERMINATION EXPERIMENTALE DES COEFFICIENTS HYDRODYNAMIQUES D'UN PANNEAU DE CHALUT.

L'objectif de ce travail est de comparer les performances de différentes maquettes de panneau de chalut en mesurant leurs coefficients hydrodynamiques pour plusieurs incidences.

L'étude concerne les quatre modèles suivants : un panneau en "V", un modèle rectangulaire à tuyère (hydrostable LE BEON), un ovale incurvé (polyvalent MORGERE) et un dernier le polyvalent type "R" (MORGERE).

Ce travail s'inscrivant dans un programme communautaire avec pour partenaires les deux autres pays de la CEE qui possèdent un canal à circulation (Grande-Bretagne et Danemark), le premier panneau testé (modèle "V") a été utilisé pour comparer les résultats obtenus dans les trois bassins d'essais.

## 1. DEFINITION.

Nous allons comparer les panneaux par la détermination du rapport d'un coefficient de portance et d'un coefficient de traînée définis de la manière suivante :

Soit  $R$  la résultante des efforts extérieurs agissant sur le panneau et autres que les tensions exercées par les funes et les bras.

Le repère absolu est tel que l'axe  $Ox$  est parallèle à l'axe de la veine et orienté dans la direction de l'écoulement, l'axe  $Oz$  vertical ascendant et l'axe  $Oy$  tel que le trièdre soit direct.

La résultante  $R$  peut alors se décomposer en trois composantes :

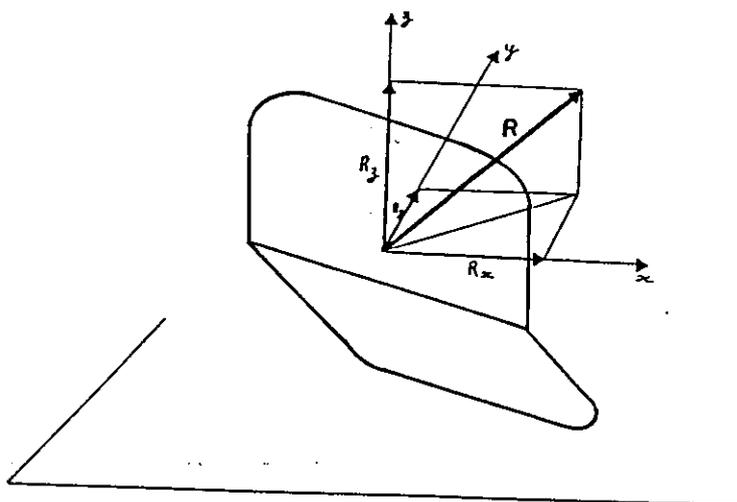


figure 26

La composante  $R_z$  est essentiellement due au poids du panneau et à la réaction verticale du sol, elle inclut également une partie des efforts hydrodynamiques. Nous ne l'étudierons pas ici.

Les composantes  $R_x$  et  $R_y$  sont dues aux efforts hydrodynamiques et au frottement sur le sol. Nous ne chercherons pas à dissocier ces deux types d'effort

Nous définissons des coefficients adimensionnels de trainée et de portance globaux :

$$(1) \quad C_d = \frac{R_x}{\frac{1}{2} \rho S v^2}$$

$$(2) \quad C_l = \frac{R_y}{\frac{1}{2} \rho S v^2}$$

où :

$S$  est la surface du panneau (calculée en multipliant la largeur par la hauteur "hors-tout" du panneau).

$V$  est la vitesse de remorquage (vitesse du courant relatif).

$\rho$  est la masse volumique de l'eau.

Nous noterons  $r$  le rapport  $C_l / C_d$  qui sera utilisé pour qualifier l'efficacité du panneau.

## 2. METHODE DE CALCUL DES COEFFICIENTS HYDRODYNAMIQUES.

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

Le montage expérimental à été réalisé de telle sorte que, sous l'action d'un courant uniforme, le panneau soit maintenu en équilibre par l'intermédiaire de trois câbles reliés à des points fixes du bassin.

La longueur de ces câbles et les coordonnées des points fixes seront réglables afin de pouvoir modifier l'incidence du panneau.

Lorsque le panneau est en équilibre, la somme des forces extérieures agissant sur ce corps est nulle. Nous allons établir les équations d'équilibre en écrivant que la somme vectorielle

des trois tensions des câbles est égale et opposée à la résultante  $R$  des efforts hydrodynamiques, de frottement et de pesanteur s'exerçant sur le panneau.

Pour chaque réglage nous mesurons la vitesse du courant, l'inclinaison du panneau (contrôle de position), l'incidence du panneau et les tensions des câbles. Ensuite nous calculerons les composantes  $R_x$  et  $R_y$  qui, introduites dans les équations (1) et (2), nous permettent de déterminer les coefficients  $C_d$  et  $C_l$  que nous recherchons.

### 3. MONTAGE EXPERIMENTAL.

Nous allons décrire le montage pour le panneau "V". Pour les autres modèles le principe est le même, seules les valeurs concernant le panneau seront à modifier.

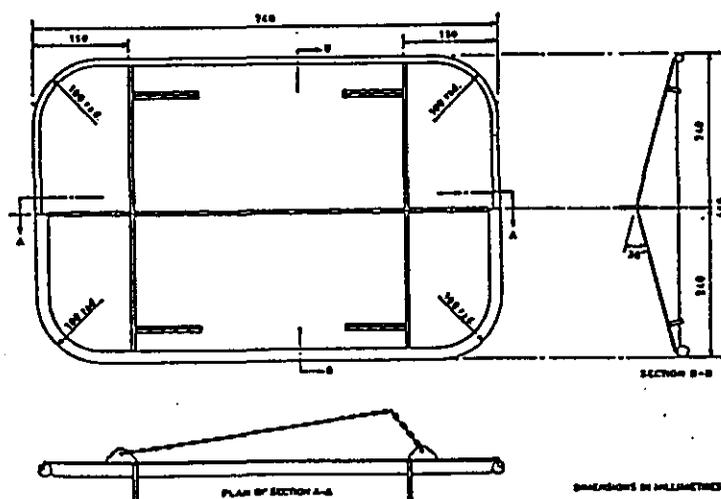


figure 27 : plan de la maquette du panneau Vee Door.

Le modèle étudié ici est réalisé à l'échelle 1/4 et essayé en mouvement relatif dans la veine du canal d'essais de chaluts de Lorient.

Les caractéristiques de la veine sont :

- largeur 2.60 m
- profondeur en fonctionnement 1.35 m
- vitesse maximum 1 m/s
- le sol est équipé d'un tapis mobile qui permet de simuler le mouvement relatif du panneau sur le fond.

Les trois points de fixation des câbles sont les points 1, 2 et 3 de la figure suivante.

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

Toutes les liaisons sont réalisées à l'aide de manilles pour éviter la torsion des câbles.

Le câble 1 est relié au point 4 ; les câbles 2 et 3 se rejoignent au point 5 :

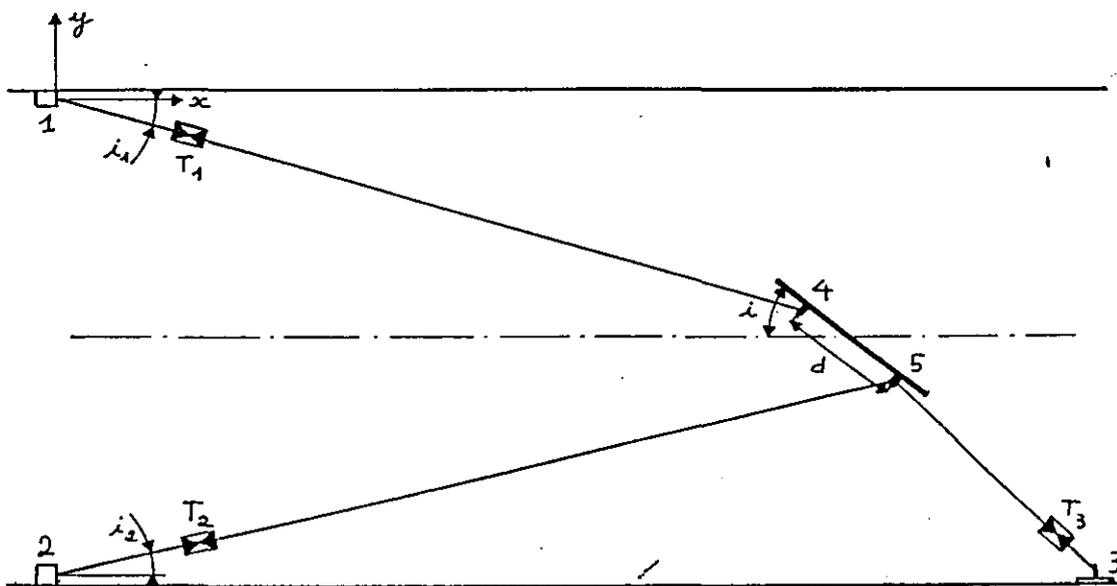


figure 28 : positionnement de la maquette (vue du dessus)

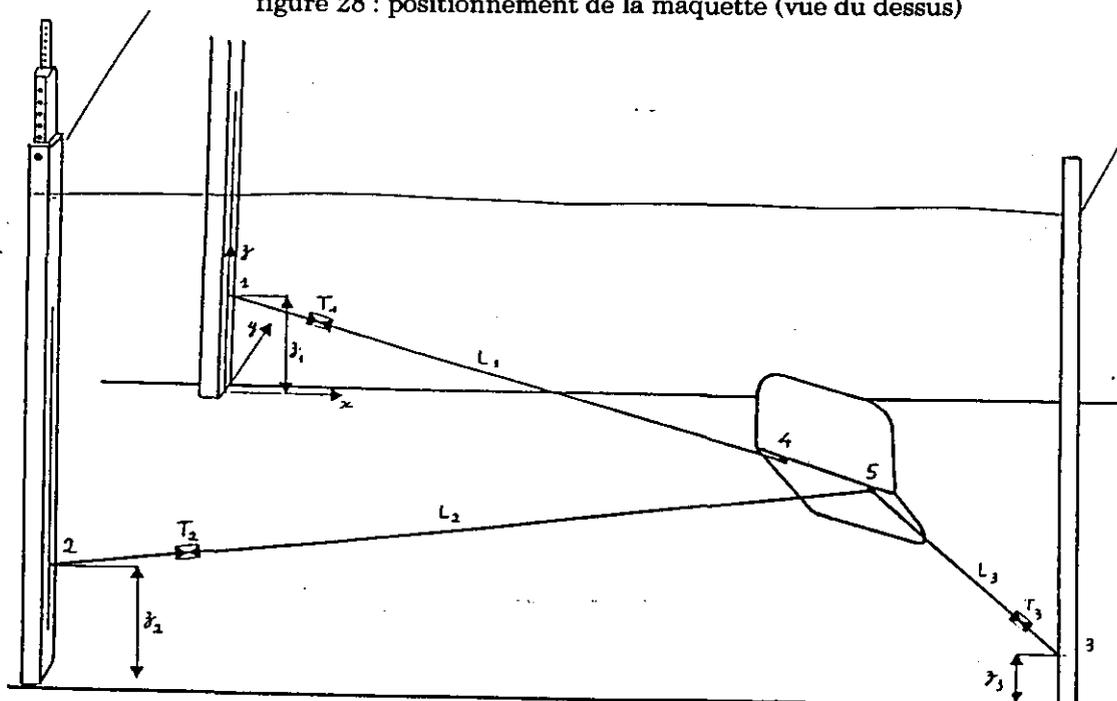


figure 29 : vue en perspective du montage.

Les attaches 1 et 2 sont réalisées à l'aide de deux tubes coulissant l'un dans l'autre.

Les cotes  $z_1$  et  $z_2$  sont réglables à l'aide de trous (percés dans les tubes intérieurs) espacés de 10 cm et de goupilles. Les coordonnées  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$  et  $y_2$  sont fixées une fois pour toutes.

L'origine du repère Oxyz est prise sur la colonne 1 au fond du bassin.

L'attache 3 est constituée d'une cornière percée tous les 5 cm qui permet de fixer les coordonnées du point 3 avant l'essai et pour toute sa durée.

Les câbles 1 et 2 rentrent et remontent dans leurs colonnes respectives en passant par une poulie. A leur partie supérieure, une barre rigide percée de trous espacés de 25 mm permet de faire varier les longueurs  $L_1$  et  $L_2$  au cours de l'essai.

La longueur  $L_3$  du câble 3 est fixée avant l'essai.

#### 4. MESURES.

##### 4.1. Contrôle de l'inclinaison du panneau.

La position standard de fonctionnement est définie comme étant celle où la partie supérieure du panneau est verticale.

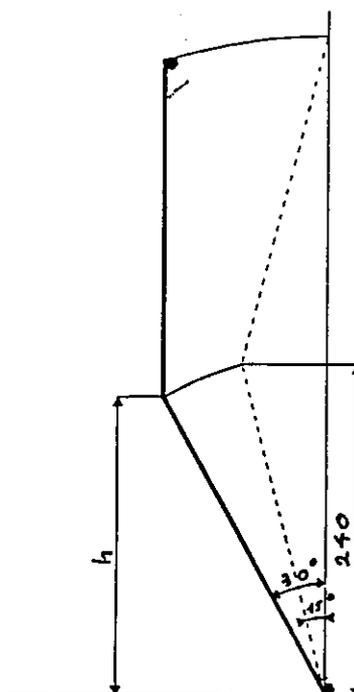


figure 30 : position "normale" du panneau.

Pour effectuer ce réglage on vérifie que le point de fixation des câbles est situé à une hauteur  $h$  du tapis roulant avec :

$$h = 240 \frac{\cos 30^\circ}{\cos 15^\circ}$$

$$h = 215 \text{ mm}$$

Cette mesure est faite à l'aide d'une lunette de visée placée le long de la vitre d'observation (mur babord du bassin). On règle cette inclinaison en faisant varier  $z_1$  et  $z_2$ .

#### 4.2. Mesure de l'incidence.

L'incidence du panneau est réglée en faisant varier les longueurs  $L_1$  et  $L_2$  ainsi que les coordonnées  $z_1$  et  $z_2$ .

Nous calculons l'incidence  $i$  après avoir mesuré, à l'aide de la lunette de visée, les abscisses  $x_4$  et  $x_5$  des points de fixation 4 et 5 du panneau, par la relation suivante :

$$(3) \quad i = \arccos \frac{x_5 - x_4}{d}$$

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

Les choix que nous avons faits pour les positions des points 1, 2 et 3 nous permettent de faire varier l'incidence du panneau d'environ 25 à 50 degrés.

#### 4.3. Mesure de la vitesse.

La vitesse est mesurée à l'aide d'un moulinet dont l'étalonnage a été effectué en bassin de traction (IFREMER/BREST).

Elle est mesurée en l'absence du panneau ; puis les réglages de la pompe et du tapis sont maintenus constants lorsqu'on introduit le modèle.

Au cours de nos essais la vitesse était stabilisée à 0.7 m/s.

#### 4.4. Mesure des tensions.

Les tensions des câbles ont été mesurées à l'aide de 3 capteurs immergés à jauge de contrainte de capacité nominale 50 daN. Leur étalonnage est vérifié à chaque immersion.

Ces capteurs  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  sont placés respectivement à proximité des points 1, 2 et 3 comme l'indique la figure 3.

L'acquisition des données et leur traitement sont réalisés à l'aide d'un microordinateur muni d'une carte de conversion analogique - numérique.

Nous avons programmé 100 mesures sur chacune des trois voies. Les résultats seront obtenus en moyennant ces mesures.

### 5. CALCUL DES COEFFICIENTS HYDRODYNAMIQUES.

Connaissant maintenant les coordonnées des points 1, 2 et 3, les longueurs des câbles, l'incidence du panneau et les tensions, nous allons déduire de ces valeurs les coefficients  $C_d$  et  $C_l$  nécessaires à la comparaison des panneaux.

#### 5.1 Calcul des coordonnées des points 4 et 5.

Les cotes  $z_4$  et  $z_5$  sont imposées par l'inclinaison du panneau. Nous allons calculer les coordonnées  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $y_4$  et  $y_5$  en raisonnant en projection dans le plan horizontal.

On notera  $L_i^*$  la projection de  $L_i$  dans le plan horizontal. Ces longueurs projetées s'écrivent :

$$(4a) \quad L_1^* = \sqrt{L_1^2 - (z_4 - z_1)^2}$$

$$(4b) \quad L_2^* = \sqrt{L_2^2 - (z_5 - z_2)^2}$$

$$(4c) \quad L_3^* = \sqrt{L_3^2 - (z_5 - z_3)^2}$$

la figure 3 montre que :  $L_2^* \cos i_2 = L_1^* \cos i_1 + d \cos i$

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

$$(5a) \quad F = -y_2 - d \sin i$$

$$(5b) \quad G = d \cos i$$

$$\text{Alors} \quad L_1^* \cos i_1 = L_2^* \cos i_2 + G$$

$$L_1^* \sin i_1 = L_2^* \sin i_2 + F$$

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

$$\text{d'où } L_2^{*c} = L_2^{*e} + 2GL_2^* \cos i_2 - 2FL_2^* \sin i_2 + G^c + F^c$$

$$2GL_2^* \cos i_2 = L_2^{*c} - L_2^{*e} + 2FL_2^* \sin i_2 - G^c - F^c$$

soit :

$$2GL_2^* \sqrt{1 - \sin^2 i_2} = 2H + 2FL_2^* \sin i_2$$

avec

$$(6) \quad 2H = (L_2^{*c} - L_2^{*e} - G^c - F^c)$$

$$\text{ce qui peut s'écrire : } AL_2^{*c} \sin^2 i_2 + BL_2^* \sin i_2 + C = 0$$

avec

$$(7) \quad A = F^c + G^c ; B = 2HF ; C = H^c - G^c L_2^{*e}$$

$$\text{or } y_4 = -L_2^* \sin i_2$$

donc

$$(8a) \quad Ay_4^c - By_4 + C = 0$$

On choisit la valeur de  $y_4$  qui permet de retrouver  $L_2$

$$(8b) \quad x_4 = \sqrt{L_2^{*e} - y_4^c}$$

$$(8c) \quad x_5 = x_4 + d \cos i$$

$$(8d) \quad y_5 = y_4 - d \cos i$$

## 5.2. Calcul de $C_d$ et $C_l$

Le panneau étant en équilibre la somme des forces extérieures agissant sur le modèle est nulle. On écrit alors que la résultante  $R$  des efforts hydrodynamiques, de frottement et de pesanteur est égale et opposée à la somme vectorielle des trois tensions des câbles.

Soit :

$$(9a) \quad R_x = \frac{x_4 - x_2}{L_2} T_2 + \frac{x_5 - x_2}{L_2} T_2 + \frac{x_5 - x_3}{L_3} T_3$$

$$(9b) \quad R_y = \frac{y_4 - y_2}{L_2} T_2 + \frac{y_5 - y_2}{L_2} T_2 + \frac{y_5 - y_3}{L_3} T_3$$

$$(9c) \quad R_z = \frac{z_4 - z_2}{L_2} T_2 + \frac{z_5 - z_4}{L_c} T_c + \frac{z_5 - z_3}{L_3} T_3$$

Les relations (1) et (2) permettent alors de calculer Cd, Cl et r.

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

$$C_l = \frac{2 R_z}{\rho S v^2}$$

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

## 6. RESULTATS.

Les premiers résultats obtenus sur le panneau "V" dénommé vee door ont été comparés à ceux obtenus par les laboratoires de la SEAFISH (GB) et du DFTI (DK).

Nous avons alors remarqué que si les valeurs obtenues pour le rapport Cl/Cd étaient tout à fait comparables celles obtenues pour Cl et Cd étaient supérieures de 10 %.

Or, si Cl et Cd dépendent de la vitesse, on remarque que le rapport Cl/Cd est indépendant de la vitesse. D'autre part, les dimensions importantes des modèles par rapport à celles de notre veine rendent possible l'apparition d'un effet de blocage.

La vitesse étant mesurée avant l'immersion du modèle et le débit de la pompe étant maintenu alors constant, il est probable qu'à la mise en place du panneau on assiste à une augmentation de la vitesse moyenne de l'écoulement dans lequel est placé le panneau. Nous avons donc introduit une correction empirique en prenant comme vitesse de référence la moyenne de la vitesse mesurée avant la mise en place du panneau et de la vitesse calculée avec un débit constant divisé par la section de la veine diminuée de la surface projetée du panneau.

soit  $V_0$  la vitesse mesurée et  $V_1$  la vitesse calculée avec "blocage" alors :

$$V_1 = V_0 \frac{S_v}{S_v - S_p \cos i \cos 15^\circ}$$

où  $S_v$  est la surface de la veine.

$S_p$  est la surface du panneau.

$i$  est l'incidence du panneau.

Nous prendrons comme vitesse de référence la vitesse  $V$  définie de la manière suivante :

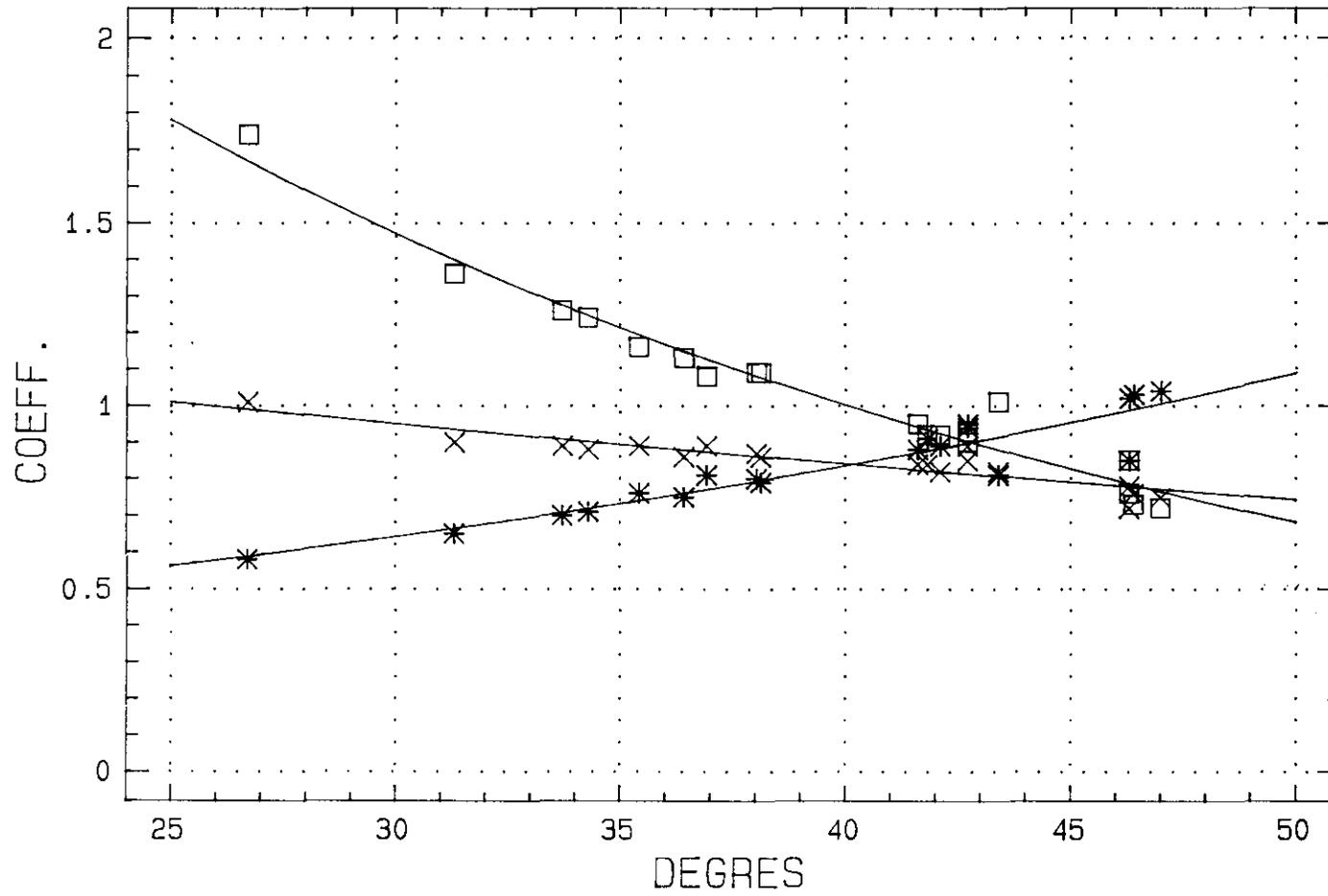
$$(11) \quad V = \frac{V_0 + V_1}{2}$$

Les résultats obtenus en tenant compte de cette correction sont maintenant tout à fait comparables à ceux obtenus dans les autres veines. La dispersion des points est comparable avec les résultats danois; les résultats anglais ne présentent pas de dispersion, leur point appartenant à une courbe lisse.

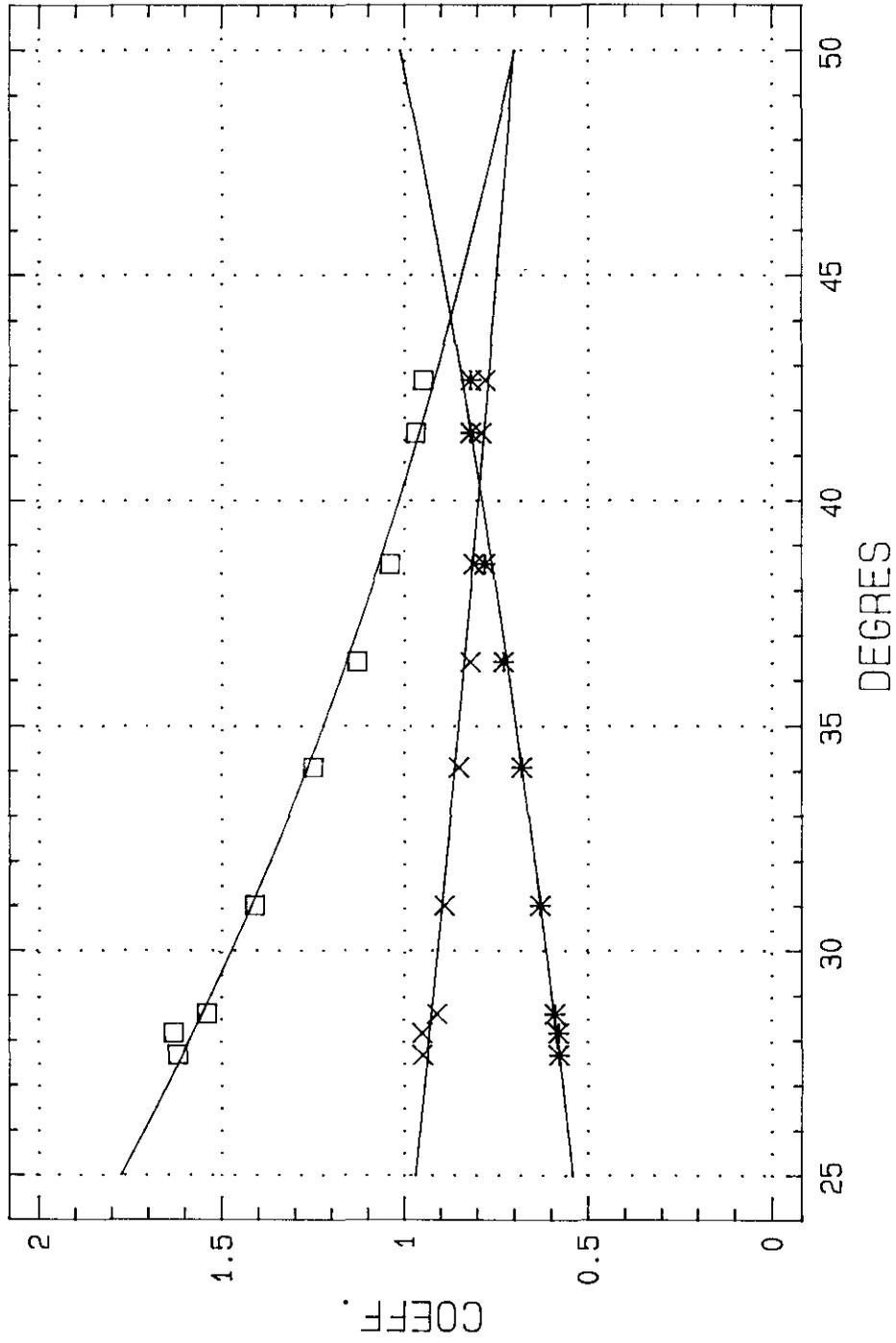
Nous appliquerons donc systématiquement cette correction pour l'étude des autres modèles.

Cette étude étant confidentielle jusqu'à la publication du rapport définitif, nous ne présentons ici que les résultats concernant le Vee Door qui ont permis de vérifier la concordance de nos résultats avec ceux des laboratoires étrangers.

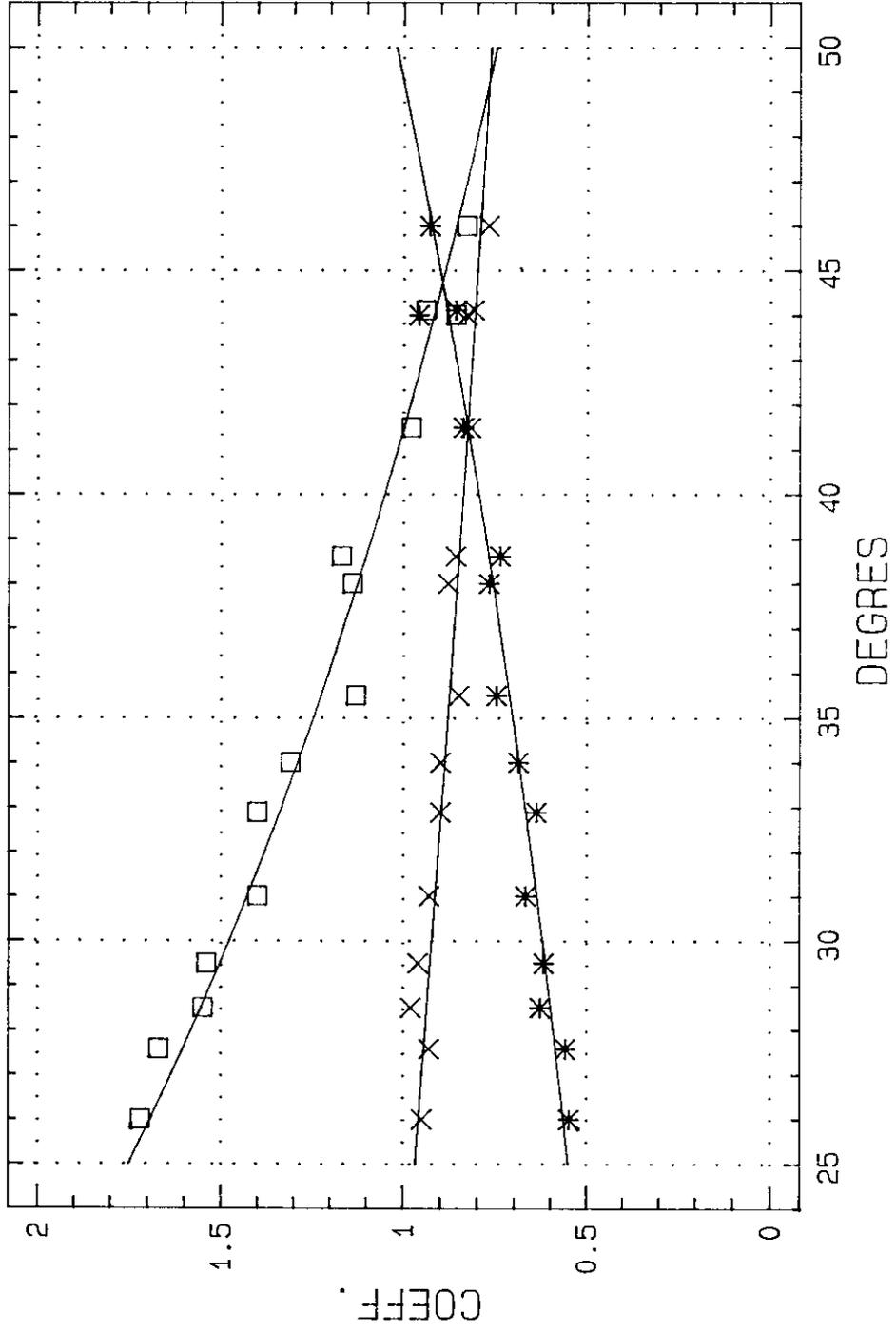
VEE DOOR (3 Kg) -IFREMER-  
x=CL \* =CD o=CL/CD



VEE DOOR (3 Kg) -SFIA-  
X=CL \* =CD O=CL/CD



VEE DOOR (3 Kg) -DFTI-  
x=CL \* = CD o = CL/CD



## ESSAIS EN MER.

Nous avons réalisé une campagne d'essais à bord du N/O "GWEN DREZ" du 2 au 16 août 1990 au large de Concarneau.

L'objectif de cette mission était de comparer les performances de 6 paires de panneaux, testés au préalable en laboratoire, en espérant que les valeurs observées valideraient les résultats obtenus en bassin.

Un matériel de visualisation sous-marine qui avait été embarqué nous a permis de réaliser des prises de vues des panneaux en action.

### 1. MATERIEL UTILISE.

#### 1.1. Matériel de pêche.

Nous avons utilisé un chalut standard pour tous les essais. Il s'agissait d'un chalut de type Grande Ouverture Verticale muni d'une corde de dos d'une longueur de 19.70 m. En avant du chalut le gréement était de type "à trois entremises" sa longueur étant 20 m. Entre ce gréement et les panneaux on trouvait des bras qui mesuraient 40 m.

Ensuite, partent les funes qui relient les panneaux au chalutier. Leur longueur dépendait de la sonde pratiquée.

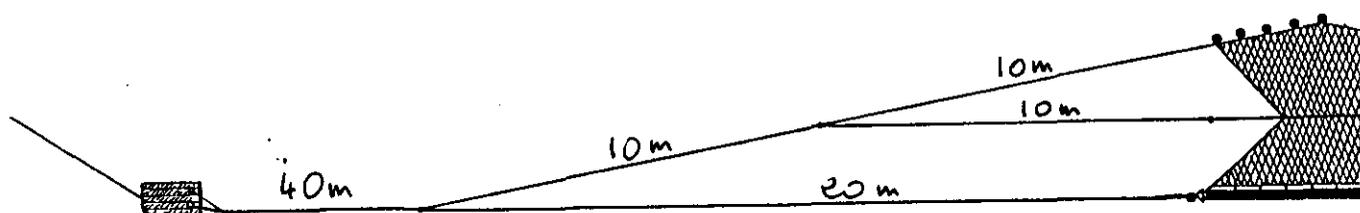


figure 31 : gréement utilisé.

Les panneaux ont été construits spécialement pour ces travaux. Leurs dimensions ont été calculées d'après les résultats expérimentaux obtenus en bassin, pour une incidence de 35 degrés, de telle sorte qu'ils aient tous la même portance. D'un modèle à l'autre les différences de surfaces compenseront les différences entre les Cl de manière à obtenir un même Ry pour tous les modèles.

### 1.2 Matériel de mesure.

Nous disposions d'un équipement Scanmar qui permet, par l'intermédiaire de capteurs positionnés sur le train de pêche, d'enregistrer simultanément et en temps réel :

- la distance entre les panneaux.
- la distance entre l'extrémité des ailes du chalut.
- l'ouverture verticale du chalut.
- la vitesse à l'entrée du chalut.

Pour mesurer les tensions sur les funes bâbord et tribord, et par conséquent la tension totale du train de pêche, deux capteurs de tension étaient positionnés entre les treuils et les réas du portique. Ces capteurs sont étalonnés avant et après chaque mission sur un banc d'étalonnage de l'Ifremer/Brest.

Nous procédions également à une acquisition des données du bord concernant : la position du navire, le cap suivi pendant la traine, la vitesse, l'angle de barre et la sonde. Les conditions météorologiques rencontrées étaient notées par ailleurs.

## 2. METHODOLOGIE.

Nous avons recherché deux zones de travail, par des sondes voisines de 30 m pour la première et 100 m pour la deuxième.

Une telle zone devait nous permettre de travailler à sonde constante pendant une durée de 1h15mn approximativement.

Les fonds pratiqués dans la première zone étaient composés de vase dans leur partie superficielle alors qu'ils étaient constitués d'un mélange de sable et de vase dans la seconde zone.

Arrivés sur un secteur nous mettons le chalut à l'eau, puis nous réglons le pas de l'hélice au cran 5. Après avoir attendu 5 mn pour que le train de pêche se stabilise nous effectuons 5 mn de mesure. Ensuite nous passons au pas 6, attendons 5 mn avant l'acquisition des données pendant 5 mn. Nous procédons selon cette méthode jusqu'au pas 9. L'ensemble de ces mesures concerne ce que nous appelons la traine "aller".

A l'issue de cette traine nous faisons demi-tour puis reprenons la même traine en sens inverse en faisant varier le pas du cran 5 au cran 9. Cette opération est nommée traine "retour".

Le parcours dans les deux sens d'une même traine a été réalisé pour s'affranchir des problèmes posés par la présence du courant et du vent. Les résultats retenus pour une traine seront constitués de la moyenne de ceux obtenus à l'aller et au retour.

### 3. RESULTATS.

Il est très difficile de comparer de manière précise les résultats obtenus en mer. En effet, d'une part on ne rencontre jamais exactement les mêmes conditions météorologiques et d'autre part on n'est jamais sûr de rencontrer rigoureusement les mêmes fonds d'une traine à l'autre.

Aussi en raison de la présence de paramètres externes dont l'influence sur nos mesures n'est pas chiffrable, nous ne pouvons raisonner que de manière globale en ne retenant de ces mesures que des ordres de grandeur.

Nous avons remarqué que globalement la géométrie du chalut reste identique d'un panneau à l'autre. Ceci tendrait à montrer que les résultats concernant le coefficient hydrodynamique de portance en bassin sont significatifs.

Ne mesurant que la tension totale du train de pêche, il est difficile d'interpréter les résultats pour se prononcer sur des différences de trainée d'un modèle à l'autre. Nous pouvons toutefois remarquer que, bien qu'elles ne soient pas en contradiction, les mesures effectuées en mer ne permettent pas de confirmer les mesures expérimentales.