

Influence de l'écoulement interne sur le comportement statique et quasi-statique des risers flexibles

Karl Christian STRØMSEM (1) et Elie KODAISSI (2)

(1) - *Ecole Polytechnique de Norvège, actuellement stagiaire à l'Institut Français du Pétrole, et (2) - Institut Français du Pétrole*

Résumé :

Dans cet article, l'étude globale du comportement quasi-statique d'un système de conduites flexibles, prenant en compte l'influence de l'écoulement interne, est abordée. Une solution analytique est présentée et incorporée dans un programme Elément Fini afin d'étudier la stabilité de l'équilibre dans ces conditions. L'application de cette méthode à deux configurations courantes a été effectuée. Aussi, une série d'essais expérimentaux à échelle réduite a été réalisée permettant de valider les résultats numériques. On conclut que l'influence de l'écoulement interne, est "plutôt d'améliorer" la stabilité de l'équilibre statique d'un système de conduites flexibles.

Summary :

In this paper, an investigation is made on the influence of the internal flow on the flexible risers behavior under quasi-static conditions. An analytical solution is presented and is incorporated into a finite element program in order to study the stability of the equilibrium of the configurations under these conditions. Two applications of this method are carried out on current flexible risers configurations. a set of experimental tests in reduced scale have as well been performed in order to check the numerical results. It is concluded that the influence of the internal flow is "rather to improve" the stability of the static equilibrium.

INTRODUCTION

Généralement, les différents modèles de comportement de risers flexibles en mer, ne font intervenir l'écoulement interne que par son poids. Or, étant donné leur "souplesse", il convient d'étudier l'influence de l'écoulement interne sur le comportement statique et dynamique des risers flexibles.

Dans le cas de canalisations dites "rigides", le problème de la stabilité (statique et dynamique) de ces canalisations en présence d'écoulement interne a été abordé depuis un certain nombre d'années. La littérature couvre une bonne part des différents aspects de ce sujet. On cite entre autres, les références d'ordre général suivantes: Paidoussis et Issid (1974) et Blevins (1986).

Le cas des conduites flexibles diffère des cas "rigides", notamment par le fait qu'une formulation en grands déplacements et grandes rotations est nécessaire, du fait de la rigidité en flexion quasi-négligeable des tubes. Aussi, les courbures de la ligne sont finies et variables et la présence d'écoulements externes (courant, houle) ajoute à la complexité du problème.

Dans cet article, l'étude globale du comportement statique et quasi-statique (présence d'un courant) d'un système de lignes flexibles est abordée. Dans la première partie, une étude analytique fournit une solution au problème. La stabilité de cette solution est ensuite étudiée par une méthode numérique couplée à un programme de calcul par Elément Fini. L'application de la méthode à deux configurations courantes de riser flexible est effectuée. Enfin, les résultats d'une étude expérimentale à échelle réduite sont donnés

1 PRESENTATION DU PROBLEME

Les hypothèses adoptées sont les suivantes:

- Le comportement axial du flexible est élastique et sa rigidité à la flexion est nulle.
- Le fluide interne est incompressible et non visqueux.
- L'écoulement interne est caractérisé par une vitesse constante et uniforme, qui est sa vitesse axiale.

Avec ces hypothèses, le riser flexible pourra être assimilé à un milieu curviligne, et l'action du fluide interne se traduira par un chargement linéique sur ce milieu, tout comme l'action du fluide externe. Cette dernière se ramène dans des conditions statiques, à la pression hydrostatique externe et aux forces de traînée exercées par le courant.

En considérant donc un élément de flexible, ds , le chargement appliqué à cet élément est la résultante des contributions suivantes:

- Les pressions hydrostatiques externe et interne \vec{p}_e et \vec{p}_i agissant suivant la normale à la ligne.
- Le poids du flexible \vec{p}_f .
- Une densité de force de traînée \vec{f}_d .

Les pressions hydrostatiques externe et interne peuvent être prises automatiquement en compte avec le poids du flexible en raisonnant en termes de tension effective et de poids global déjaugé \vec{p} . On renvoie à Sparks (1984) pour la description de cette méthodologie.

L'effort de traînée est obtenu à partir de la cinématique du courant par la formule classique de Morison.

Si on néglige la contribution des forces centrifuges, et moyennant une discrétisation du riser en un certain nombre d'éléments, on peut ramener le problème au niveau de chaque élément, à celui d'une chaînette élastique. Un schéma numérique par Elément Fini a donc été construit permettant de résoudre le problème d'une structure quelconque de lignes flexibles. La description du programme correspondant, FLEXAN-D, et des exemples d'applications sont données dans les références suivantes: Peyrot et Goulois (1977), Peyrot (1979) et Narzul et Marion (1986).

Ici, on s'intéresse à l'influence de la force centrifuge sur la solution statique. Avec l'hypothèse d'un écoulement stationnaire, les forces d'inerties imprimées par le fluide interne sur les parois du flexible sont dûes uniquement aux courbures de celui-ci et sont données par (Fig 1.) :

$$\vec{c} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho v \frac{d\vec{\tau}}{dt} = \rho \frac{v^2}{R} \vec{\nu}, \quad (1)$$

où ρ est la masse linéique du fluide interne, v sa vitesse axiale, $\vec{\tau}$ et $\vec{\nu}$ sont les vecteurs unitaires portés respectivement par la tangente et la normale en un point courant du flexible.

1.1 Equilibre d'un élément de chaînette

Supposons que l'élément de flexible ds soit en équilibre sous les effets des tensions aux extrémités et des efforts autres que celui des forces centrifuges. Ces dernières introduisent une force supplémentaire \vec{dc} donnée par:

$$\vec{dc} = \rho \frac{v^2}{R} ds \vec{\nu} = \rho v^2 d\theta \vec{\nu}. \quad (2)$$

Les forces centrifuges étant radiales, il s'ensuit de l'équilibre de l'élément ds , que l'accroissement de la tension aux deux extrémités de l'élément a la même valeur t .

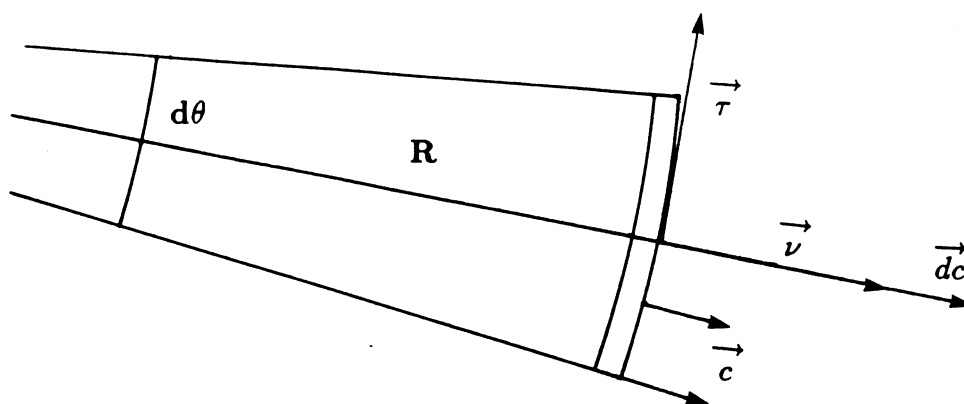


Figure 1: Système des forces agissant sur une longueur élémentaire de flexible

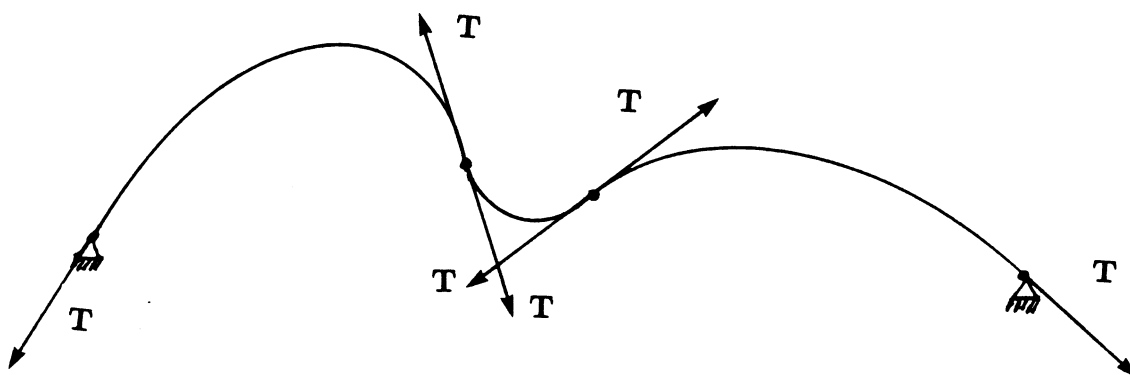


Figure 2: Système des arcs circulaires

De plus, au 1^e ordre, la valeur de t est donnée par :

$$2t \frac{d\theta}{2} = \rho v^2 d\theta \quad \Rightarrow \quad t = \rho v^2 \quad (3)$$

L'équation (3) montre que cet accroissement de la tension dû à l'écoulement interne est indépendant des courbures de la ligne. Il ne dépend que de la masse volumique du fluide interne et de sa vitesse. Il en découle immédiatement, qu'en considérant une ligne flexible de longueur finie en équilibre initial, (Figure 2), l'effet de l'écoulement interne sur cette conduite revient à augmenter la tension d'une même valeur tout le long de la ligne.

On déduit également, que dans l'hypothèse des petites déformations et par superposition de deux états d'équilibre, la configuration initiale d'équilibre (sans écoulement interne) n'est pas modifiée par les forces centrifuges.

1.2 Cas des points anguleux

Dans le cas où un point anguleux est présent dans le milieu curviligne, il est facile de montrer que le résultat précédent demeure valable. En effet, le point anguleux peut être considéré comme la limite d'un arc de cercle ayant les mêmes directions des

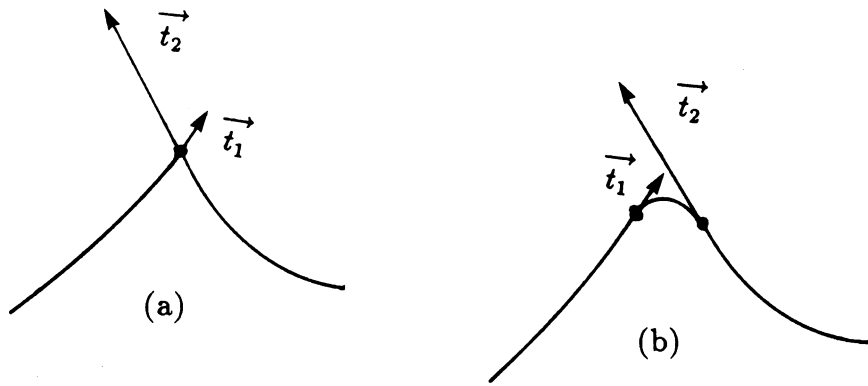


Figure 3: arc élémentaire conservant les directions du point anguleux

tangentes aux extrémités, (Figure 3), quand le rayon tend vers zéro. Ce résultat sera utile pour l'étude de la stabilité de l'équilibre d'une configuration de riser avec un point anguleux, telle que la configuration dite "Steep-S". Notons que ce résultat aurait pu être obtenu, par la conservation de la quantité de mouvement d'un tronçon de ligne incluant le point anguleux.

2 ETUDE DE LA STABILITE QUASI-STATIQUE

Le résultat précédent est obtenu par superposition de deux états d'équilibre partiels. Etant donné la "souplesse" d'un système de lignes flexibles, il convient d'étudier la stabilité de l'équilibre quasi-statique du riser par rapport aux vitesses de l'écoulement interne (les forces centrifuges sont proportionnelles aux carrées de ces vitesses). Notons aussi qu'une perturbation du système peut être due simplement à l'établissement de l'écoulement interne. On cherche donc à résoudre le problème précédent en supposant que la configuration d'équilibre n'est pas donnée a priori. Ceci revient à l'intégration des effets de l'écoulement interne dans le schéma Elément Fini de FLEXAN-D.

Une première approche a consisté à ajouter la densité de force centrifuge aux forces distribuées sur les éléments (poids, trainée, -). Deux difficultés sont rencontrées par cette méthode:

- la densité de force centrifuge, \vec{c} , dépend de la courbure qui est une inconnue du problème.
- Afin de respecter les équations de la chaînette élastique, il faut ramener les forces centrifuges sur un élément à un chargement uniforme.

Alors, si un schéma itératif peut pallier le couplage au niveau de la première difficulté, afin de contourner la deuxième, une approximation est nécessaire, qui pourrait nuire à la rigueur de la solution, et qui de toute manière, serait contraignante au niveau de la finesse du maillage.

On a par suite, cherché par une autre méthode à introduire indirectement le chargement des forces centrifuges. L'approche consiste à prendre en compte, au cours des itérations d'équilibre, les forces centrifuges par le biais des surtensions qu'elles induisent aux extrémités de chaque élément. Le schéma numérique peut alors se résumer par les pas suivants:

1. Les coordonnées nodales du système étant connues au début d'une itération, l'algorithme d'inversion des équations d'une chaînette élastique donne la géométrie, la matrice de rigidité et les forces nodales élémentaires, en négligeant les effets d'inertie de l'écoulement interne.
2. Les forces centrifuges sont implicitement introduites par le biais d'une surtension $\Delta T (= \rho v^2)$, appliquée au deux extrémités d'un élément.
3. La matrice de rigidité globale et le vecteur de déséquilibre global sont assemblés.
4. Si le déséquilibre est supérieur à une tolérance donnée, un incrément de déplacements nodaux (Newton-Raphson) est estimé, et un retour au pas 1 est effectué.

Remarque 2.1: La présence d'un point anguleux est équivalente à celle d'un petit élément de chaînette conservant les directions des tangentes aux extrémités (cf. 1.2). Il est alors immédiat de voir que l'algorithme précédent revient à introduire une surtension nulle à l'extrémité de chaque élément adjacent au point anguleux.

L'étude de la stabilité par ce modèle, revient donc à étudier la sensibilité de la configuration d'équilibre par rapport à la configuration arbitraire initiale de l'algorithme.

2.1 Résultats numériques

Avant d'aborder les applications proprement dites, la sensibilité de la solution à la finesse du maillage a été testée. Les calculs ont montré l'indépendance des résultats du deuxième algorithme (par surtensions) de la discrétisation du système. Pour le premier algorithme (approximation directe des forces centrifuges) les résultats n'ont pratiquement pas varié à partir d'une discrétisation avec une dizaine d'éléments. De plus, les deux algorithmes ont fourni des résultats identiques.

L'application du modèle fut ensuite effectuée sur deux configurations standards de risers flexibles: les configurations dites "Free-hanging" et "Steep-S".

La configuration "Free-Hanging"

Il s'agit d'une configuration de chaînette simplement accrochée entre deux points d'appui (Figure 4c). Les propriétés matérielles du riser, rassemblées dans le Tableau 1, sont celles d'un riser conventionnel. La stabilité de la solution pour des vitesses de

Tableau 1: Paramètres de la configuration "Free-hanging"

Riser:		
Longueur de la ligne	[m]	125
Diamètre externe		0.26
Diamètre interne		0.22
Masse volumique externe	[kg/m ³]	1025
Masse volumique interne		998
Poids linéique du riser	[N/m]	890.35
Rigidité axiale		1.54*10 ⁹

l'écoulement interne allant jusqu'à 80 m/s est étudiée en présence ou non d'un courant externe. Plus précisément les vitesses suivantes ont été considérées : 5, 10, 15, 20, 40, et 80 m/s. Pour chacune de ses vitesses, l'influence du courant a été prise en compte selon trois cas:

- un courant uniforme de 1 m/s suivant le sens positive de l'axe ox (position dite "far"),
- un courant uniforme de -1 m/s suivant le sens nagatif de l'axe ox (position dite "near") et
- pas de courant.

Les résultats relatifs à ces différents cas sont rassemblés sur les Figures 4a à 4c. Comme on peut le constater sur ces figures, les vitesses de l'écoulement interne allant jusqu'à 80 m/s n'ont pas modifié la configuration d'équilibre du riser, même avec l'action combinée du courant externe. La solution finale est bien celle de la superposition des deux états d'équilibre étudiées au chapitre précédent, comme on peut le vérifier sur le profil des tensions le long du riser, donné sur la Figure 5.

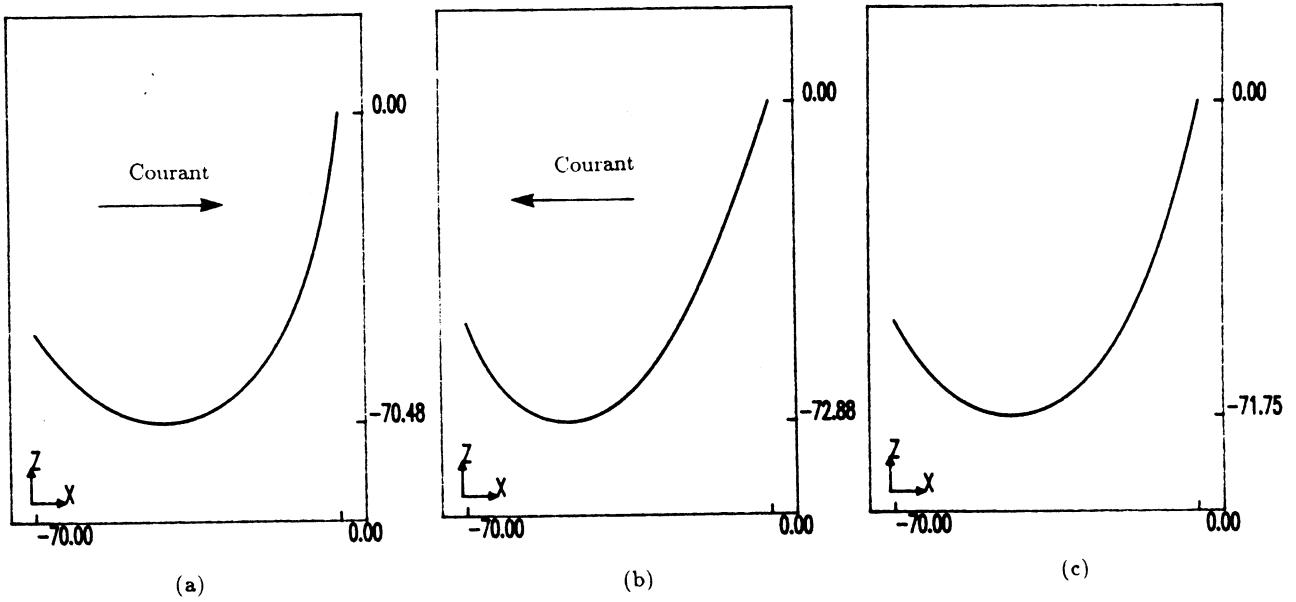


Figure 4: "Free-hanging"- (a):position "far", (b):position "near", (c):sans courant.

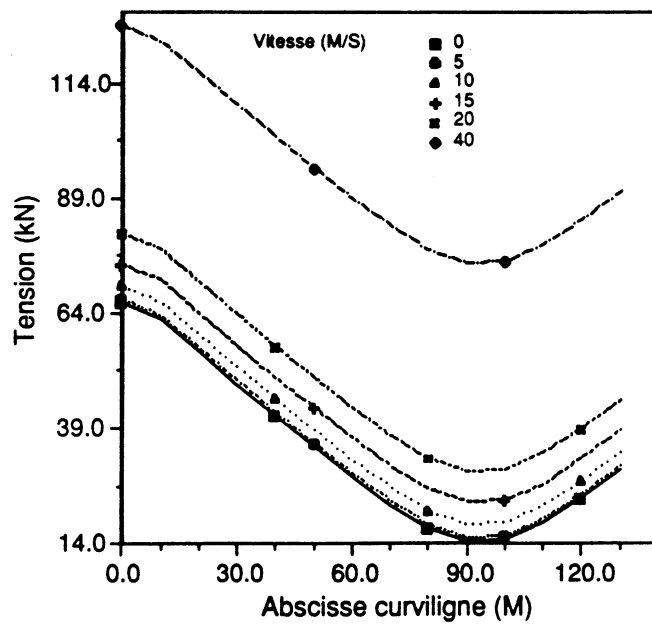


Figure 5: Variations de la tension du "Free-hanging" dues aux forces centrifuges de l'écoulement

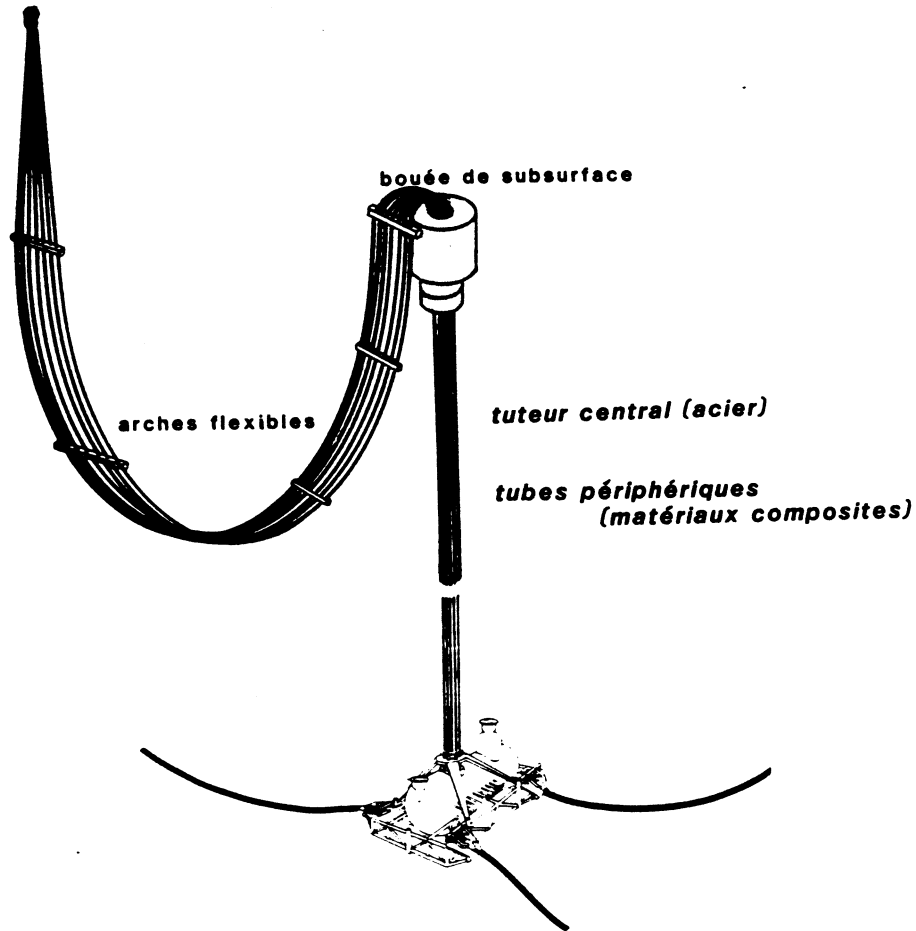


Figure 6: La configuration "Steep-S".

La configuration "Steep-S"

Cette configuration est représentée sur la Figure 6. Elle se caractérise par la présence d'une section quasi-rectiligne dite "rigide", et une section en arche flexible, reliées par une bouée de subsurface. La ligne représentatrice de cette configuration comporte un point anguleux au niveau de la bouée. Les caractéristiques matérielles du riser sont résumées dans le Tableau 2. Les conditions d'écoulement interne et de courant sont identiques au cas précédent.

Les résultats des différents calculs sont rassemblés sur les Figures 7a à 7c. Là aussi, on trouve que jusqu'à une vitesse de l'écoulement interne de 80 m/s , la stabilité de l'équilibre statique ou quasi-statique est assurée. En effet, tout comme le cas du "Free-hanging", l'algorithme converge vers la configuration d'équilibre sans écoulement interne, quelque soit la position initiale des noeuds (le nombre d'itérations est plus important pour le "Steep-S"). Le profil de tension est en accord aussi avec la solution analytique, Figure 8.

Remarque 2.2: pour des vitesses dépassant les 40 m/s , et avec le premier

Tableau 2: Paramètres de la configuration "Steep-S"

Riser:		
Longueur de la partie "rigide"	[m]	130
Longueur de la partie flexible		100
Diamètre externe		0.26
Diamètre interne		0.22
Masse volumique externe	[kg/m ³]	1025
Masse volumique interne		998
Poids linéique du riser	[N/m]	890.35
Rigidité axiale		1.54*10 ⁹
Bouée:		
Diamètre	[m]	3.0
Hauteur		5.0
Flottaison	[kN]	300

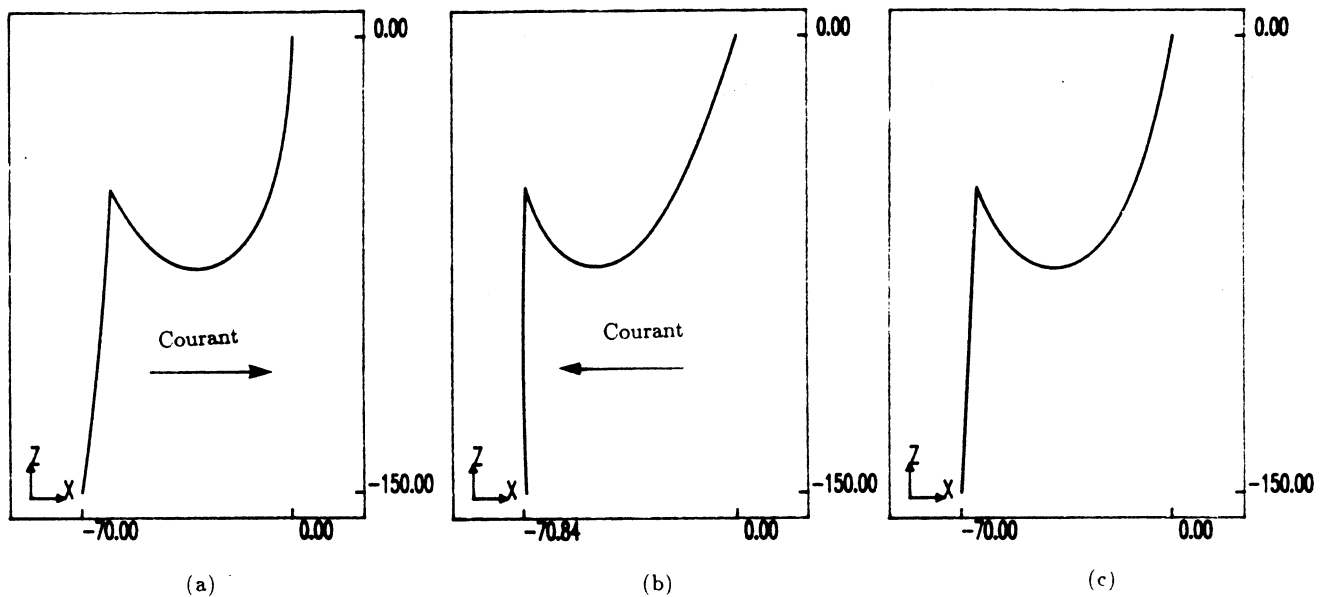


Figure 7: "Steep-S" - (a):position "far", (b):position "near", (c):sans courant.

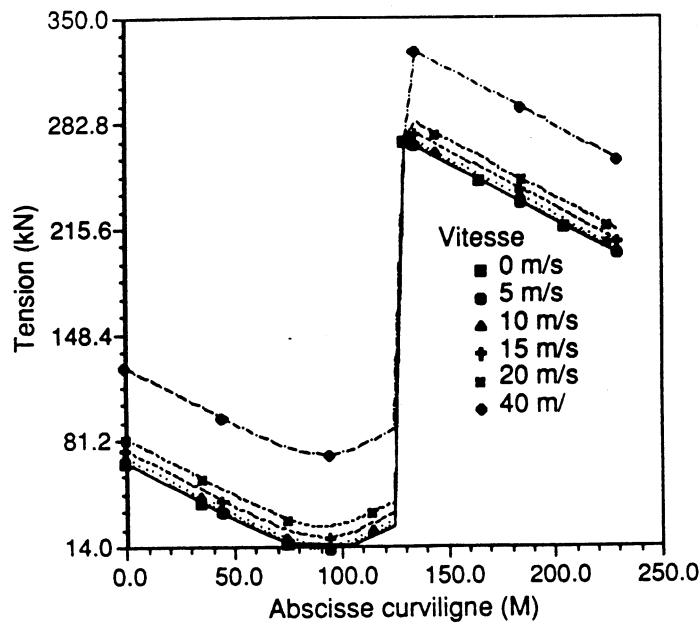


Figure 8: Variation de la tension "Steep-S"

algorithme

(approximation directe des force cetrifuges), le calcul donne un "déplacement" de la configuration d'équilibre. On pense que cette "instabilité" est un effet numérique dû à l'approximation introduite par cette méthode. Quoi qu'il en soit, les vitesses d'écoulements réels se situent autour de 10 m/s , et on conclut que la vitesse de l'écoulement interne est sans influence sur la stabilité statique et quasi-statique des risers flexibles. Cependant l'influence de cette vitesse sur les tensions de la ligne peut être considérable. En particulier, sa contribution est dominante en certaines parties du riser (les parites non tendues), pour des vitesses d'écoulement importantes (20 m/s sur la Figure 8).

3 ETUDE EXPERIMENTALE

A ce stade de l'étude, un premier programme expérimental sur modèle réduit fut conçu ayant un double but:

- Valider les résultats numériques sur la stabilité statique et quasi-statique, d'une part.
- Effectuer les premières recherches expérimentales sur l'influence de l'écoulement interne sur le comportement dynamique des risers flexibles, d'autre part.

Les essais expérimentaux ont été effectués dans le bassin d'essais du NTH¹ à Trondheim.

¹Norges Tekniske Høyskole

3.1 Description du dispositif expérimental

Un configuration du riser en "Steep-S" fut choisi pour réaliser les essais. On estimait intuitivement, que cette configuration est la plus "sensible" aux effets de l'écoulement interne et du courant. Deux modèles différents du riser représentant des échelles différentes du modèle calculé ont été construits. Les forces centrifuges étant de nature inertielle, et ayant négligé la viscosité du fluide, les modèles expérimentaux ont été dimensionnés à l'échelle de Froude.

Le premier modèle respecte intégralement l'échelle de Froude dans un rapport de 1/110. Le deuxième modèle est dans un rapport de 1/73 à l'échelle de Froude au niveau des dimensions géométriques. Mais afin d'accentuer l'effet des forces centrifuges, le rapport des poids du fluide est pris à 1/37 dans ce modèle. Les paramètres des deux modèles en comparaison avec ceux du prototype calculé sont rassemblés dans le Tableau 3.

Tableau 3: Paramètres des lignes flexibles

Riser:	Prototype	Modèle 1	Modèle 2
Longueur [mm]	130 000 et 100 000	1136 et 909	1700 et 1000
Diamètre externe	260.0	4.0	9.0
Diamètre interne	220.	2.0	6.0
Section externe [mm ²]	53090.0	12.56	63.62
Section interne	38010.0	3.14	28.27
Section riser	15080.0	9.42	35.34
Masse vol. externe [kg/m ³]	1025	998	998
Masse vol. interne	998	998	998
Masse vol. riser	6000	1638	1100
Poids lin. interne [N/m]	372.1	0.031	0.277
Poids lin. déjaugé	533.1	0.122	0.623
Poids lin. riser	890.35	0.151	0.382
Poids lin. total	1262.55	0.182	0.658
<i>AE</i>	1.54*10 ⁹	-	-
Bouée:			
Diamètre [mm]	300.	27.0	38.0
Hauteur	500.	39.0	63.0
Flottaison [N]	300 000	0.223	0.713

Le dispositif expérimental est représenté sur la Figure 9. Le fluide acheminé par le riser provient du circuit d'alimentation en eau du laboratoire à partir d'une valve de haute pression. Une valve facilitant le contrôle du débit fut montée entre la valve haute pression et le riser expérimental. Le circuit d'eau du laboratoire est doté d'un système

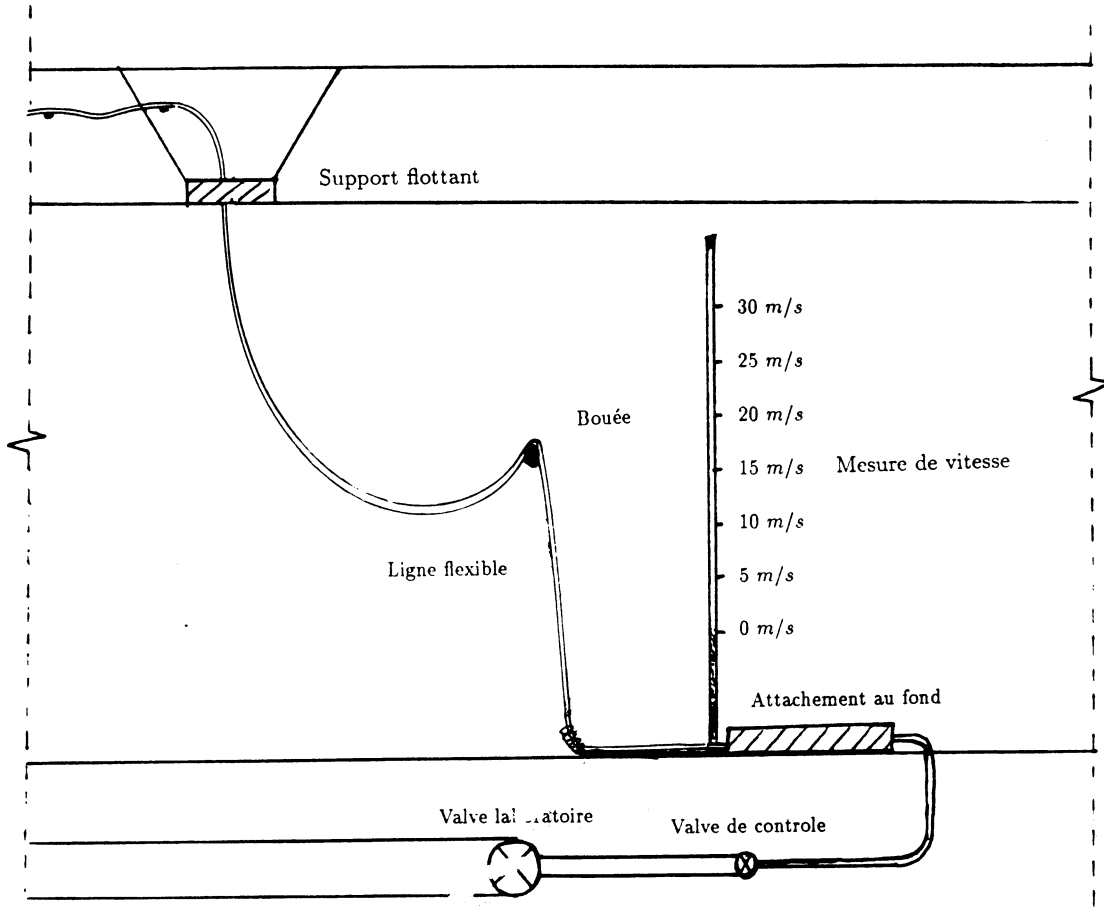


Figure 9: Dispositif expérimental

de stabilisation du débit et de la pression, de sorte qu'aucun dispositif auxiliaire n'était nécessaire pour assurer un écoulement stationnaire dans le modèle.

3.2 Résultats expérimentaux

Les tests ont été effectués avec des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 4.13 m/s , ce qui correspond à une valeur réelle de la vitesse (dans le prototype) de 25 m/s . Le modèle a répondu par le même comportement aux différents régimes de l'écoulement:

Pendant la phase transitoire correspondant à l'établissement du régime, un mouvement du riser est observé, mouvement qui s'amortissait rapidement avec le régime permanent, et le riser semblait reprendre sa position initiale. Afin de tester la stabilité de l'équilibre (en écoulement stationnaire), la bouée était déplacée, puis relâchée. A chaque fois, la bouée reprenait sensiblement sa place et ceci d'autant plus rapidement, que la vitesse de l'écoulement est plus élevée. Ce qui indique plutôt une amélioration de la stabilité de l'équilibre statique. Le même comportement a été observé en présence d'une courant (des vitesses de courant correspondant à des valeurs réelles allant jusqu'à 1.5 m/s ont été considérées).

Au niveau de l'influence sur le comportement dynamique de l'écoulement interne, deux types de sollicitation ont été imposés au modèle: d'abord une variation harmonique de la vitesse d'écoulement autour d'une valeur moyenne, et ensuite un mouvement imposé en tête du riser simulant le mouvement du support en tête en présence d'un écoulement interne.

L'effet de l'écoulement interne sur la réponse du modèle à une excitation en tête du tube, fut de favoriser la transmission de la perturbation à l'ensemble du riser. Le mouvement imposé fut d'autant moins amorti que la vitesse de l'écoulement interne est élevée. Ceci est dû à l'augmentation de la rigidité de la ligne par suite des surtensions induites par les forces centrifuges.

Dans le même sens, les fluctuations périodiques de la vitesse d'écoulement (correspondant à des variations de $\pm 2.5 \text{ m/s}$ sur une période de 17 secondes à l'échelle réelle), ont induit dans le modèle des mouvements (périodiques aussi en apparence) d'amplitudes relativement importantes (environ 4 m à l'échelle réelle); et ceci indépendamment du niveau de la vitesse.

Ces deux derniers résultats témoignent de l'importance que peut avoir l'écoulement interne sur le comportement dynamique des risers flexibles.

CONCLUSIONS

A ce niveau de l'étude de l'influence de l'écoulement interne sur le comportement des risers flexibles, on peut formuler les conclusions suivantes:

- L'écoulement interne ne modifie pas la configuration d'équilibre statique ou quasi-statique des risers flexibles. Aussi, jusqu'à des vitesses dépassant largement les

régimes usuels rencontrés in-situ, l'écoulement interne à un effet "plutôt favorable" sur la stabilité statique et quasi-statique de la structure flexible.

- L'effet de l'écoulement interne, dans les conditions statiques, est d'augmenter la tension également tout le long de la ligne. Pour les faibles vitesses d'écoulement, cette augmentation n'est pas importante (moins de 10 %); et on peut admettre que l'écoulement n'intervient que par le poids du fluide. Cependant, pour des vitesses d'écoulement importantes (plus de 10 m/s), les surtensions induites par les forces centrifuges ne sont plus négligeables et sont mêmes dominantes dans les parties du riser initialement en faible tension.
- Les premiers résultats expérimentaux indiquent que les effets de l'écoulement interne peuvent être importantes en conditions dynamiques, d'où la nécessité de la prise en compte du couplage entre la cinématique du fluide et celle du flexible qui s'introduit dans ces conditions.

REFERENCES

1. Blevins, R.D.; *Flow Induced Vibrations*. Robert E.Krieger Company, Inc. Florida 1986.
2. Narzul, P.and Marion, A.; *Static and Dynamic behavior of Flexible Catenary Risers* 5th Int. OMAE Symp. vol 3. ASME. Tokyo 1986. pp 378 - 379.
3. Paidoussis, M.P. and Issid, N.T.; *Dynamic Stability of Pipes Conveying Fluid* J. of Sound and vibration 1974 33(3), 267 - 294.
4. Peyrot, A.H.; *Marine Cable Structures*. J. of Struct. Div. Dec. 1980. pp 2391 - 2404.
5. Peyrot, A.H. and Goulois, A.M.; *Analysis of Cable structures*. Computers and Struct. vol 10. pp 805 - 813. 1979.
6. Sparks C.P.; *The Influence of Tension, Pressure and Weight on Pipe and Riser Deformations and Stresses*. Trans. of the ASME, vol.106 March 1984.