

DIRECTION DE L'INGÉNIERIE ET DE LA TECHNOLOGIE

APPROCHE THEORIQUE DU COMPORTEMENT
DE SUSPENSIONS D'ELEVAGE DE MOULES
DANS LE COURANT

* * *

DIT/SOM n° 90.55 - Xavier BOMPAIS -



IFREMER

Centre de Brest

B. P. 70 - 29263 PLOUZANÉ
Tél. 98.22.40.40 - Télex 940627

Rapport numéro

DIT/SOM n° 90.55

Titre : APPROCHE THEORIQUE DU COMPORTEMENT DE SUSPENSIONS D'ELEVAGE DE MOULES DANS LE COURANT	Date : MARS 1990
	Nbre pages : 40 nbre figures :
Auteur(s) : Xavier BOMPAIS Origine : DIT / SOM	
Contrat/Projet IFREMER Intitulé : Conchyliculture en mer ouverte	N° : 371230

Résumé :

Les suspensions d'élevage de moules sur filière (ou long-lines) sont décrites et modélisées ainsi que les efforts hydrodynamiques qui s'y appliquent.

Le rapport présente ensuite une modélisation de leur comportement dans le courant, s'attachant à décrire les déformées statiques, les effets de masque et les phénomènes vibratoires qui peuvent survenir.

Deux sites d'implantation sont traités en application, chacun avec différents cas de chargement.

Le rapport conclut en conseillant de choisir une orientation des filières d'élevage dans le courant différente de celle retenue pour les deux sites étudiés.

Mots-clés : long-lines - mytiliculture - mer ouverte - modélisation

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

Diffusion :

LIBRE

**APPROCHE THEORIQUE DU
COMPORTEMENT DE SUSPENSIONS D'ELEVAGE
DE MOULES DANS LE COURANT**

**Xavier BOMPAIS
DIT/SOM**

SOMMAIRE

1-BUT DE L'ETUDE	3
2-MODELISATION DES SUSPENSIONS D'ELEVAGE DE MOULES	4
2.1 Choix d'un modèle	
2.2 Détermination du poids propre d'une suspension	
2.3 Calcul du diamètre des suspensions modélisées	
3-MODELISATION DES EFFORTS HYDRODYNAMIQUES APPLIQUES SUR LES SUSPENSIONS	6
3.1 Recensement des efforts appliqués	
3.2 Expression des forces hydrodynamiques	
4- MODELISATION DE LA DEFORMEE DANS LE COURANT	8
4.1 Choix d'un modèle	
4.2 Etude d'une suspension non lestée	
4.3 Etude d'une suspension lestée	
4.4 Effet de masque	
5- PHENOMENES VIBRATOIRES	11
5.1 Description du phénomène	
5.2 Fréquence d'apparition des tourbillons	
5.3 Amplitude des vibrations	
6- APPLICATION AUX SUSPENSIONS DE FILIERE SF	13
6.1 Caractéristiques des suspensions et des sites	
6.2 Suspensions étudiées	
6.3 Suspensions non lestées	
6.4 Suspensions avec lest en béton	
6.5 Suspensions avec lest en acier	
6.6 Comparaison des résultats obtenus	
6.7 Effet de masque	
6.8 Analyse modale	
CONCLUSIONS	30
REFERENCES	31
ANNEXES	32
A1- Calcul des efforts appliqués par les lests de béton dans le courant	
A2- Calcul des efforts appliqués par les lests d'acier dans le courant	
A3- Recensement des formules de calcul des efforts hydrodynamiques appliqués sur un câble	
A4- Caractéristiques des suspensions étudiées	

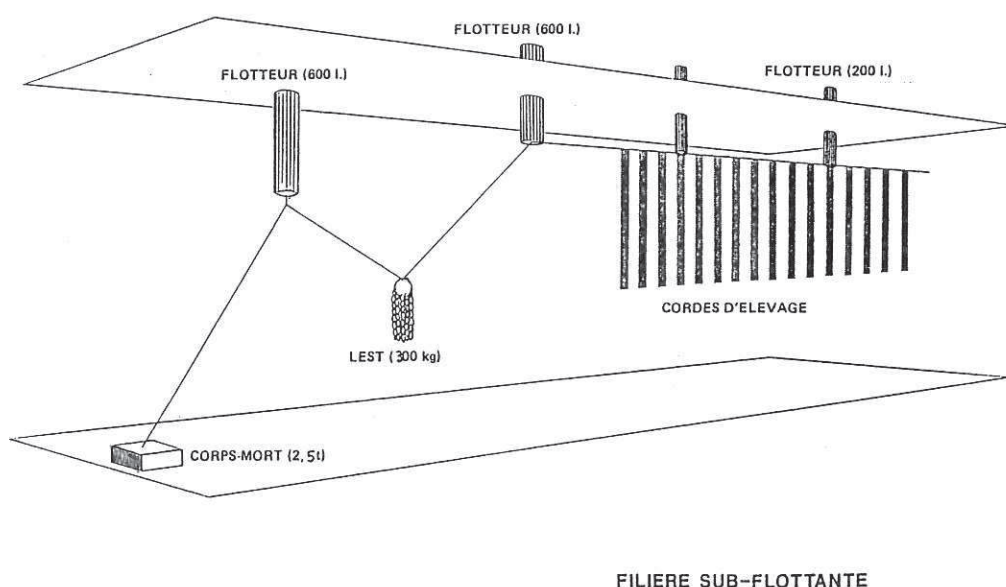
1- BUT DE L'ETUDE

Durant les essais de filières mytilicoles sub-flottantes (SF) sur les sites de Corsen et Roscanvel, il a été constaté sur certaines suspensions d'élevage de moules, des phénomènes d'emmêlement et de frottements entraînant parfois des pertes de coquillages ou une perturbation de leur croissance.

Les observations effectuées sur le terrain (à partir de la surface et en plongée sous-marine), ont laissé penser jusqu'à présent que le problème rencontré était dû à une différence de comportement des suspensions les unes par rapport aux autres, induite par l'orientation de l'axe longitudinal des filières d'élevage dans la direction du courant dominant (de valeur moyenne élevée).

L'objectif de cette étude est de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses et de fournir des éléments d'explication théoriques aux phénomènes observés.

Après une modélisation des suspensions d'élevage de moules et des efforts hydrodynamiques qui s'y appliquent, le rapport présente une étude de leur déformée statique dans le courant, ainsi qu'une approche des effets de masque et des phénomènes vibratoires qui peuvent survenir. Les cas de Corsen et Roscanvel sont ensuite traités en application.



2- MODELISATION DES SUSPENSIONS D'ELEVAGE DE MOULES

2.1 Choix d'un modèle

Une corde à moules est grossièrement cylindrique, d'une longueur importante par rapport à son diamètre et généralement flexible. Pour la modéliser, on pourra l'assimiler à un câble, rotulé à son extrémité supérieure et libre à son extrémité inférieure.

2.2 Détermination du poids propre d'une suspension

Les moules sont fixées autour d'un support de diamètre ϕ et de densité ρ_s (dans l'air) selon une densité linéique d (dans l'air). La corde à moules a une longueur L et un diamètre D . Pour le calcul de son poids propre, on utilise un coefficient μ caractérisant le volume réellement occupé par les moules par rapport au volume extérieur [8] [9]. Le poids apparent dans l'eau d'une suspension est alors:

P = Poids apparent des moules + Poids apparent du support

$$P_{\text{eau}} = g \mu \left[\pi L (D^2 - \phi^2) / 4 \right] (\rho_m - \rho_e) + g \left(\pi L \phi^2 / 4 \right) (\rho_s - \rho_e)$$

tandis que le poids dans l'air d'une suspension non égouttée aura pour expression :

$$P_{\text{air}} = g \pi L (D^2 - \phi^2) [\rho_m \mu + \rho_e (1 - \mu)] / 4 + g \pi L \phi^2 \rho_s / 4$$

avec:

g : accélération de la pesanteur ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

μ : coefficient de remplissage

ϕ : diamètre du support

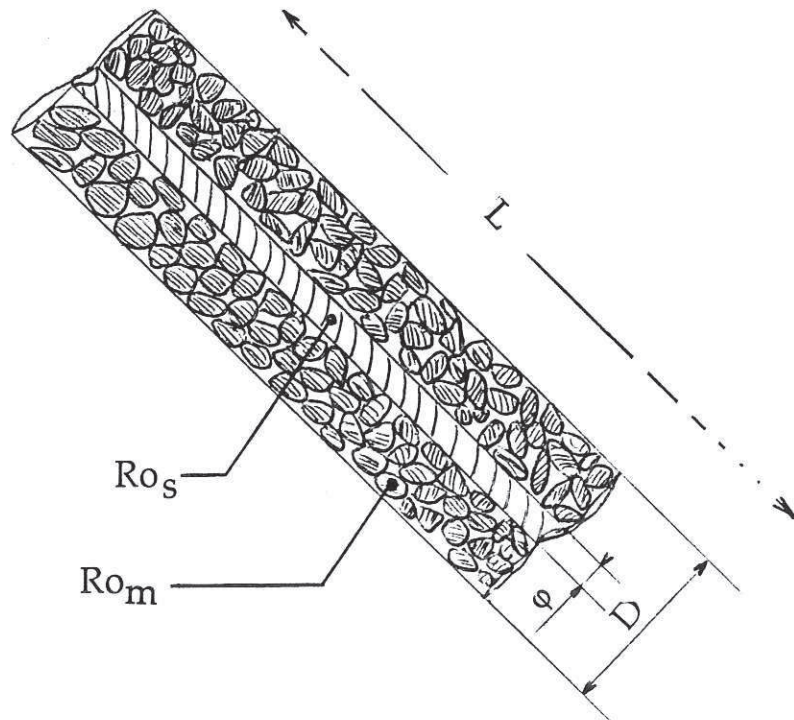
D : diamètre extérieur de la suspension

L : longueur de la suspension

ρ_e : masse volumique de l'eau de mer

ρ_m : masse volumique des moules

ρ_s : masse volumique du support



Des mesures réalisées par l'ENSM sur des cordes à moules réelles [9] ont permis de déterminer le coefficient de remplissage et la masse volumique des moules :

$$\begin{aligned}\mu &= 0.5 \\ \rho_m &= 1230 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

NB : la masse volumique dépend du stade de maturation des moules (quantifié par l'indice de condition de Medcoff-Needler).

$$\begin{aligned}\text{On prendra} & \quad \rho_e = 1030 \text{ kg/m}^3 \\ \text{et} & \quad \rho_s = 910 \text{ kg/m}^3 \text{ (cordage en polypropylène)}\end{aligned}$$

2.3. Calcul du diamètre des suspensions modélisées

La connaissance de la densité d'élevage d permet de calculer le diamètre D de la suspente en fin d'élevage. On suppose que les moules sont réparties uniformément autour du support d'élevage (câble de diamètre ϕ):

$$D = (4d / \pi \mu \rho_m + \phi^2)^{1/2},$$

μ et ρ_m étant les paramètres définis dans le paragraphe précédent.

La densité en moule finale est variable selon les sites et les structures d'élevage. En Languedoc-Roussillon, sur la majorité des filières de sub-surface, les suivis biologiques effectués par la station IFREMER de Sète [3] ont montré que le chargement initial moyen variait, selon le site, de 3 kg/mètre de suspension d'élevage (mesurée dans l'air) pour de petites moules à 4 kg/m pour de grosses moules, la charge finale brute (avant la récolte) variant elle de 6 kg/m à 12 kg/m.

3- MODELISATION DES EFFORTS HYDRODYNAMIQUES APPLIQUES SUR LES SUSPENSIONS

3.1. Recensement des efforts appliqués

La corde à moules est ici étudiée en équilibre statique dans le fluide en mouvement (régime stationnaire). Elle est soumise à son propre poids P , à une force de pression dynamique, à une force de frottement visqueux (engendré par le mouvement du fluide le long de la corde), à un effort de liaison T avec l'aussière et éventuellement à une force extérieure P_0 (corde lestée en bout) [4].

3.2. Expression des forces hydrodynamiques

La corde est divisée en segments. Les forces hydrodynamiques qui s'exercent sur chacun des segments sont habituellement décomposées en deux projections selon un axe tangentiel et un axe normal à l'élément. Leur valeur est proportionnelle au carré de la vitesse du fluide :

$$F_n = 1/2 * c_n * \rho_e * D * L * V^2$$

$$F_t = 1/2 * c_t * \rho_e * D * L * V^2$$

avec c_n : coefficient hydrodynamique normal
et c_t : coefficient hydrodynamique tangentiel

Ces coefficients hydrodynamiques dépendent des caractéristiques de la corde (état de surface, discontinuité...). Concernant les câbles (auxquels on assimile les cordes à moules), les formules de calcul sont nombreuses, les valeurs obtenues étant parfois éloignées les unes des autres [1]. L'approche la plus courante consiste à les exprimer en fonction de l'incidence θ du câble par rapport au courant, d'une valeur initiale C_N (correspondant au câble perpendiculaire au flux du fluide) et d'un coefficient de frottement relatif δ .

On trouvera en annexe A3 un tableau faisant la synthèse des différentes formules utilisables. On remarquera que toutes les formules (sauf celles de Springston) donnent un effort normal dépendant du carré du sinus de l'angle θ , les formules donnant l'effort normal étant quant à elles plus disparates. On notera également que certaines tiennent compte de la variation du nombre de Reynolds avec l'inclinaison.

tangentiel

Les formules les plus utilisées sont les suivantes :

- Formules de Wilson :

$$\begin{aligned} c_n &= C_N * \sin^2\theta \\ c_t &= C_N * \delta * \cos^2\theta \end{aligned}$$

- Formules de Pode (hypothèses de Landweber):

$$\begin{aligned} c_n &= C_N * \sin^2\theta \\ c_t &= C_N * \delta \end{aligned}$$

- Formules d'Eames :

$$\begin{aligned} c_n &= C_N * \{(1-\delta) * \sin^2\theta + \delta * \sin \theta\} \\ c_t &= C_N * \delta * \cos \theta \end{aligned}$$

NB: Les formules de Pode donnent un effort tangentiel même lorsque l'élément est perpendiculaire au courant. En pratique, il faut éviter de les utiliser pour des inclinaisons proches de la verticale ou de l'horizontale

Des mesures en bassin de carènes réalisées par l'ENSM sur des cordes à moules réelles [9] ont permis de déterminer les coefficients C_N et δ à partir de la mesure des efforts et de l'utilisation des formules de Pode :

$$C_N = 1,5 \text{ en moyenne}$$

$$\delta = 0,10 \text{ à } 0,15$$

Certains logiciels de calcul de structures marines, en particulier le logiciel FLOSYS implanté sur Micro-Vax au Centre IFREMER de Brest, utilisent la formule de Morison pour déterminer les efforts appliqués sur des éléments-barres. Dans ce cas, en statique, la force normale due au courant est donnée par la formule :

$$F_n = 1/2 * C_N * \rho_e * D * L * V^2 * \sin \theta$$

et la force tangentielle par :

$$F_t = 1/2 * C_N * \delta * \rho_e * D * L * V^2 * \cos \theta$$

Ces formules s'éloignent des modèles présentés ci-dessus, notamment en ce qui concerne l'effort normal proportionnel à $\sin \theta$ et non pas $\sin^2\theta$. Pour des angles proches de 90° , la différence est évidemment importante.

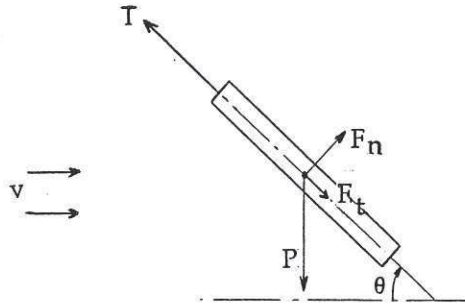
Pour le calcul des efforts hydrodynamiques sur des éléments-câbles, FLOSYS utilise une formule équivalente (en statique), à celle de Pode pour la composante normale, sans tenir compte du frottement (pas de composante tangentielle).

Les résultats des calculs par les deux types de formule (Morison et Pode) ainsi que le choix de l'élément-barre ou de l'élément-câble pour la modélisation par FLOSYS, seront discutés dans le paragraphe 6.6.

4- MODELISATION DE LA DEFORMEE DANS LE COURANT

4.1. Etude d'une suspension non lestée

Un câble de densité linéique uniforme, placé dans un courant et non lesté en bout, demeure rectiligne et peut être modélisé par un cylindre incliné d'un angle θ par rapport à l'axe du courant [4].



L'inclinaison théorique θ peut être exprimée en fonction des différents paramètres caractéristiques.

Le cylindre étant considéré en équilibre (étude en statique), la somme vectorielle des efforts qui s'y appliquent est nulle. En particulier, selon l'axe perpendiculaire,

$$P \cos \theta - F_n = 0$$

$$\text{soit } \cos \theta = F_n / P$$

Si l'on utilise les formules de Ponde, l'équation s'écrit :

$$\cos \theta = [2 \cdot C_N \cdot \rho_e \cdot V^2 / \delta / D / (\rho_m - \rho_e) / g] \cdot \sin^2 \theta \quad (1)$$

Elle est du type ($\cos \theta = K \cdot \sin^2 \theta$) ou bien ($\cotg \theta = K \cdot \sin \theta$) et peut être ici facilement résolue par un calcul itératif:

$$\theta_{i+1} = 1 / \arctg [K \cdot \sin(\theta_i)]$$

Il est également possible d'utiliser l'expression de la traînée T_O d'une suspenste placée verticalement,

$$T_O = F_n / \sin^2 \theta = 1/2 \rho_e \cdot C_N \cdot D \cdot L \cdot V^2$$

L'équation (1) peut alors s'écrire :

$$T_O / P \cdot \cos^2 \theta + \cos \theta - T_O / P = 0$$

équation du 2nd degré en $\cos \theta$ dont la solution est:

$$\cos \theta = 1/2 \{ [1 + 4 \cdot (T_O / P)^2]^{1/2} - 1 \} / (T_O / P)$$

Les résultats obtenus à partir de ces équations seront comparés à ceux obtenus par FLOSYS utilisant la formule de Morison.

4.2. Etude d'une suspension lestée

Lorsqu'un lest est amarré à son extrémité, le câble placé dans un courant ne demeure pas rectiligne comme dans le cas précédent. Sa déformée est une fonction relativement complexe des différents paramètres mis en jeu. Pour la déterminer, il faut faire appel à des méthodes numériques de résolution [1] [2].

Celle qui est utilisée par le logiciel FLOSYS, dont des résultats seront présentés dans le paragraphe 6, est basée sur un calcul itératif à partir d'une position arbitraire, avec optimisation des déplacements (notion de matrice de raideur tangente).

La seconde méthode qui sera également utilisée dans le paragraphe 6 est basée sur la résolution d'équations différentielles par la méthode de Runge-Kutta (logiciels CAB et CABE développé par M. LE BOULLUEC, DIT/TNP).

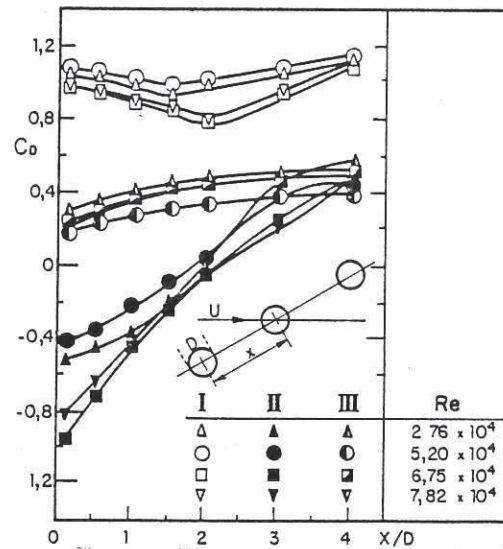
4.3. Effet de masque

Des essais en bassin ont été réalisés par Tanida, Orajima et Watanabe (1973), pour déterminer l'interaction de cylindres fixes placés les uns derrière les autres dans le courant [6].

Quand deux cylindres de même diamètre sont alignés, le coefficient de traînée du premier est peu affecté. Pour le second, si la distance qui le sépare du premier est inférieure à la longueur nécessaire à la formation d'un sillage, ($3 D$ pour $Re=10^4$), l'effet de masque est très prononcé: le coefficient de traînée devient petit, voire nul (phénomène bien connu des coureurs cyclistes...).

Lorsque trois cylindres sont alignés, le comportement du premier est là encore peu affecté (coefficient de traînée de 1.2, ce qui équivaudrait à 1.5 pour les cordes à moules). Pour les deux autres, si leur espacement est supérieur à $4 D$, les coefficients de traînée sont quasiment égaux (0.4, ce qui correspondrait à 0.5 pour des cordes à moules). Quand l'espacement est plus faible, le coefficient de traînée du deuxième décroît légèrement mais celui du troisième décroît très rapidement devenant même négatif si la distance est inférieure à $3 D$.

Les valeurs des coefficients de traînée tendent vers leur valeur limite (correspondant au cas de cylindres isolés) pour un espacement d'environ $20 D$.

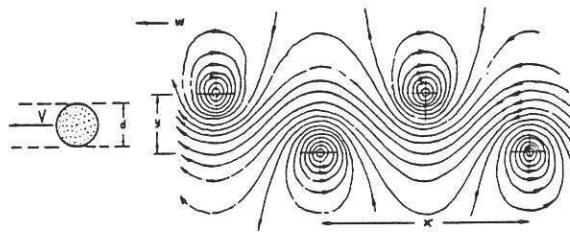


Peu d'études ont été consacrées à l'effet de masque sur des cylindres ou des câbles rotulés à une extrémité et libres à l'autre, comme c'est le cas pour les suspensions d'élévation de moules. On peut supposer, selon les éléments évoqués ci-dessus, que le rapprochement des extrémités libres de certaines suspensions provoque, sous certaines conditions, une diminution des efforts de traînée sur celles qui sont sous le courant (dans les proportions évoquées dans le paragraphe ci-dessus), entraînant évidemment un nouveau rapprochement. L'interaction des deux phénomènes serait complexe à modéliser complètement.

5- PHENOMENES VIBRATOIRES

5.1. Description du phénomène [5]

Dans le sillage d'un cylindre mal profilé (tel qu'une corde à moules), on trouve un système caractéristique de tourbillons, relativement stable, appelé "sillon de tourbillon à deux rangées" ou "rue de tourbillon" (phénomène du même type que celui observable, sous certaines conditions de vent, sur les fils aériens de lignes électriques ou téléphoniques).



De chaque côté du cylindre s'échappe alternativement une rue de tourbillons. Le système de la rue de tourbillons se "déplace" dans la même direction que le cylindre.

Pour les suspensions d'élevage, des observations en plongée semblent indiquer que la présence des moules ne contrarie pas l'apparition de ces tourbillons

5.2. Fréquence d'apparition des tourbillons [6]

Dans une forme adimensionnelle, la fréquence f de formation des tourbillons d'un côté de la rue est représentée par le nombre de Strouhal :

$$S = fD/V,$$

D : diamètre du cylindre
 V : vitesse d'écoulement

La création de ces tourbillons engendre une force de portance périodique et peut engendrer des oscillations transversales, (dans le plan perpendiculaire à l'écoulement) de fréquence f , et longitudinales (parallèlement à l'écoulement) de fréquence $2f$.

Pour le type d'écoulement qui nous concerne, Bishop et Hassan (1963) ont montré que les oscillations transversales (resp. longitudinales) sont détectées lorsque le nombre sans dimension V/f_0D (f_0 étant la fréquence propre du cylindre) est compris entre 4 et 5 (resp. 2 et 2,5) et qu'elles atteignent leur maximum d'amplitude pour des valeurs comprises entre 6 et 8 (resp. 3 et 4) (domaine où l'on trouve la synchronisation $f=f_0$).

5.3. Amplitude des vibrations [6]

Le maximum d'amplitude des vibrations est de l'ordre de D (diamètre du cylindre) (cas limite: $2 D$) pour les vibrations transversales et de l'ordre de $0,1 D$ (cas limite $0,2 D$) pour les vibrations longitudinales.

6- APPLICATION AUX SUSPENSIONS DE FILIERE SF

6.1. Caractéristiques des suspensions et des sites

Sur le site de Corsen :

Durant le cycle d'élevage 88/89, les suspensions d'élevage étaient constituées d'une nappe de filet de chalut (formant un cylindre de diamètre $\phi = 20$ mm environ), d'une longueur de 6 mètres, leur écartement étant de 0,80 m.

Sur ce site, les mesures de courant ont mis en évidence une valeur maximale de 0,5 m/s par marée moyenne de vive-eau (coef. 95), selon l'axe longitudinal de la filière.

Sur le site de Roscanvel :

Les suspensions d'élevage sont, pour leur majorité, constituées d'un support en polypropylène (diamètre $\phi = 20$ mm), d'une longueur de 5 mètres, leur écartement étant de 1,20 m. Elles sont lestées à leur extrémité libre (sauf les suspensions posées les premières), certaines avec des lests de béton d'environ 4 kg (dans l'air), d'autres avec des gueuses en acier d'environ 12 kg.

Le courant maximal est de 1 m/s par marée de vive-eau moyenne (coef. 95, mesures SHOM des courants en Rade de Brest).

6.2. Suspensions étudiées

Sur les deux sites, les phénomènes de frottement ont été constatés dès le début de l'élevage : nous observerons donc le comportement des suspensions avec des densités en moules faibles, nous verrons ensuite l'influence de l'ajout de lests en béton et en acier et enfin nous regarderons le comportement des suspensions pour des charges linéiques plus fortes (milieu ou fin d'élevage).

Etant données la technique et les conditions de mise en place des moules sur le support, on peut évaluer une variation de charge d'une suspension à l'autre de l'ordre de 25 % en début d'élevage, ce qui correspond par exemple à une suspension chargée à 3 kg/m et la suivante à 4 kg/m.

Pour étudier le comportement de suspensions plus chargées, correspondant à un milieu d'élevage, on évalue la différence de charge linéique à la même valeur (25%), ce qui correspond par exemple à une suspension chargée à 6 kg/m et la suivante à 8 kg/m.

L'annexe A4 donne les caractéristiques géométriques et hydrodynamiques des suspensions étudiées.

6.3. Résultats obtenus avec les suspensions non lestées

□ Pour Corsen :

Les figures de la planche 5 montrent le comportement théorique de deux suspensions écartées de 0.80 m correspondant aux début et milieu d'élevage.

Elles font apparaître que l'extrémité de la corde la moins chargée se rapproche de la corde la plus chargée placée derrière elle.

- Selon l'étude réalisée avec FLOSYS (planche 5):

Pour les suspensions modélisées par des éléments-barres, l'espacement théorique entre les axes, en bas des cordes, devient très faible (2 cm pour le cas de chargement à 3 et 4 kg/m et 6 cm pour le cas 6 et 8 kg/m: il y a contact des suspensions dans les deux cas.

Pour les suspensions modélisées par des éléments-câbles, l'espacement théorique entre les axes, en bas des cordes est de 25 cm pour le cas de chargement à 3 et 4 kg/m et 12 cm pour le cas 6 et 8 kg/m

- Selon les résultats obtenus avec les formules de Pode :

L'espacement est de 16 cm entre les axes pour un chargement de 3 et 4 kg/m et 18 cm pour un chargement de 6 et 8 kg/m, ce qui laisse présager, dans les deux cas, un contact des suspensions au moindre écart de comportement par rapport au modèle théorique.

□ Pour Roscanvel :

Selon l'étude menée avec FLOSYS sur les éléments-barres (planche 6), l'espacement entre les suspensions entraîne le contact des extrémités inférieures (écart entre les axes de 6 cm pour le cas de chargement 3 et 4 kg/m et 7 cm pour 6 et 8 kg/m). Pour les suspensions modélisées par des éléments-câbles, l'espacement entre les axes est de 23 cm (soit 13 cm entre les génératrices des cylindres) pour 6 et 8 kg/m et 26 cm pour 3 et 4 kg/m. Mêmes conclusions avec les calculs selon la méthode de Pode.

□ Conclusion :

Pour les deux sites, l'étude réalisée avec FLOSYS sur les éléments-barres montre qu'il y a **contact des extrémités inférieures** des suspensions.

Sur les éléments-câbles, la tolérance est de 15 cm maximum, ce qui laisse craindre un frottement et des **risques d'emmêlement au moindre écart par rapport au modèle théorique.**

6.4 Résultats obtenus avec les suspensions munies d'un lest en béton

Les études menées avec FLOSYS d'une part (planche 1) et avec les formules de Pode (planche 2) ou d'Eames (planche 3) d'autre part montrent que le lest en béton (description en annexe A1) disposé à l'extrémité de certaines suspensions d'élevage de Roscanvel permet de garder un écartement comparable à celui qu'elles prennent en l'absence de lest sur les trois quarts de leur longueur mais :

- du fait de sa portance dans le courant et de sa faible densité, **il a tendance à tirer la corde à moules vers le haut**, ce qui n'est évidemment pas l'effet recherché;

- **il a très probablement un comportement de "feuille morte"**, imposant des mouvements désordonnés à la corde.

6.5 Résultats obtenus avec les suspensions munies d'un lest en acier

Dans le cas de l'étude menée dans un courant permanent de 1m/s, et sans tenir compte d'un éventuel effet de masque (cf paragraphe 6.6), la modélisation montre que les suspensions lestées avec de l'acier (description du lest en annexe A2) sont bien écartées les unes des autres et ne risquent donc pas à priori de s'emmêler (planches 1, 2 et 3).

Le lest en acier est probablement sur-dimensionné. Un calcul rapide montre en effet que, pour les mêmes conditions de courant et, comme précédemment, sans tenir compte de l'effet de masque ou de phénomènes vibratoires, l'écartement est encore acceptable pour un lest d'une masse de 4 kg.

Planche 1 : Déformées obtenues avec FLOSYS (éléments-câbles)

Charges de 3 et 4 kg/m

Charges de 6 et 8 kg/m

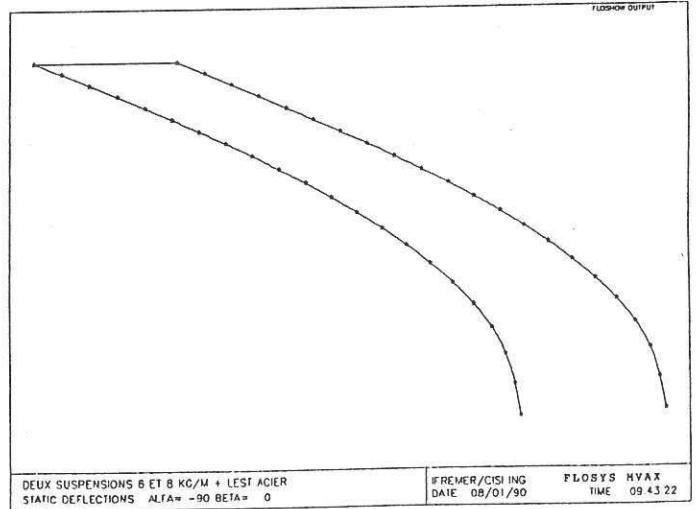
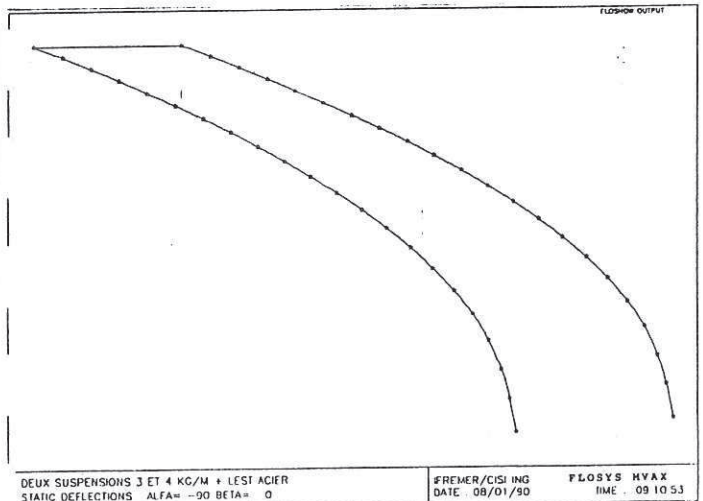
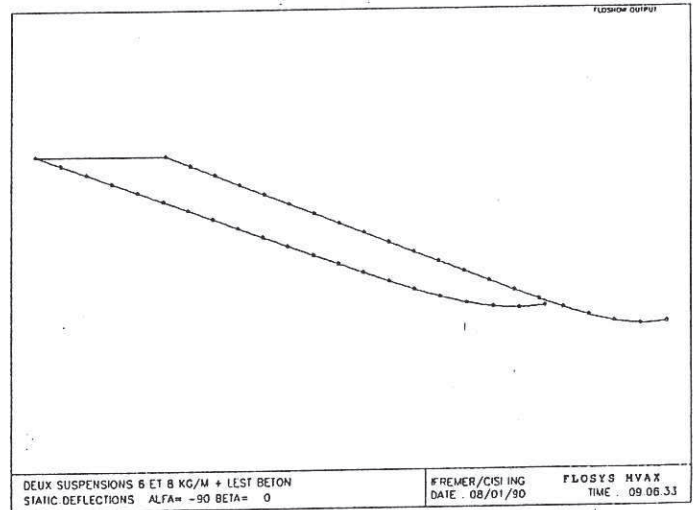
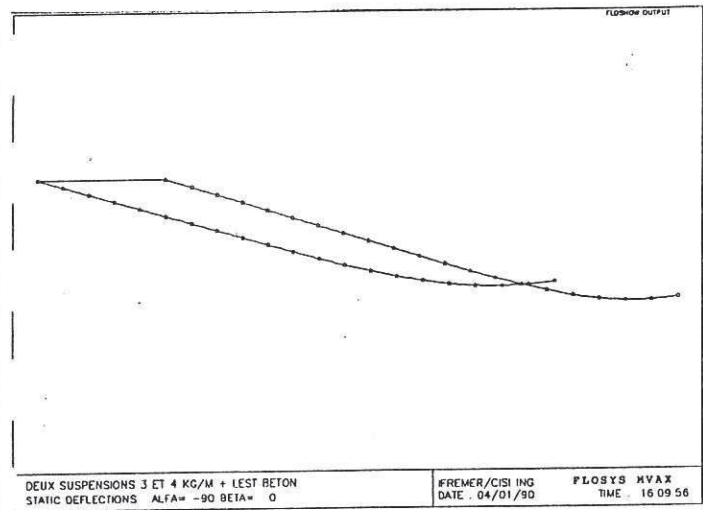
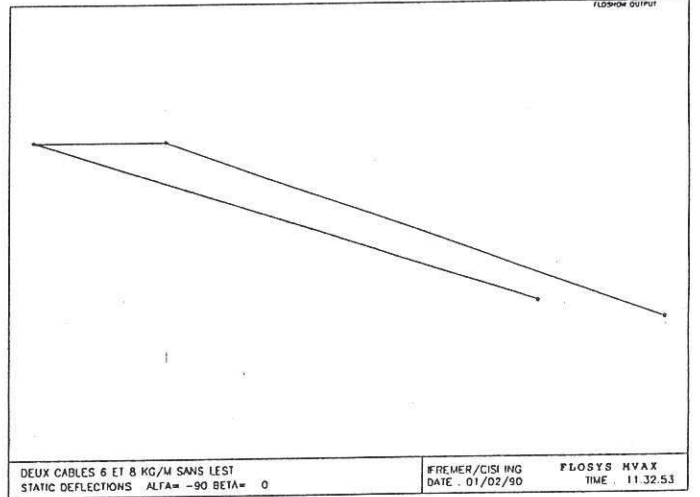
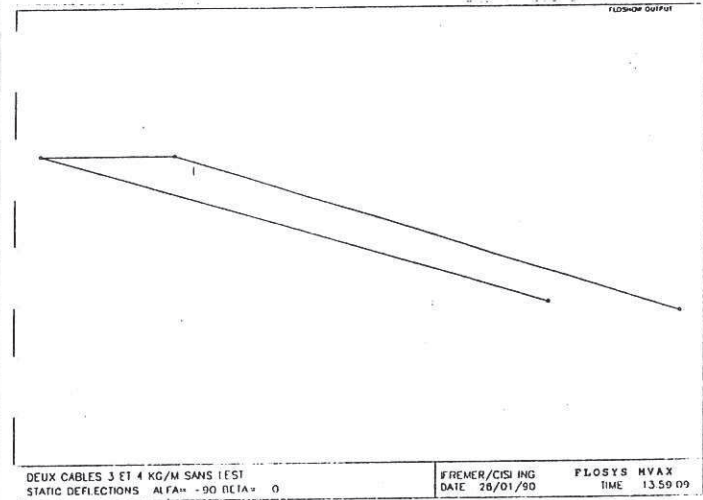


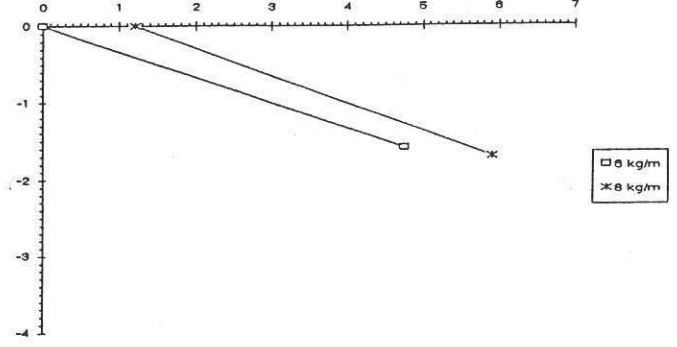
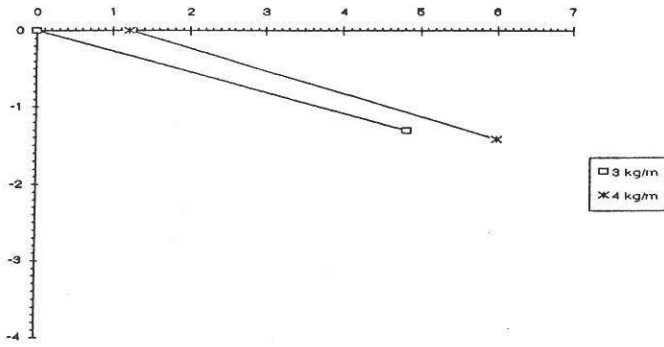
Planche 2 : Déformées obtenues à partir des formules de PODE (CAB)

Charges de 3 et 4 kg/m

Charges de 6 et 8 kg/m

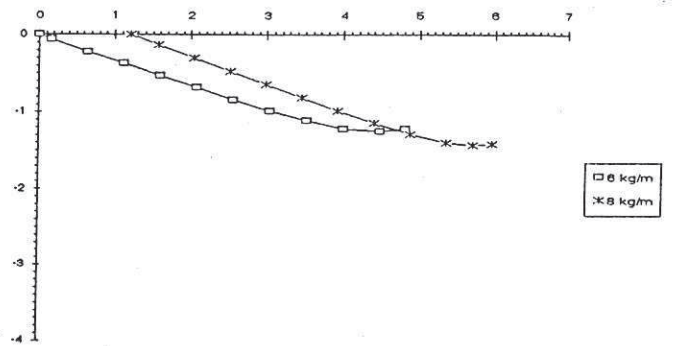
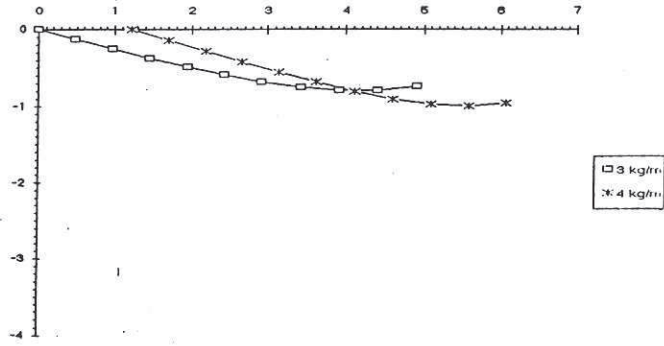
SUSPENSIONS CHARGÉES A 3 ET 4 kg/m + sans lest
(Formules de PODE)

SUSPENSIONS CHARGÉES A 6 ET 8 kg/m + sans lest
(Formules de PODE)



SUSPENSIONS CHARGÉES A 3 ET 4 kg/m + lest béton
(Formules de PODE)

SUSPENSIONS CHARGÉES A 6 ET 8 kg/m + lest béton
(Formules de PODE)



SUSPENSIONS CHARGÉES A 3 ET 4 kg/m + lest acier
(Formules de PODE)

SUSPENSIONS CHARGÉES A 6 ET 8 kg/m + lest acier
(Formules de PODE)

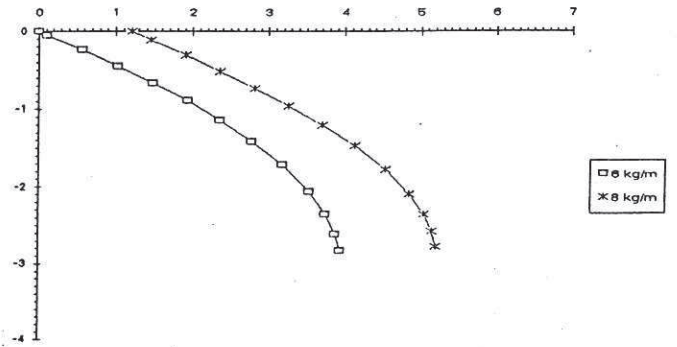
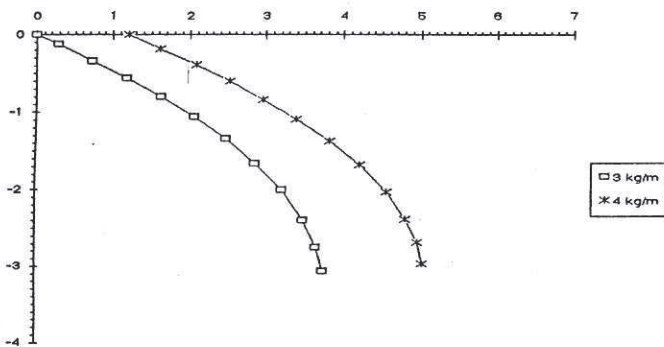


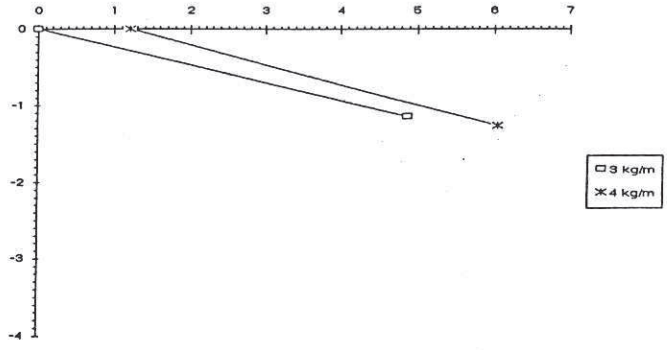
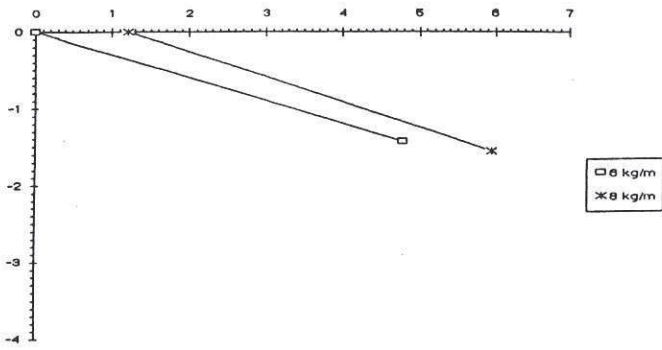
Planche 3 : Déformées obtenues à partir des formules d'EAMES (CABE)

Charges de 3 et 4 kg/m

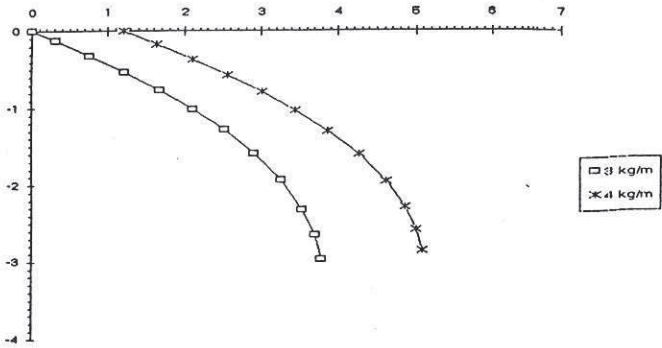
Charges de 6 et 8 kg/m

SUSPENSIONS CHARGÉES A 6 ET 8 kg/m + sans lest
(Formules d'Eames)

SUSPENSIONS CHARGÉES A 3 ET 4 kg/m + sans lest
(Formules d'Eames)



SUSPENSIONS CHARGÉES A 3 ET 4 kg/m + lest acier
(Formules d'Eames)



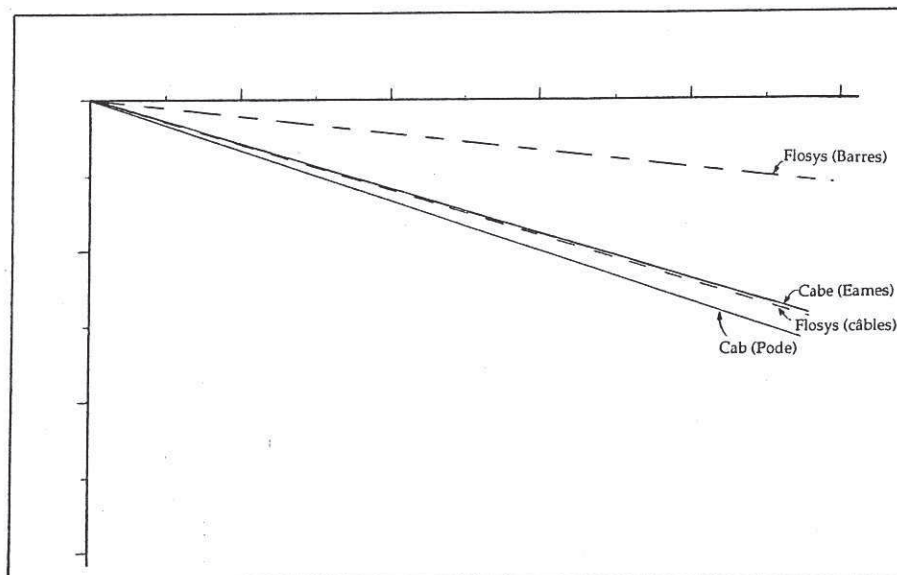
6.6 Comparaison des résultats obtenus

Dans le cas de suspensions non lestées, comme on pouvait s'y attendre (cf paragraphe 3.2.) les formules utilisées par FLOSYS pour le calcul des efforts hydrodynamiques sur des éléments-barres (planche 6) entraînent des inclinaisons des suspensions par rapport au courant largement plus faibles que celles obtenues à l'aide des formules de Pode (planche 2) ou d'Eames (planche 3).

En raison de ces résultats, il semble peu réaliste de modéliser les suspensions d'élevage de moules par de tels éléments-barres. La modélisation par des éléments-câbles est préférable, même si elle ne permet pas d'introduire de "coefficient hydrodynamique normal" (sans influence cependant sur l'inclinaison de suspensions non lestées, cf paragraphe 4.1).

Pour les suspensions lestées (modélisées par 20 éléments-câbles), FLOSYS donnent des déformées très proches de celles données par le logiciel utilisant les formules de Pode ou d'Eames (planches 1, 2 et 3);

Dans tous les cas de figure, les formules de Pode et d'Eames donnent également des résultats très voisins les uns des autres, avec toutefois une inclinaison des suspensions par rapport au courant plus faible avec les formules d'Eames (planches 2 et 3).

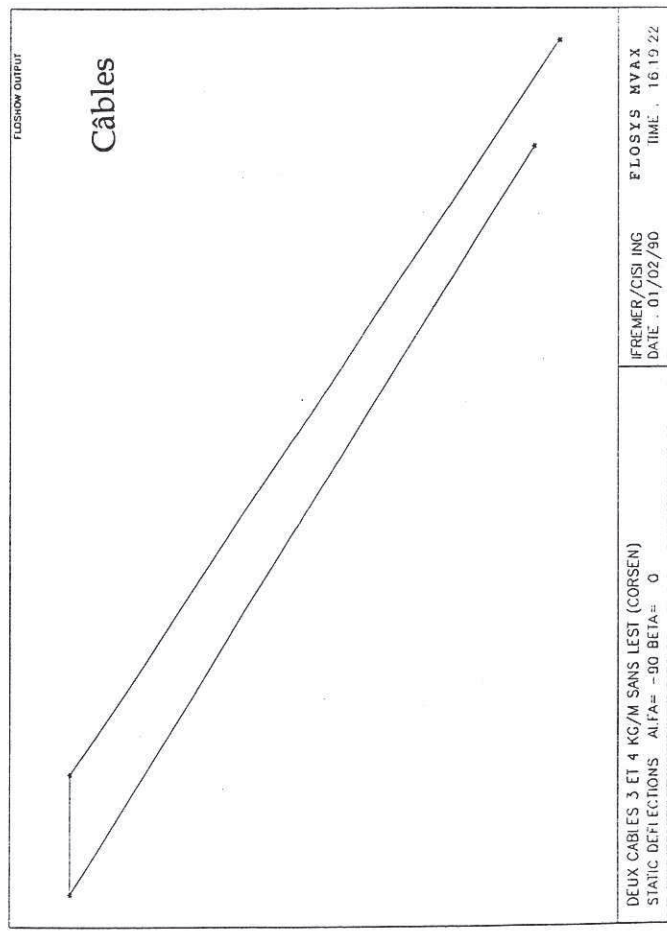
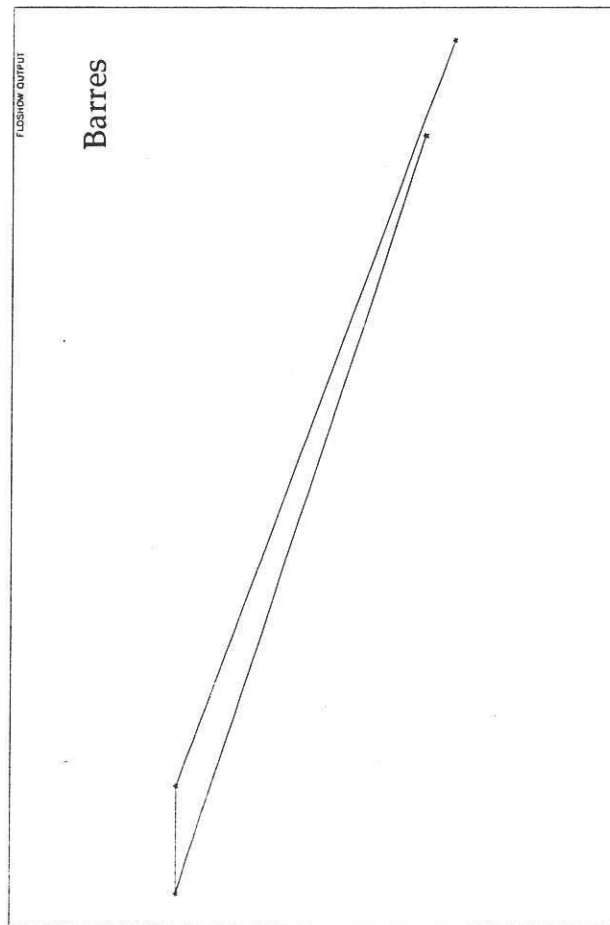


Comparaison des résultats obtenus pour une suspension non lestée
(charge de 6 kg/m)

En conclusion, à l'exception du calcul FLOSYS sur des éléments-barres, les résultats obtenus par les différentes méthodes sont concordants (selon une tolérance sûrement très inférieure à celle due aux incertitudes sur les paramètres d'entrée...).

Planche 5 : Corsen, comparaison barres / câbles (FLOSYS)

Charges de 3 et 4 kg/m



Charges de 6 et 8 kg/m

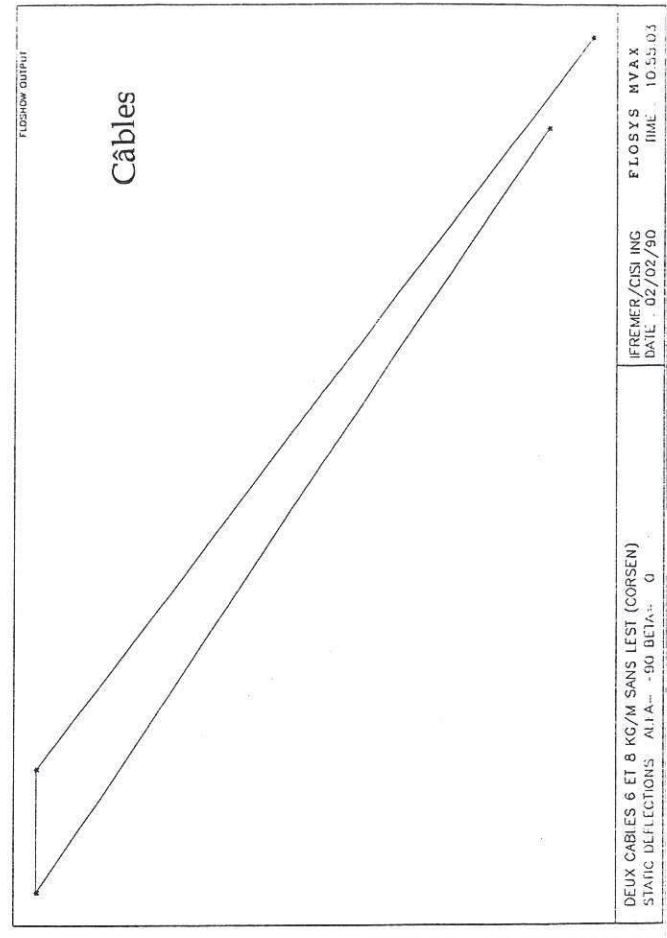
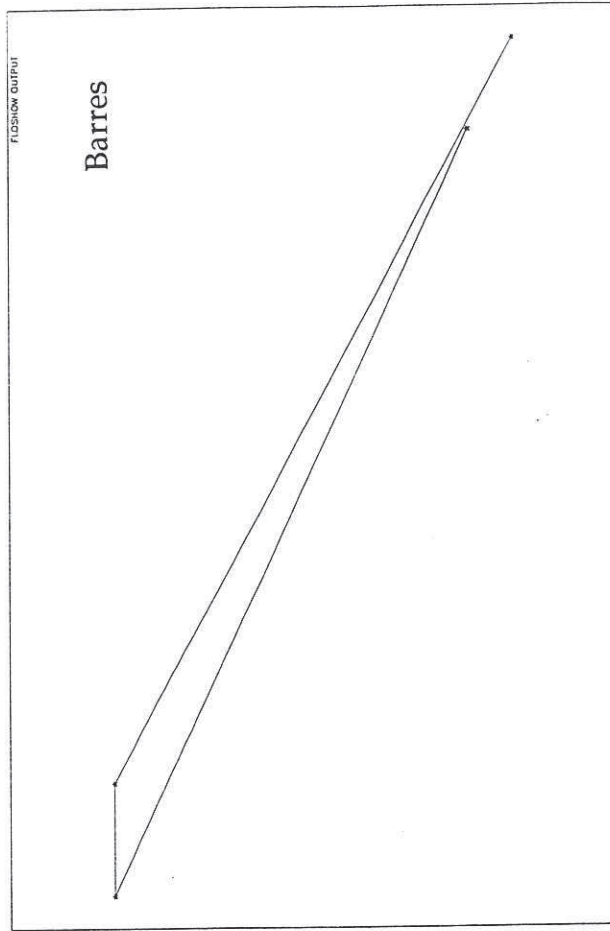
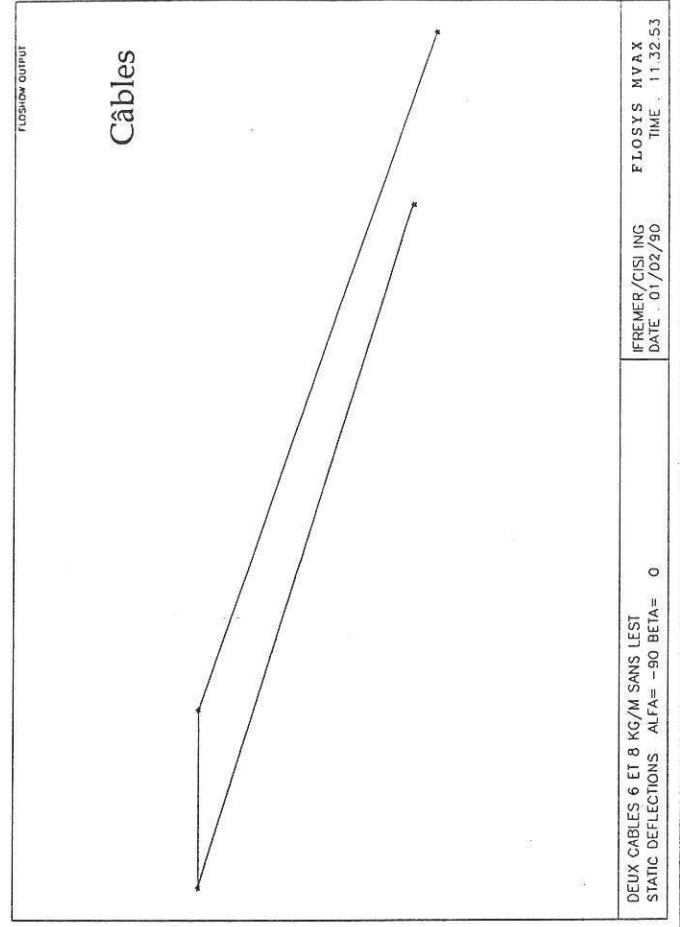
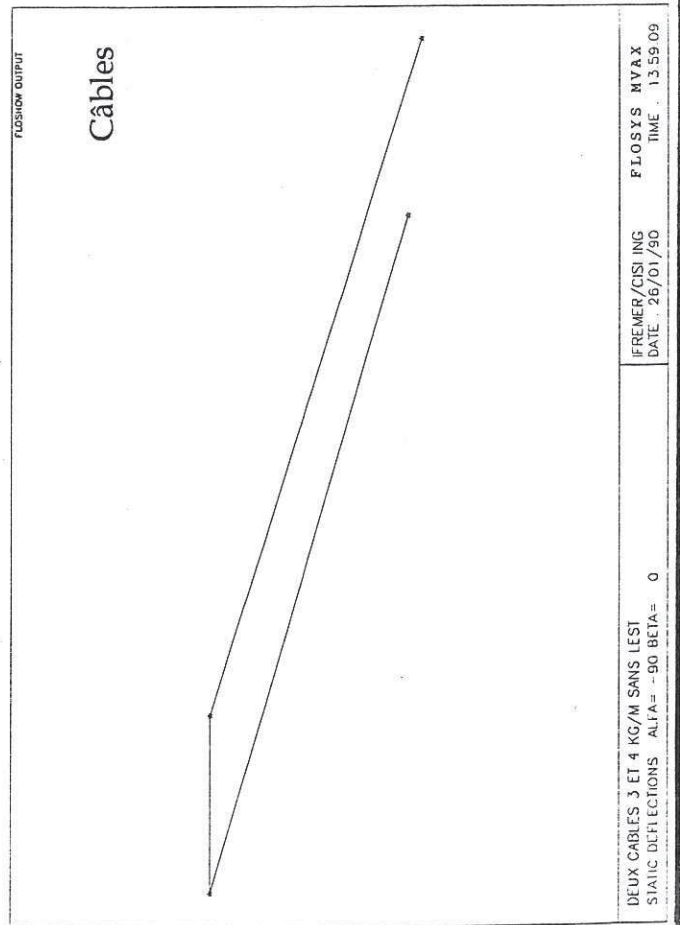
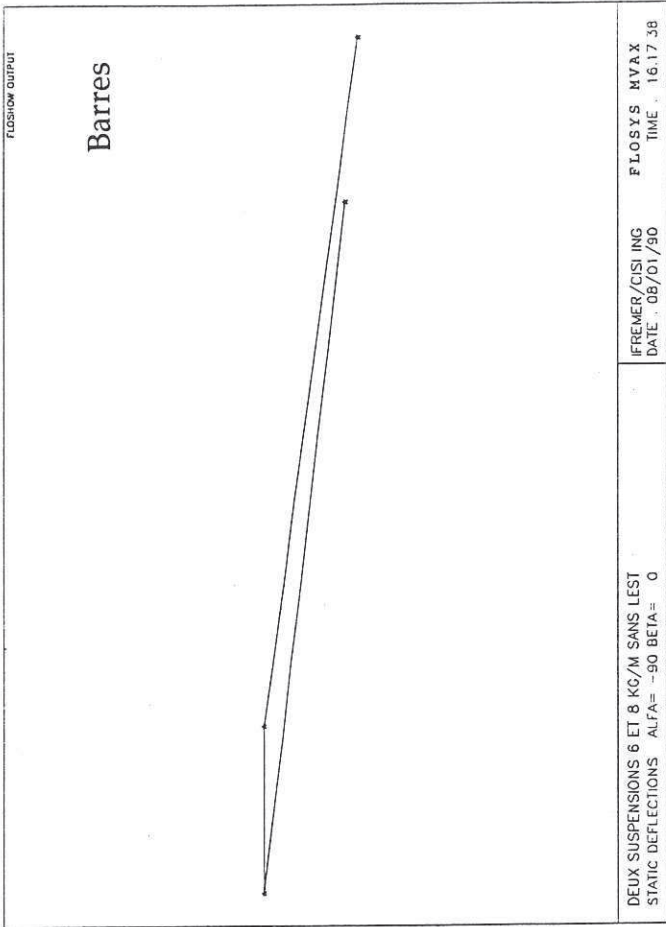
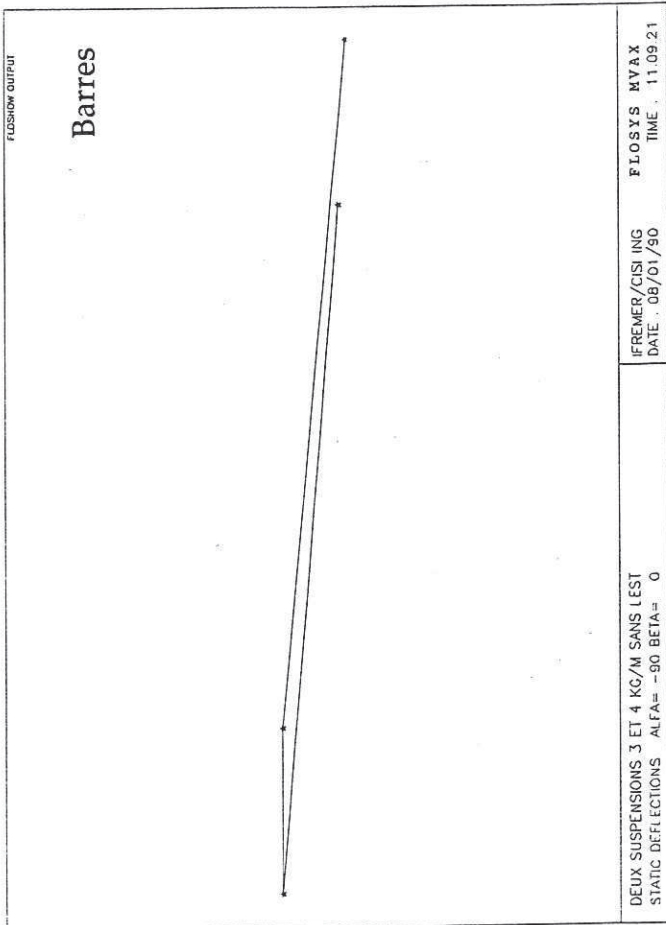


Planche 6 : Roscanvel, comparaison barres / câbles (FLOSYS)

Charges de 3 et 4 kg/m

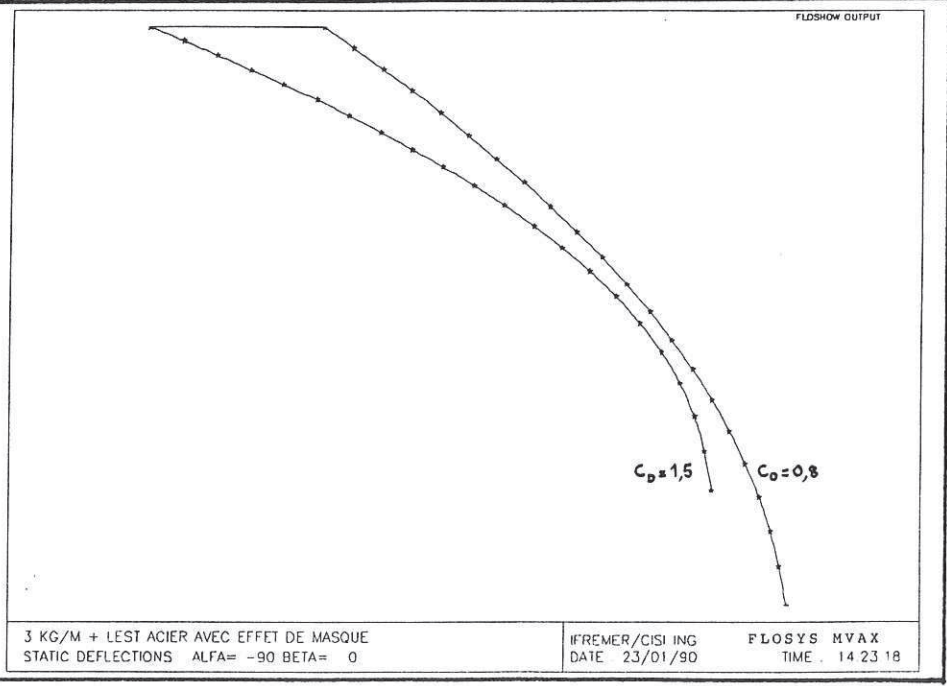
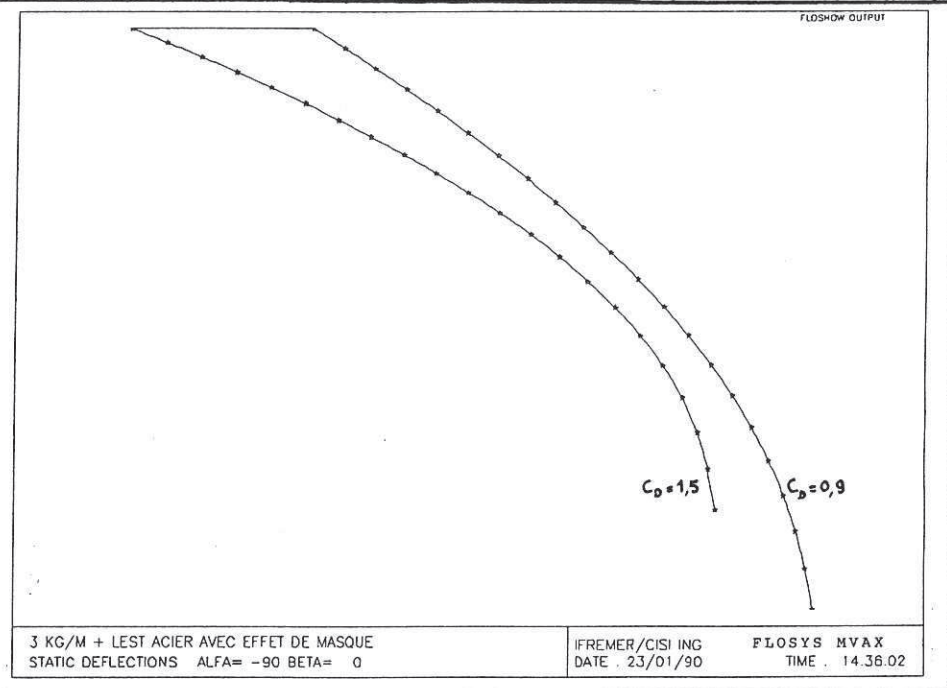
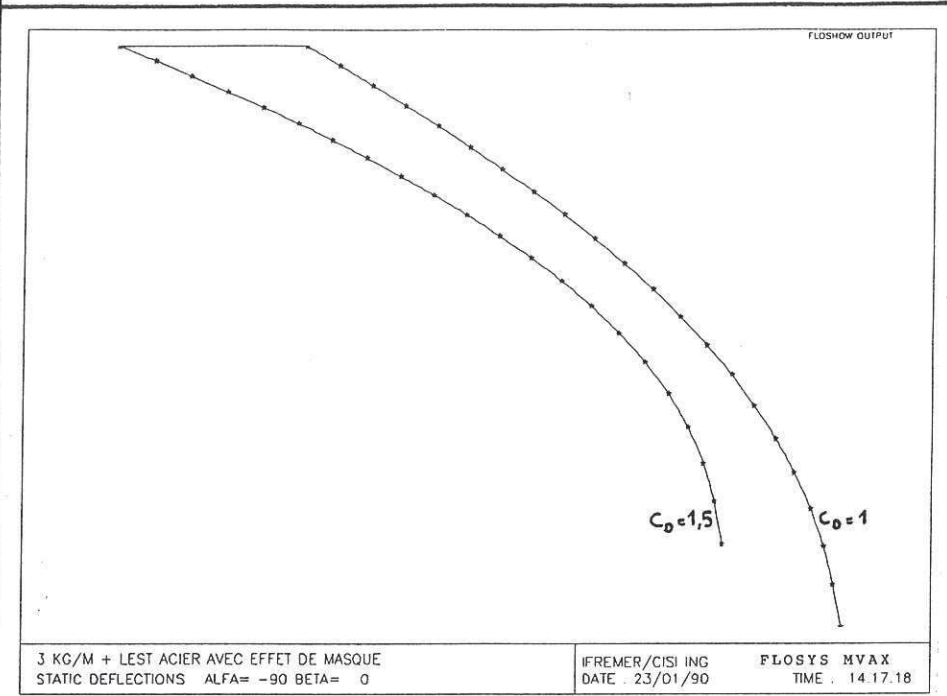
Charges de 6 et 8 kg/m



6.7. Effet de masque

Quelques cas de calcul sont présentés page suivante (planche 4): ils concernent deux suspensions chargées à 3 kg/m dont l'une subit un effet de masque plus ou moins accentué (son coefficient de traînée est diminué), pouvant aller jusqu'à provoquer des frottements, même sur des suspensions lestées.

Planche 4 : Effet de masque sur une suspension



6.8. Analyse modale

L'analyse sera menée pour les suspensions de Roscanvel.

Le critère exposé dans le paragraphe 5 (le nombre sans dimension V/fD compris entre 4 et 8) permet le calcul des fréquences f d'apparition des tourbillons. La vitesse V qui y est mentionnée est la composante perpendiculaire au cylindre. Il faut donc tenir compte de l'incidence des suspensions par rapport au courant.

Pour les suspensions non lestées, cette incidence est connue (cf paragraphe 4.1 et annexe A4) et constante sur toute la longueur. Par contre, pour les suspensions lestées, elle est variable le long de la corde. Pour les suspensions lestées avec de l'acier, cet angle est maximum en bas de suspension (76° maxi pour les différents cas de chargement) et minimum en haut (23° mini). Pour les suspensions avec lests en béton, cet angle est maximum en haut ($19,5^\circ$ maxi pour les cas de chargement étudiés) et passe par une valeur nulle vers les trois-quarts de la suspension.

Dans ces conditions, les plages de fréquence d'apparition de tourbillons sont les suivantes:

- suspensions sans lest

0,3 à 0,7 Hz pour les vibrations transversales
0,6 à 1,5 Hz pour les vibrations longitudinales

- suspensions avec lest en béton

0 à 0,6 Hz pour les vibrations transversales
0 à 1,3 Hz pour les vibrations longitudinales

- suspensions avec lest en acier

0,4 à 3,0 Hz pour les vibrations transversales
0,8 à 5,9 Hz pour les vibrations longitudinales

En raison de leur amplitude (de l'ordre du diamètre D , voire $2 D$), ce sont les vibrations transversales qui risquent d'être les plus préjudiciables : ce sont elles qui seront étudiées en priorité.

Les résultats de l'analyse modale conduite avec l'aide du logiciel FLOSYS sur les 12 suspensions modélisées (cas Roscanvel, courant de 1 m/s) sont les suivants :

Pour les suspensions non lestées,

Les fréquences d'apparition des vibrations transversales (0.02 Hz) et longitudinales (0.01 et 0.04 Hz) se situent hors des plages évoquées ci-dessus.

Pour les suspensions munies d'un lest en béton,

Plusieurs modes propres de vibration transversale ont des fréquences comprises dans les zones critiques:

- suspension chargée à 3 kg/m :
0.07, 0.22, 0.36, 0.50, 0.64 Hz...

- suspension chargée à 4 kg/m :
0.07, 0.20, 0.32, 0.45, 0.54 Hz...

- suspension chargée à 6 kg/m :
0.06, 0.17, 0.28, 0.41, 0.50, 0.61 Hz...

- suspension chargée à 8 kg/m :
0.06, 0.16, 0.26, 0.36, 0.46, 0.56, 0.65 Hz...

Pour les suspensions munies d'un lest en acier,

Plusieurs modes propres de vibration transversale ont également des fréquences comprises dans les zones critiques:

- suspension chargée à 3 kg/m :
0.38, 0.65, 0.89, 1.08, 1.31, 1.57, 1.84, 2.11, 2.36, 2.60,
2.83, 3.04 Hz...

- suspension chargée à 4 kg/m :
0.34, 0.58, 0.81, 1.00, 1.18, 1.40, 1.63, 1.86, 2.09, 2.30,
2.49, 2.67, 2.84, 2.99, 3.93 Hz...

- suspension chargée à 6 kg/m :
0.30, 0.51, 0.70, 0.88, 1.04, 1.21, 1.39, 1.58, 1.77, 1.94,
2.11, 2.26, 2.52, 2.63, 2.72, 2.81, 2.87, 2.94 Hz...

- suspension chargée à 8 kg/m :
0.27, 0.46, 0.64, 0.80, 0.95, 1.10, 1.25, 1.42, 1.58, 1.73,
1.87, 2.01, 2.13, 2.24, 2.33, 2.41, 2.49, 2.56, 2.63, 2.71 Hz...

□ Influence de la masse du lest et de la force du courant

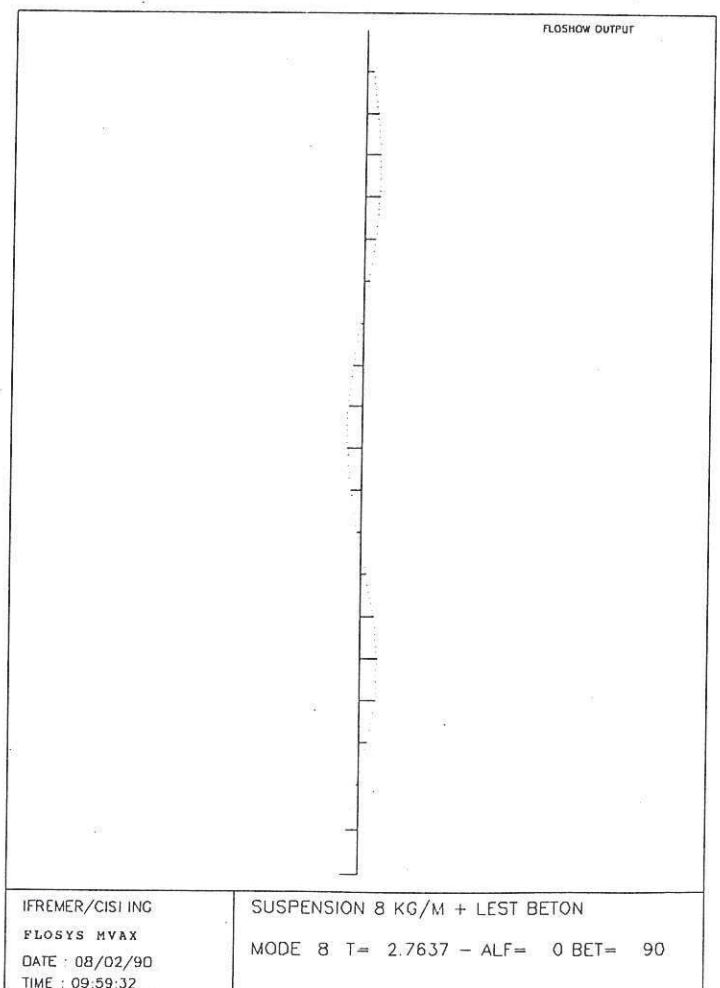
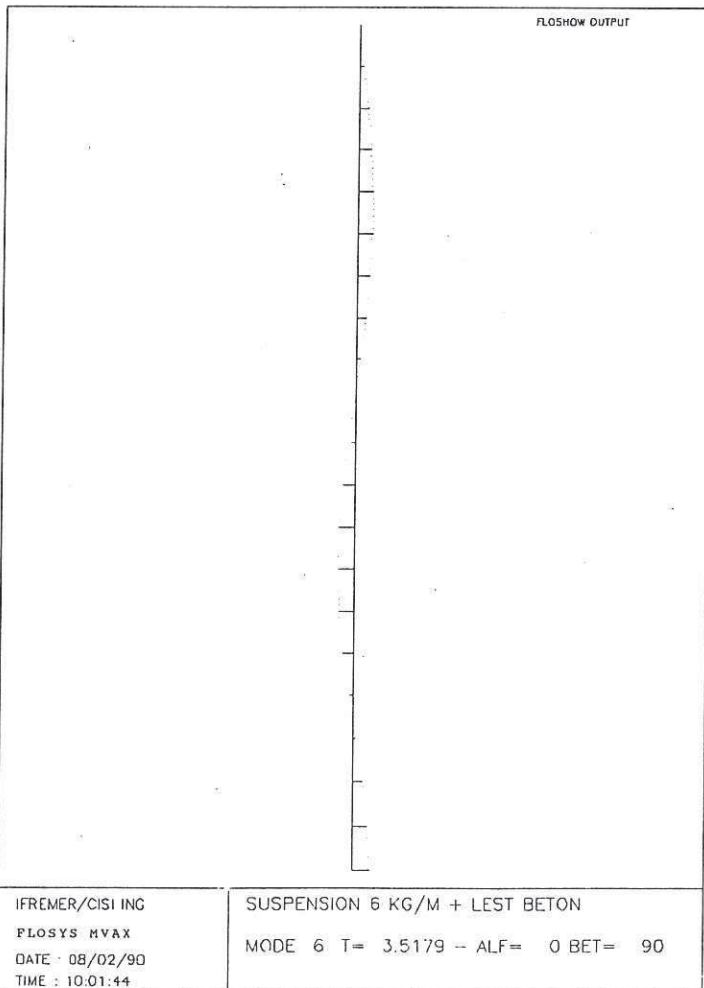
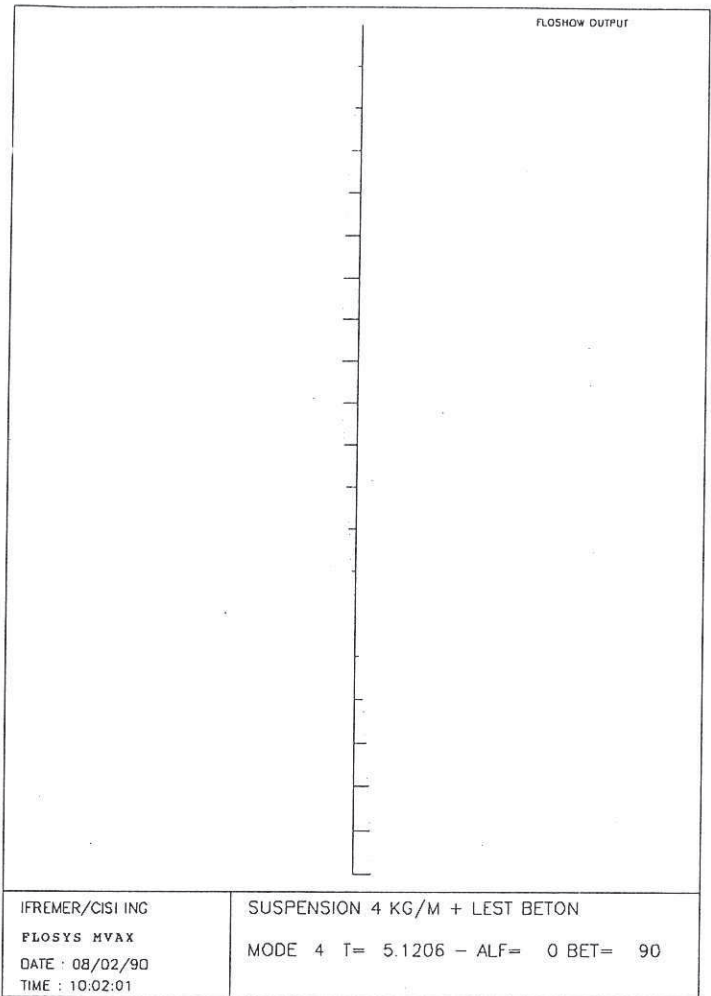
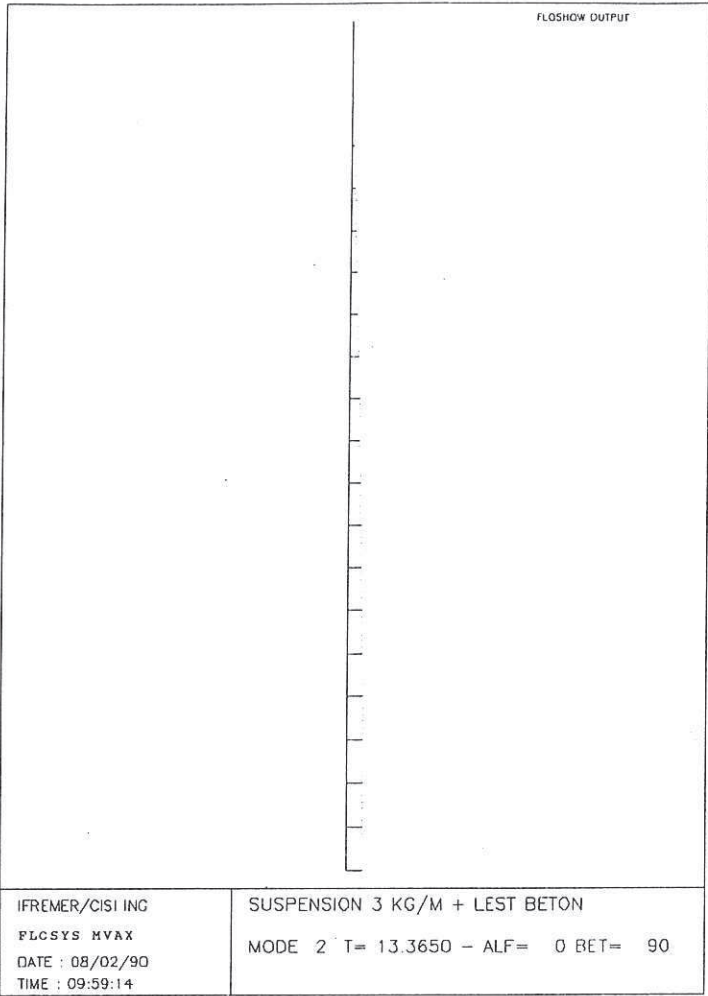
. Lorsque le lest en acier a une masse de 4 kg, les fréquences propres diminuent mais demeurent dans les plages critiques.

. Lorsque le courant est de 0,25 m/s, les fréquences propres n'augmentent que très légèrement (0,01 Hz pour le mode 4 par exemple) et certaines d'entre-elles demeurent dans la plage critique correspondant à ce cas (0,4 à 0,8 Hz).

□ Conclusion

Pour les suspensions lestées (béton ou acier) plusieurs modes propres de vibrations transversales ont leur fréquence située dans les plages critiques: il existe donc des risques pour qu'un ou plusieurs de ces modes soient excités par les tourbillons, du moins sur une partie de la suspension...

Des exemples de modes de vibrations transversales sont présentés dans les pages qui suivent (toutes les suspensions sont vues dans un plan parallèle au courant). La quasi-totalité des modes présentés sont ceux dits de "corde vibrante" sauf un qui est celui du "pendule transverse" (mode 2 de la suspension à 3 kg/m + lest béton).



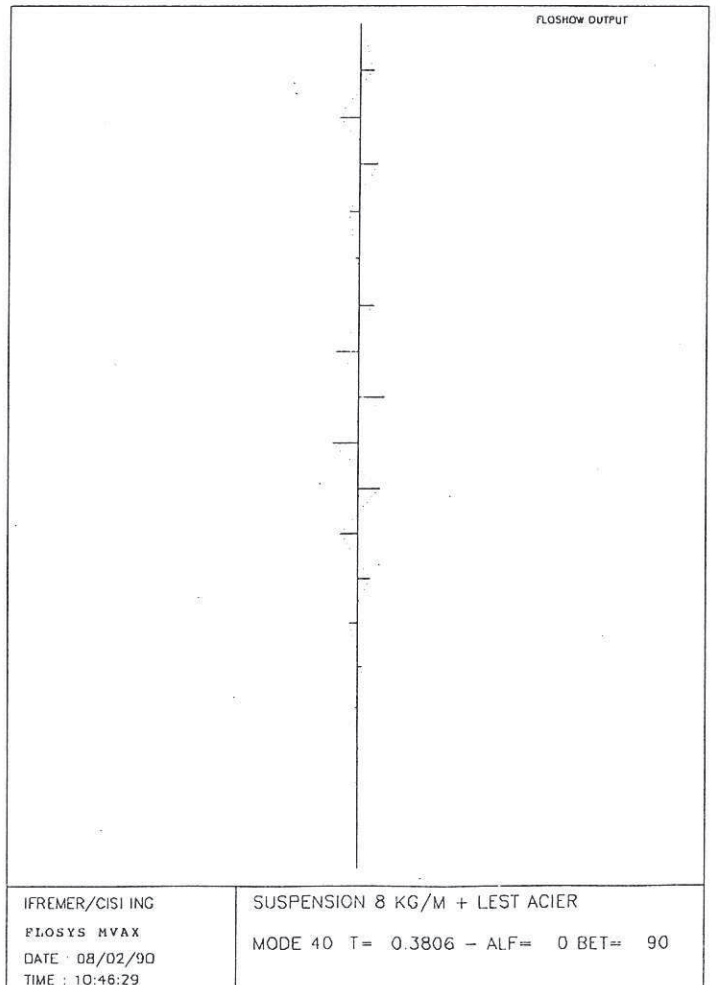
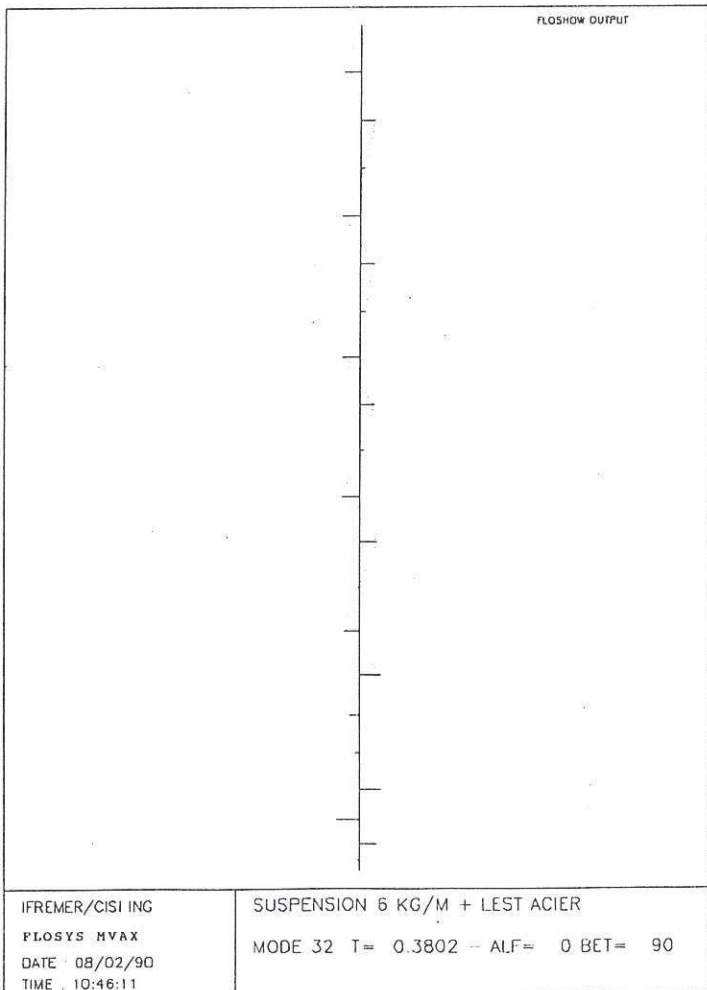
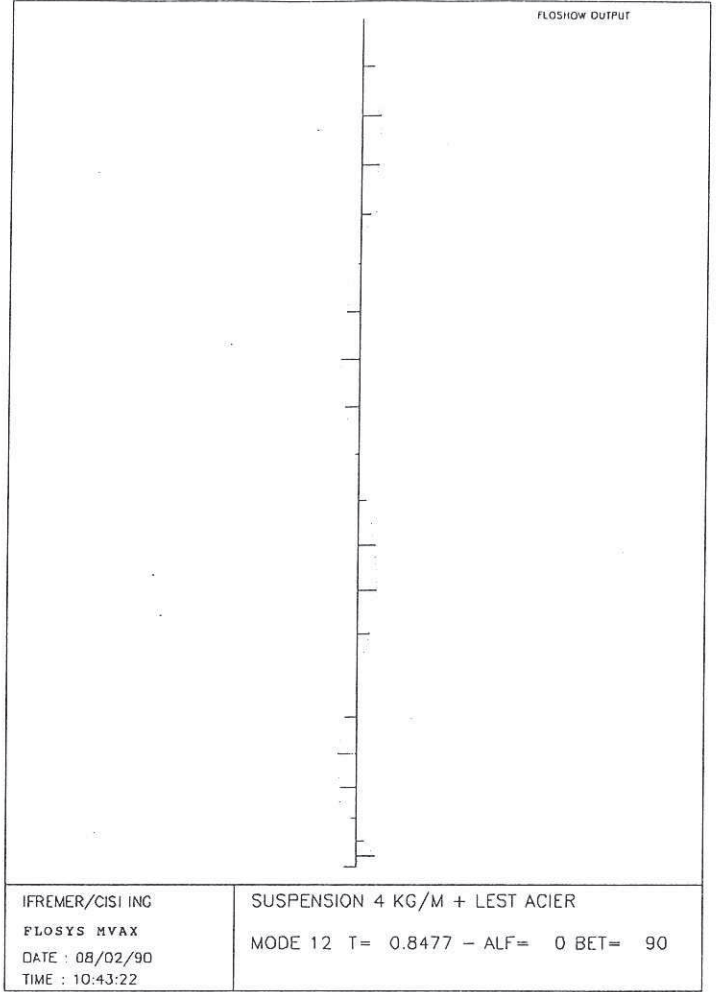
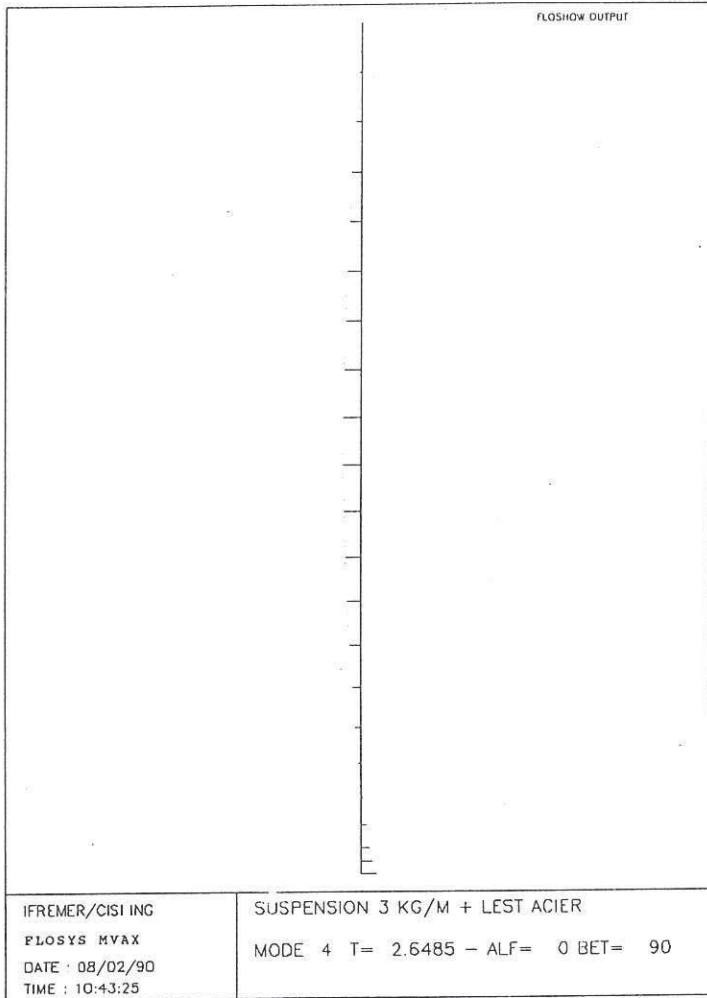
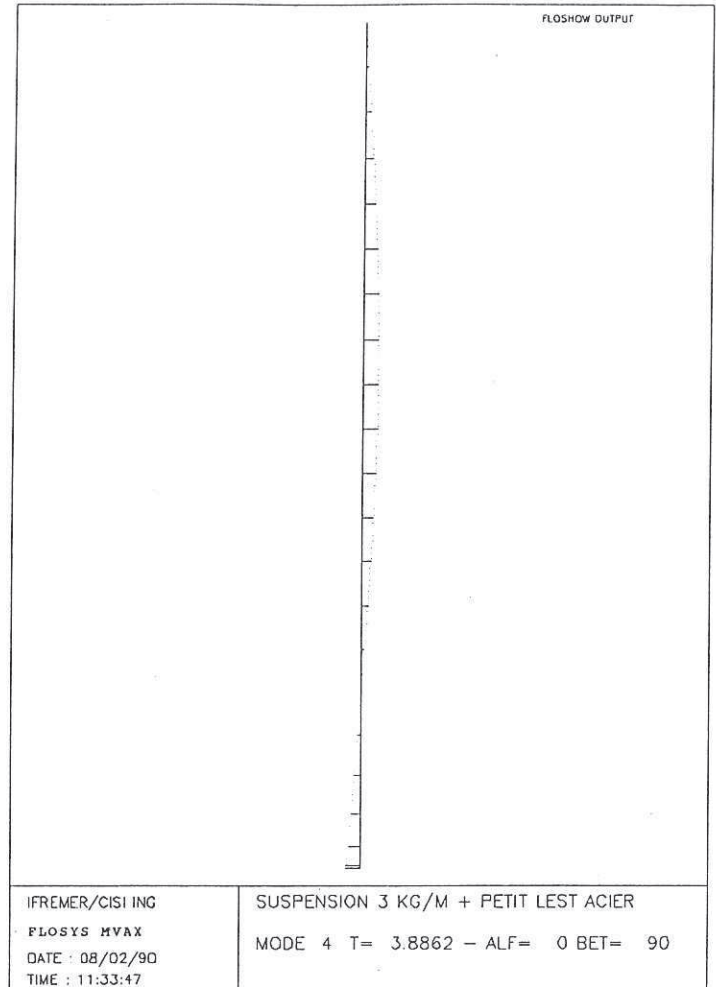
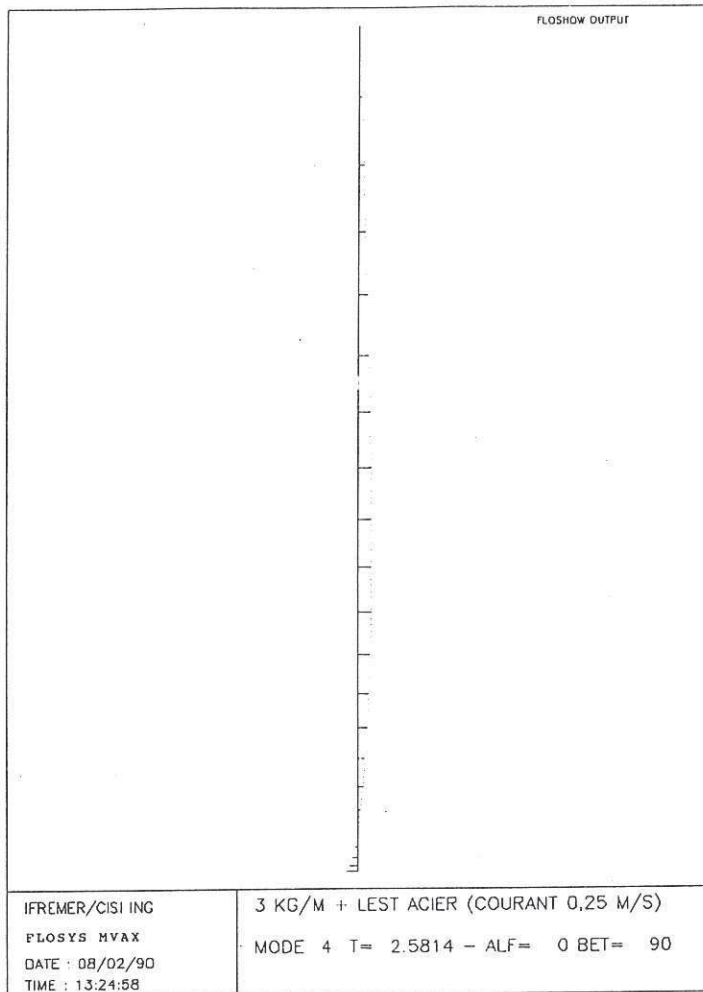


Planche 9 : Modes de vibrations transversales Influence du courant et de la taille du lest



CONCLUSIONS

□ **L'ETUDE DE L'EQUILIBRE STATIQUE**, par l'utilisation de deux modèles de calcul différents, fait apparaître de façon concordante que, dans le cas où les suspensions sont alignées dans le courant:

- s'il n'y a pas de lest, un écart de 25% dans les chargements linéiques provoque le rapprochement et bien souvent le contact, le frottement et très probablement l'emmêlement des suspensions voisines l'une de l'autre, que ce soit dans les conditions rencontrées à Corsen ou dans celles rencontrées à Roscanvel.

- les lests en béton ajoutés à l'extrémité changent peu le comportement des suspensions sur à peu près les trois quarts de leur longueur et, dans le cas de ceux utilisés à Roscanvel, leur forme et leur portance dans le courant favorisent le contact et éventuellement l'emmêlement des extrémités inférieures. Il est évidemment préférable d'utiliser des lests en béton d'une autre forme (pas de plaques ou de formes qui s'en rapprochent).

- les lests en acier permettent de bien séparer les suspensions les unes des autres quand elles sont soumises au courant mais l'effet de masque peut, dans certaines conditions, provoquer leur rapprochement.

□ **L'ANALYSE MODALE**, quant à elle, met en évidence des risques d'apparitions de tourbillons et de vibrations transversales des suspensions lestées pour les valeurs de courant rencontrées, entraînant probablement un risque de "fasseyage" rapide (de 0,5 à 3 Hz) de ces cordes et de chocs entre-elles (préjudiciable à une bonne croissance des moules ?).

□ **D'AUTRES SOLUTIONS** sont envisageables pour limiter les risques de frottement entre suspensions et le surcoût entraîné par l'opération qui consiste à confectionner et accrocher des lests à chacune d'elles, par exemple :

- relier les extrémités inférieures des suspensions par un bout continu (solution mise en oeuvre actuellement à Roscanvel).

- choisir une orientation différente de la filière en la disposant dans le sens perpendiculaire au courant dominant (solution adoptée en Languedoc-Roussillon).

□ L'étude aura montré également que les phénomènes hydrodynamiques entrant dans la modélisation du comportement de suspensions d'élevage de moules sont parfois complexes et surtout difficiles à prendre en compte dans leur totalité ou dans leur interaction les uns avec les autres (effets de masque, phénomènes vibratoires...).

REFERENCES

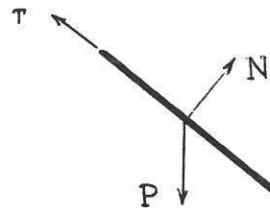
- 1- D. MARICHAL (1979), *Contribution à l'étude statique et dynamique des câbles sous-marins*, thèse de doctorat-ès-sciences, Université de Nantes, ENSM;
- 2- A. WANG (1988), *Contribution à l'étude des systèmes d'élevage mytilicole*, thèse de doctorat-ès-sciences, Université de Nantes, ENSM;
- 3- B. VIDAL-GIRAUD (1988), *Conchyliculture en mer ouverte en région Languedoc-Roussillon*, CEPRALMAR;
- 4- T. FABRE (1983), *Conchyliculture en mer ouverte, Contribution à l'étude des aspects technologiques*, CEPRALMAR/CNEXO;
- 5- S.F. HOERNER (1965), *Résistance à l'avancement dans les fluides*, Gauthier-Villars éditeur;
- 6- G. SUSBIELLES et CH. BRATU (1981), *Vagues et ouvrages pétroliers en mer*, Editions Technip;
- 7- P.REBUFFET (1969), *Aérodynamique expérimentale, tome 1*, Dunod;
- 8- A. WANG (1989), *Mise au point d'un logiciel de calcul de filières mytilicoles de sub-surface "FILSTA"*, contrat IFREMER/ENSM n° 88.232 1262;
- 9- A. WANG et J.M. KOBUS (1987), *Etude expérimentale des coefficients hydrodynamiques d'une suspension de moules*, rapport LHN n° 8701, contrat IFREMER/ENSM n° 85.2.320 133;
- 10- R. COMOLET , *Mécanique expérimentale des fluides , Tome II, Dynamique des fluides réels, turbomachines*, 3° édition, Masson.

ANNEXES

A1-CALCUL DES EFFORTS APPLIQUES PAR LES LESTS DE BETON**A1.1 Efforts dus au courant**

Il s'agit de déterminer les efforts appliqués, dans le courant, par le lest en béton accroché à l'extrémité de certaines suspensions d'élevage. Sa forme est approximativement celle d'une plaque carrée aux bords arrondis, accrochée par le milieu de l'une de ses arêtes (largeur : 25 cm; épaisseur moyenne : 4 cm). Sa masse est de 6 kg. Etant données ses dimensions, on assimilera ce lest à une plaque.

Lorsqu'il est en équilibre dans le courant, les efforts qui s'y exercent sont : la résultante des efforts hydrodynamiques N , le poids apparent P et la force de liaison T avec la suspension. On supposera, dans un premier temps, que la résultante des efforts hydrodynamiques s'exerce au centre de gravité et que la force de liaison est selon l'axe de la plaque.



Le poids apparent du lest est donné par la formule

$$P = g M / \rho_b * (\rho_b - \rho_e)$$

M :	<i>masse</i>
ρ_b :	<i>masse volumique du béton (2200 kg/m³)</i>
ρ_e :	<i>masse volumique de l'eau de mer (1030 kg/m³)</i>
g :	<i>accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)</i>

Soit, ici, un poids apparent dans l'eau $P = 31$ N.

La résultante des efforts hydrodynamiques exercés sur une plaque placée dans le courant dépend de son inclinaison [10].

$$N = 1/2 \rho_e C_N(\beta) L D V^2$$

β :	<i>inclinaison par rapport au courant</i>
$C_N(\beta)$:	<i>coefficient de traînée dépendant de l'inclinaison</i>
L :	<i>longueur de la plaque</i>
D :	<i>largeur de la plaque</i>

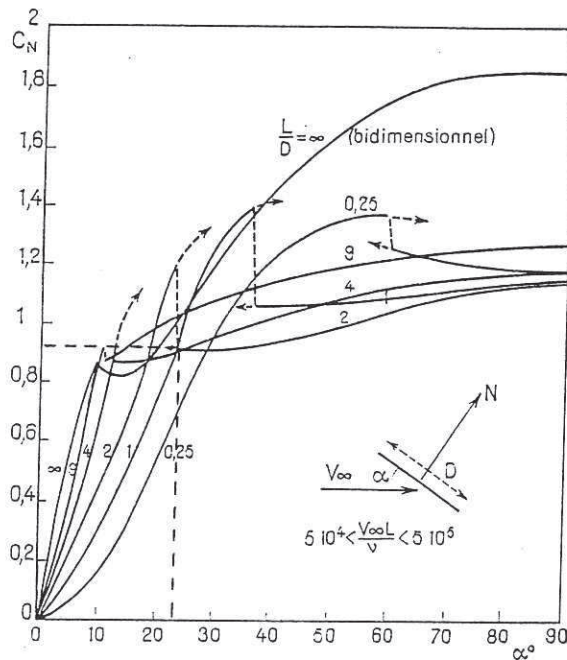
La projection des efforts selon l'axe perpendiculaire à la plaque donne la relation :

$$N(\beta) = P \cos(\beta)$$

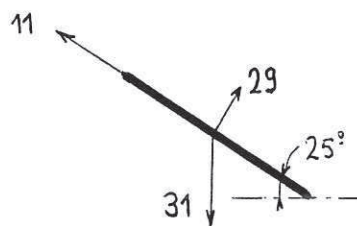
soit $1/2 \rho_e C_N(\beta) L D V^2 = P \cos(\beta)$

Le graphe ci-dessous (pour $L/D = 1$) permet de trouver, par itérations successives, les valeurs

$\beta = 25^\circ$
 $C_N = 0,9$ environ



ce qui donne une résultante des efforts hydrodynamiques $N = 29$ Newtons et une résultante poids + efforts hydrodynamiques de 11 N, inclinée à 25° par rapport à l'axe du courant.



Etant donnée l'inclinaison obtenue, la résultante des efforts hydrodynamiques N ne s'appliquera probablement pas au centre de gravité de la plaque, comme supposé au départ, mais se rapprochera du bord d'attaque. La littérature [7] indique que, pour une telle inclinaison, la ligne d'action de la résultante des efforts hydrodynamiques se situe environ au tiers de la largeur, tout en s'écartant peu de la normale à la plaque.

L'écriture des moments par rapport au point d'attache du lest permet alors d'exprimer la relation :

$$N/3 = P \cos \beta' / 2$$

De la même manière que précédemment, le graphe permet de trouver les valeurs

$$\begin{aligned} \beta' &= 30^\circ \\ C_N &= 1,25 \end{aligned}$$

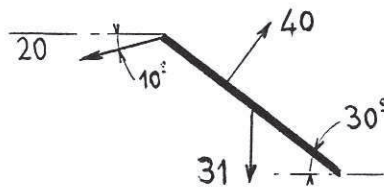
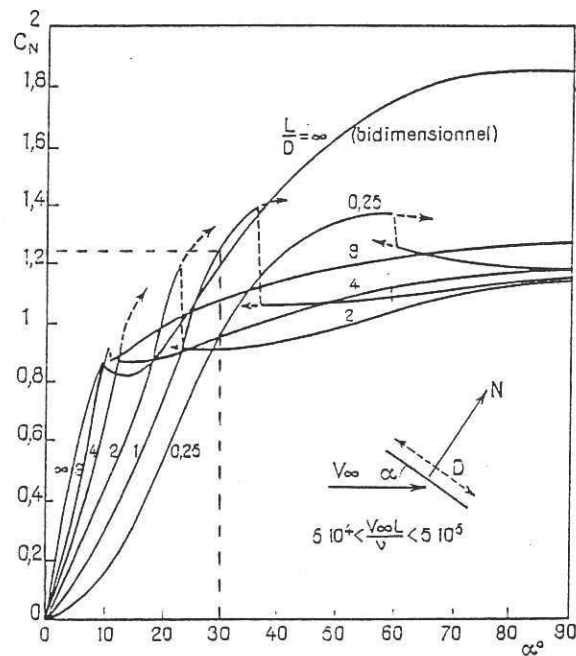
d'où la valeur de la résultante des efforts hydrodynamiques

$$N = 40 \text{ N}$$

et la valeur de la force de liaison T, par écriture des équations d'équilibre :

$$T = 20 \text{ N,}$$

inclinée à 40° par rapport à l'axe de la plaque, c'est-à-dire -10° par rapport à l'axe du courant.



NB : Avec cette inclinaison, la plaque aura tendance à se comporter en "feuille morte" et imposera des mouvements désordonnés à la corde à moules.

A1.2 Calcul des masses ajoutées

Pour l'analyse modale, il est nécessaire de tenir compte des masses ajoutées du lest en béton.

Le calcul de ces masses ajoutées a été réalisé par M. LE BOULLUEC (DIT/TNP) avec le logiciel AQUADYN implanté sur Micro-Vax à l'IFREMER.

Le lest a été modélisé par un cylindre à base elliptique:

Petit côté de l'ellipse :	6 cm
Grand côté de l'ellipse :	25 cm
Longueur du cylindre:	25 cm

Les résultats du calcul sont les suivants:

Suivant le bord d'attaque	m_{xx}	= 0.504 kg
Suivant la section	m_{yy}	= 0.729 kg
Suivant la face carrée	m_{zz}	= 7.748 kg

(XX : selon le grand axe, ZZ perpendiculaire)

Etant donnée son inclinaison de 30° dans le courant, les masses ajoutées dans le repère utilisé par FLOSYS seront:

m_{xx}'	= 4.3 kg
m_{yy}'	= 0.7 kg
m_{zz}'	= 7.0 kg

A2-CALCUL DES EFFORTS APPLIQUES PAR LES LESTS EN ACIER

Les lests en acier qui ont été amarrés à extrémité de certaines suspensions de la filière de Roscanvel sont constitués de maillons de chaîne dont les caractéristiques sont les suivantes :

Diamètre :	55 mm
Largeur (intérieure) :	71,5 mm
Pas (longueur intérieure):	165 mm
Masse :	12 kg
Poids dans l'eau :	100 N
Maître couple S :	0.03 m ²

Dans le courant, le maillon subit un effort hydrodynamique du type

$$N = 1/2 \rho_e C_d S V^2$$

avec

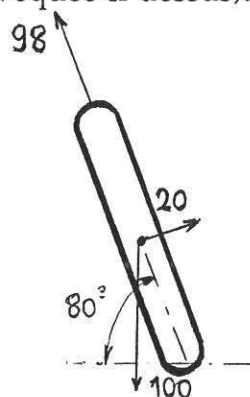
ρ_e	=	1030 kg/m ³
C_d	=	1,2
V	=	1 m/s

Dans un premier temps, on considérera que l'inclinaison du lest est faible et que l'on peut négliger les variations de S et de C_d (approximation à vérifier en final).

Le calcul donne alors $N = 20$ N

En tenant compte du poids apparent, la résultante des efforts appliqués par le lest sera donc de 98 N, inclinée à 80° par rapport à l'écoulement (10° par rapport à la verticale, angle relativement faible justifiant l'approximation évoquée ci-dessus).

schéma



A3 RECENSEMENT DES FORMULES DE CALCUL DES EFFORTS HYDRODYNAMIQUES APPLIQUES SUR UN CABLE

Année	Auteurs	Composante normale	Composante tangentielle
1917	RELF et POWELL	$\sin^2 \phi$	"petite et constante"
1918	Mac LOED	$\sin^2 \phi$	0
1934	GLAUERT	$\sin^2 \phi$	0
1936	THEWS et LANDWEBER	$\sin^2 \phi$	f
1941	RICHTMEYER	$\sin^2 \phi$	$f \cos^2 \phi$
1942	REBER	$\sin^2 \phi$	0
1942	REBER	$\sin^2 \phi$	$f \cos^2 \phi$
1944	LANDWEBER et PROTTER	$\sin^2 \phi$	$f = 0,022$
1944	REBER	$\sin^2 \phi + f \sin \phi$	$f \cos \phi$ ($f = 0,022$)
1945	O'HARA	$\sin^2 \phi$	$f \cos \phi$
1948-55	PODE	$\sin^2 \phi$	$f = \text{cste}$ (0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,10)
1951-58	HOERNER	$\frac{T}{R} \sin^2 \phi + \frac{T_f}{R} \sin^{3/2} \phi$	$\frac{T_f}{R} \cos \phi$
1952	TAYLOR laminaire	$\frac{T}{R} \sin^2 \phi + \frac{T_f}{R} \sin^{3/2} \phi$	$\frac{T_f}{R} \cos \phi \sin^{1/2} \phi$
	turbulent	$\frac{T}{R} \sin^2 \phi + \frac{T_f}{R} \sin \phi$	$\frac{T_f}{R} \cos \phi$
1956	EAMES	$(1 - \mu) \sin^2 \phi + \mu \sin \phi$	$\mu \cos \phi$ $\mu = 0,02$
1957	WHIKER fondé sur les essais de RELF et POWELL (1917)	$\sin^2 \phi$	$0,083 \cos \phi - 0,035 \cos^2 \phi$
1960	WILSON	$\sin^2 \phi$	$f \cos^2 \phi$
1965	BRACONOT	$\sin^2 \phi$	0
1966	SCHNEIDER et NICKELS	$\sin^2 \phi$	$k \cos^2 \phi$ ($k = k(V)$)
1967	GENNIN et CANNON	$K \sin^2 \phi$	$0,0134t + 0,0072 t^2 - 0,0504 t^3$ avec $t = \frac{\pi/2 - \phi}{\pi}$
1968	SPRINGSTON (général)	$A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos n \phi + B_n \sin n \phi]$	$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n \phi + b_n \sin n \phi]$
1968	SPRINGSTON (spécifique)	$0,5 - 0,5 \cos 2\phi$	$0,0307 \cos \phi + 0,0003 \cos 2\phi + 0,0222 \sin 2\phi$
1970	CHOO	$\sin^2 \phi (1,1 + \frac{4}{\sqrt{Re}})$	$\mu V \cos \phi [0,55(R_e \sin \phi)^{1/2} + 0,083(R_e \sin \phi)^{3/2}]$
1975	TERNDROP PEDERSEN	$\frac{T}{R} \sin^2 \phi$	$\frac{T_f}{R} \cos^2 \phi$
1976	SIMONENKO	$\frac{T}{R} \sin^2 \phi$	$\frac{T_f}{R} \cos^2 \phi$

A4-CARACTERISTIQUES DES SUSPENSIONS ETUDIEES

A4.1.Données communes à Corsen et Roscanvel

Diamètre du support	20 mm
Masse volumique du support	920 kg/m ³
Coefficient de traînée	1,50
Masse volumique des moules	1230 kg/m ³
Coefficient de remplissage	0,50

A4.2.Cas de Corsen

Vitesse du courant	0,5 m/s
Longueur de la suspension	6 m

Première suspension : charge linéique de 3 kg/m

Diamètre de la suspension	8,1 cm	
Masse (égouttée)	19,7 kg soit	3,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	341,5 N soit	56,9 N/m
Poids apparent dans l'eau	26,7 N soit	4,4 N/m
Traînée	113 N	
Inclinaison / courant	27,3 ° (tg = 0,52)	

Deuxième suspension : charge linéique de 4 kg/m

Diamètre de la suspension	9.3 cm	
Masse (égouttée)	25.7 kg soit	4,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	449.6 N soit	74.9 N/m
Poids apparent dans l'eau	36.2 N soit	6.0 N/m
Traînée	129 N	
Inclinaison / courant	29.6 ° (tg = 0,57)	

Troisième suspension : charge linéique de 6 kg/m

Diamètre de la suspension	11,3 cm	
Masse (égouttée)	37,7 kg soit	6,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	665,9 N soit	111,0 N/m
Poids apparent dans l'eau	55,4 N soit	9,2 N/m
Traînée To	157 N	
Inclinaison / courant	33,0 ° (tg = 0,65)	

Quatrième suspension : charge linéique de 8 kg/m

Diamètre de la suspension	13,0 cm
Masse (égouttée)	49,7 kg soit 8,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	882,2 N soit 147,0 N/m
Poids apparent dans l'eau	74,5 N soit 12,4 N/m
Traînée T_0	180 N
Inclinaison / courant	35,5 ° (tg = 0,71)

A4.3.Cas de Roscanvel

Vitesse du courant	1 m/s
Longueur de la suspension	5 m

Première suspension : charge linéique de 3 kg/m

Diamètre de la suspension	8,1 cm
Masse (égouttée)	16,4 kg soit 3,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	284,5 N soit 56,9 N/m
Poids apparent dans l'eau	22,2 N soit 4,4 N/m
Traînée T_0	375 N
Inclinaison / courant	13,9 ° (tg = 0,25)
Vibrations transversales entre	0,4 Hz et 0,5 Hz
Vibrations longitudinales entre	0,7 Hz et 1,0 Hz

Deuxième suspension : charge linéique de 4 kg/m

Diamètre de la suspension	9,3 cm
Masse (égouttée)	21,4 kg soit 4,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	374,7 N soit 74,9 N/m
Poids apparent dans l'eau	30,2 N soit 6,0 N/m
Traînée T_0	430 N
Inclinaison / courant	15,1 ° (tg = 0,27)
Vibrations transversales entre	0,3 Hz et 0,5 Hz
Vibrations longitudinales entre	0,7 Hz et 0,9 Hz

Troisième suspension : charge linéique de 6 kg/m

Diamètre de la suspension	11,3 cm
Masse (égouttée)	31,4 kg soit 6,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	554,9 N soit 111,0 N/m
Poids apparent dans l'eau	46,2 N soit 9,2 N/m
Traînée T_0	522 N
Inclinaison / courant	16,9° (tg = 0,30)
Vibrations transversales entre	0,3 Hz et 0,4 Hz
Vibrations longitudinales entre	0,6 Hz et 0,9 Hz

Quatrième suspension : charge linéique de 8 kg/m

Diamètre de la suspension	13,0 cm
Masse (égouttée)	41,4 kg soit 8,3 kg/m
Poids (non-égouttée) dans l'air	735,2 N soit 147,0 N/m
Poids apparent dans l'eau	62,1 N soit 12,4 N/m
Traînée T_0	601 N
Inclinaison / courant	18,3° (tg = 0,33)
Vibrations transversales entre	0,3 Hz et 0,4 Hz
Vibrations longitudinales entre	0,6 Hz et 0,8 Hz