

2èmes JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

13 au 15 Février 1989 - Nantes

COMPORTEMENT STATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN SYSTEME D'AMARRAGE

Philippe GISQUET et Jean-Marc GUILLEMAUT

CISI INGENIERIE et SINGLE BUOY MOORINGS INC.

Résumé

Les systèmes d'amarrage à point unique déconnectables sont employés pour le mouillage de supports flottants de production, de stockage et de chargement de pétrole en mer.

Des logiciels tels que FLOSY S permettent d'étudier ces structures sans avoir recours systématiquement aux essais en bassin.

Summary

Floating production, storage and offloading units, using a disconnectable single point mooring system are commonly used in the offshore industry.

Sophisticated numerical modelling with software tools such as FLOSYS substantially reduce the need for model testing of such structures at design stage.

INTRODUCTION

L'exploitation pétrolière en pleine mer met en oeuvre une grande variété de structures, notamment de structures flottantes et/ou articulées pour le mouillage de systèmes flottants de production, de stockage et de chargement de pétrole.

Pour certaines applications, il peut être envisagé de concevoir un système de mouillage déconnectable pour minimiser son coût, de telle façon que ce système de mouillage ne soit pas dimensionné par les conditions d'environnement maximales (par exemple centenales).

Dans ce qui suit, une étude particulière sera présentée concernant le mouillage d'un pétrolier de 140.000 tonnes de port en lourd, reconverti en usine de production.

Les conditions météorologiques particulières du champ envisagé où des cyclones viennent perturber de temps en temps une mer plutôt calme, ont conduit à adopter comme système de mouillage, un système déconnectable basé sur un touret, une colonne articulée et des chaînes d'ancrage. C'est un système de type "à point d'amarrage unique" qui permet au navire de prendre la position de moindre résistance sous l'action combinée des vagues, du vent et du courant.

Ce concept est nouveau car il combine éléments rigides et funiculaires, l'élément rigide étant la colonne articulée sur un joint à la Cardan et les éléments funiculaires un ensemble de six chaînes d'ancrage conventionnelles.

Autrefois, seuls les essais en bassin, à échelle réduite, permettait d'étudier le comportement de telles structures.

Aujourd'hui, on voit apparaître des outils de simulation sur ordinateur qui permettent d'appréhender les caractéristiques statiques et dynamiques de tels systèmes, avec la possibilité de faire varier chaque paramètre.

D'où l'intérêt de logiciels de calculs pouvant accepter cette combinaison d'éléments rigides et funiculaires.

SBM Inc, après une longue étude de marché il y a quelques années, a sélectionné FLOSYS qui satisfait ses besoins de modélisation pour tous types de systèmes de mouillage, tant pour ses possibilités statiques que dynamiques.

1. CONCEPT DETAILLE

Le champ pétrolifère en question se trouve par 120 mètres de fond. Les conditions météorologiques y sont en général très favorables, mais il faut tenir compte des cyclones tropicaux et des moussons. La tempête, qui a une période de retour de cinquante ans, est définie par les paramètres suivants :

Hauteur de vague significative	8,65 m
Hauteur de vague maximale	16,05 m
Période de vague (passage au zéro)	9,0 s
Vitesse du courant de surface	2,0 m/s
Vitesse du vent sur une minute	50,0 m/s

Durant la phase conceptuelle du projet, il fut vite établi qu'il serait beaucoup trop onéreux d'utiliser un système de mouillage permanent pour maintenir en place le navire servant d'unité flottante de production, stockage et chargement.

Il fut donc décidé d'opter pour un système de mouillage déconnectable, étudié pour tenir le navire dans des conditions de mer n'excédant pas un certain niveau, et qu'au delà de ces conditions, le navire se déconnecterait de son mouillage pour faire route vers une zone de mouillage protégée. L'étude d'un tel système de mouillage susceptible d'être déconnecté facilement et rapidement pour être ensuite reconnecté après le passage du cyclone, est plus compliquée que l'étude d'un système classique de mouillage permanent. En revanche, les diminutions de coût pour le système complet sont très importantes grâce à la réduction de poids de la structure.

Un autre intérêt d'un tel système déconnectable est la facilité avec laquelle le navire peut regagner de lui-même (ou bien en remorque) un bassin de radoub pour certaines réparations en cas de problèmes.

Il fut donc décidé de concevoir le mouillage pour des conditions de mer quinquennale, tout en choisissant la tempête annuelle comme environnement pour les opérations de déconnexion.

Les paramètres météorologiques ont donc les valeurs suivantes :

	5 ans	1 an	
	—	—	
Hauteur de vague significative	5,5	4,4	m
Hauteur de vague maximale	10,2	8,2	m
Période de vague (passage au zéro)	7,7	6,9	s
Vitesse du courant de surface	1,67	1,34	m/s
Vitesse du vent sur une minute	36,4	24,3	m/s

Le système de mouillage choisi fut le touret à colonne articulée avec mouillage funiculaire.

Ce système consiste en une colonne d'amarrage fixée par un joint à la Cardan sur un touret, c'est-à-dire une structure attachée à une des extrémités du navire (proue ou poupe) et pouvant tourner autour d'un axe vertical grâce à un roulement associé à un joint tournant pour le passage des fluides entre les conduites sous-marines et le navire.

La déconnexion s'opère grâce à un connecteur hydraulique de grand diamètre placé sous le joint à la Cardan.

La colonne pend sous le touret, et l'ensemble est tenu en place grâce à des chaînes fixées sous l'eau sur la colonne et la reliant à des points d'ancrage sur le sol marin.

L'articulation en haut de la colonne est alors à 21 mètres au-dessus du niveau de la mer.

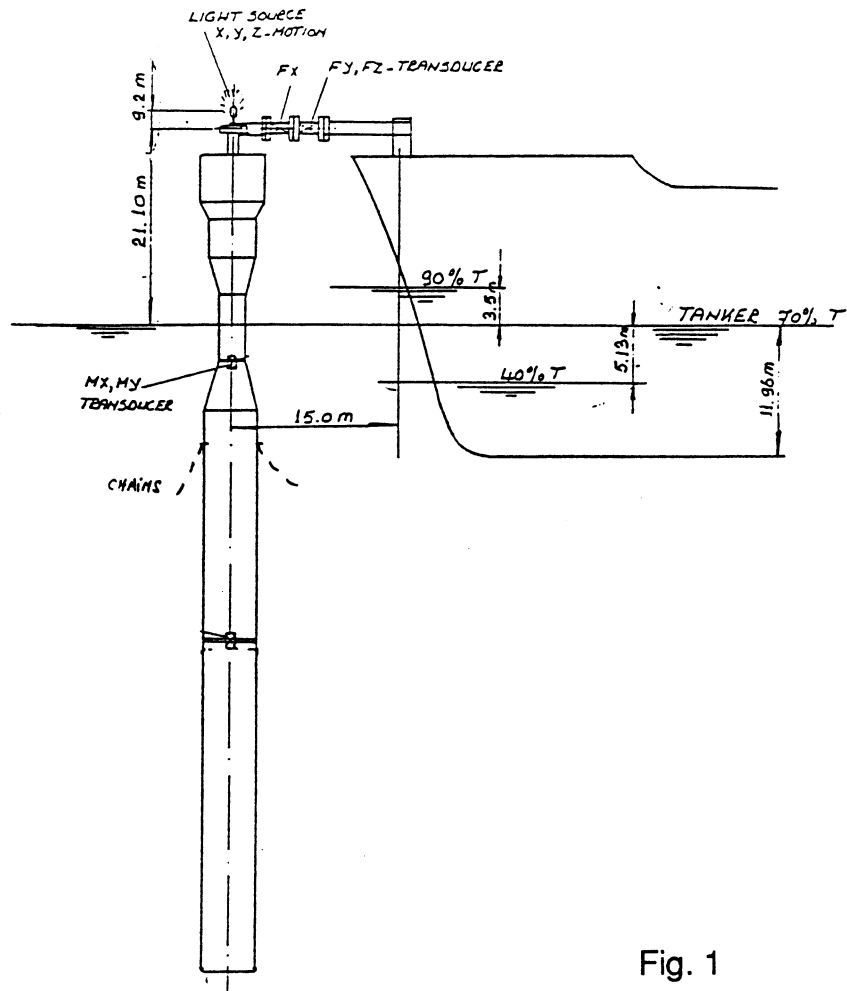


Fig. 1

Lorsque le système fonctionne en mode déconnecté, la colonne flotte par elle-même et soutient les chaînes de mouillage ainsi que les flexibles sous-marins. Le haut de la colonne est alors à 6 mètres au-dessus du niveau de la mer.

La forme de la colonne a été choisie élancée, avec le plus petit diamètre possible près de la surface libre (dans la zone soumise à l'action des vagues). Ceci permet de réduire les efforts de fatigue lorsque le système est connecté. De plus, le système est plus stable lors de la reconnexion de la colonne au touret lorsque celle-ci est hissée hors de l'eau.

2. DESCRIPTION DU LOGICIEL FLOSYS

2.1 Introduction

FLOSYS est un programme de calcul par éléments finis conçu pour l'analyse de structures flexibles ayant un comportement géométriquement non linéaire.

Bien qu'ayant été développé pour l'étude de systèmes marins et offshore, FLOSYS est également capable de prévoir les réponses d'une grande variété de structures flexibles non immergées. Les très grands déplacements et rotations sont pris en compte ainsi que les charges variables en fonction du temps et de la position.

Parmi les cas traités, on peut citer les systèmes de mouillage complexes, les risers, les remorquages de pipelines, de flûtes sismiques marines et de poissons, les tours articulées, les systèmes flottants de production et de chargement, ou encore les systèmes de dragage en mer profonde.

2.2 Modélisation par éléments finis

Un modèle est constitué d'une série de noeuds possédant jusqu'à 6 degrés de liberté chacun (3 translations et 3 rotations) reliés entre eux par divers types d'éléments finis brièvement décrits ci-après.

L'élément câble relie 2 noeuds ayant chacun 3 ddl en translation. Il se comporte comme une vraie chaînette (pas de rigidité en flexion) sous l'effet d'une charge uniformément répartie. Cette charge, combinant le poids propre, la flottabilité et toutes les forces extérieures, définit avec les deux noeuds le plan de la chaînette.

Pour autant que l'on puisse considérer les actions extérieures comme constantes sur sa longueur, cet élément courbe peut être très long en comparaison des éléments droits généralement utilisés pour l'analyse des câbles. Cet élément original a été développé à l'Institut Français du Pétrole et sa théorie est présentée dans les références (1), (2) et (3).

L'élément barre articulée relie 2 noeuds ayant chacun 3 ddl en translation. Il s'agit d'un élément barre classique, rectiligne, élastique et articulé aux deux extrémités, dont la théorie est présentée dans la référence (4).

L'élément poutre flexible, enfin, relie 2 noeuds ayant chacun 6 ddl. Il a été développé à l'Université de Liège et sa théorie est présentée dans les références (5) et (6).

La formulation employée (MARGUERRE modifiée) permet de prendre en compte la courbure de l'élément. Cet élément peut subir de très grands déplacements et rotations sans rencontrer de problèmes de convergence et est particulièrement bien adapté à l'étude des poutres ou tuyaux flexibles à faible rigidité en flexion.

2.3 Forces extérieures

Les forces extérieures prises en compte en dehors du poids propre et de la flottabilité des parties immergées, sont dues au courant (variable avec le temps et la profondeur) imposant une trainée calculée par la formulation de Morison ou de Schmitt et à des houles régulières ou irrégulières (introduites par des spectres) imposant une trainée et une inertie.

2.4 Autres particularités du modèle

On peut introduire un certain nombre de facteurs décrits ci-après.

On peut imposer un comportement de corps solide à un certain nombre de noeuds; dans ce cas, des noeuds déclarés "esclaves" respectent la cinématique d'un corps solide par rapport aux mouvements d'un noeud déclaré "maître".

De plus, un tel noeud "maître" possédant 6 ddl peut être déclaré comme étant le centre de gravité d'un corps flottant de grandes dimensions. Ce corps flottant est alors représenté par une matrice de rigidité hydrostatique et une matrice d'inertie (masses + masses ajoutées). Les forces hydrodynamiques sont introduites comme des fonctions de la période de la houle et l'incidence relative houle/corps flottant.

Enfin, une série de particularités ponctuelles peuvent être introduites, à savoir : des charges variables, des masses et inerties, ou encore des coefficients de trainée et portance éventuellement variables avec la vitesse relative fluide/noeud. Les mouvements de tous les noeuds peuvent être imposés pas à pas ou dans le temps.

2.5 Types d'analyses

Une analyse statique est la recherche de la configuration d'équilibre du système soumis à toutes les forces constantes. Cette configuration est calculée par une méthode itérative de Newton-Raphson réduisant le déséquilibre des forces sous un seuil défini par l'utilisateur.

Une analyse quasi-statique consiste en un enchaînement d'analyses statiques en faisant varier pas à pas des charges ou des positions.

Une analyse quasi-statique particulière, baptisée analyse préstatique car effectuée en début de calcul de mouillages complexes, consiste à rechercher les positions des ancres donnant des prétensions données.

Une analyse modale permet le calcul des modes propres de vibration du système.

Enfin, l'analyse dynamique permet d'obtenir des simulations temporelles effectuées par intégration directe des équations du mouvement. Différents intégrateurs de type prédicteur-correcteur sont employés dans ce cas.

Analyses modales et dynamiques sont exclusives, mais on peut enchaîner par exemple une analyse préstatique, une analyse quasi-statique et une simulation dynamique.

2.6 Sorties

En dehors des sorties sur listings, FLOSYS crée un fichier exploitable par un post-processeur graphique baptisé FLOSHOW. Ce programme permet de tracer les déformées successives du système, les trajectoires de certains noeuds, les courbes de grandeurs en fonction du temps ou du cas de charge, les modes propres, les spectres ...

3. MODELISATION DU SYSTEME

Le système est donc composé d'une colonne et de plusieurs lignes d'ancrage. La colonne est considérée comme un corps rigide indéformable. Deux solutions s'offrent à nous pour la modéliser.

Soit comme un corps flottant, soit comme une série d'éléments "barres" reliant des noeuds n'ayant pas de déplacements relatifs entre eux.

La première solution nécessite la connaissance des efforts hydrodynamiques supportés par la colonne dans une mer houleuse.

Dans la deuxième solution, par contre, les efforts hydrostatiques et hydrodynamiques sont calculés par FLOSYS. Les diamètres relativement petits autorisent une formulation de Morison pour le calcul des efforts hydrodynamiques.

C'est donc cette deuxième solution qui a été choisie pour modéliser la colonne.

3.1 Modélisation de la colonne

La colonne est modélisée par 18 noeuds et 17 éléments barres en respectant les diamètres et les poids des différentes composantes. Dans les parties en forme de tronc de cône, nous avons considéré le diamètre moyen.

3.2 Modélisation des lignes d'ancrage

Chaque ligne est modélisée par 3 noeuds et 2 éléments câbles.

3.3 Modélisation du tanker

Les mouvements induits par le tanker au point d'accrochage de la colonne sont connus. On a donc modélisé ce mouvement comme un déplacement imposé, soit pas à pas, soit dans le temps suivant les types d'analyses. De plus, trois tirants d'eau différents ont été considérés (voir figure 1.).

3.4 Modélisation de l'environnement

Nous avons pris en compte plusieurs courants et houles proches des conditions météorologiques connues. Les courants considérés sont perpendiculaires à l'axe du tanker. La réponse est donc tridimensionnelle. La houle, quant à elle, est prise dans l'axe du navire. Le mouvement imposé en tête, simulant les mouvements du tanker est ellipsoïdal. Le pilonnement et le cavalement sont tous deux déphasés par rapport à la houle.

4. RESULTATS

4.1 Analyse statique

Nous avons fait une étude paramétrique des réponses en fonction du tirant d'eau du navire et de la vitesse du courant.

A chaque fois, nous avons tracé la courbe reliant l'excursion du tanker aux principales grandeurs (effort en tête, tensions dans les lignes, inclinaison de la colonne).

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats pour une excursion du navire de 40 mètres (soit 1/3 de la profondeur).

Tirant d'eau	40%	40%	40%	70%	90%
Courant (m/s)	0	1	2	0	0
Tension max (T)	287	288	292	254	236
Force X en tête (T)	321	322	331	282	260
Force Y en tête (T)	0	12	46	0	0
Tangage (deg)	25,4	25,4	25,6	26,1	26,1
Roulis (deg)	0	2	8	0	0

Le courant a peu d'influence sur le comportement du système.

Par contre, la tension de la ligne la plus tendue varie de 20 % et l'effort en tête de 21 % quand on passe d'un tirant d'eau 40% à 90%.

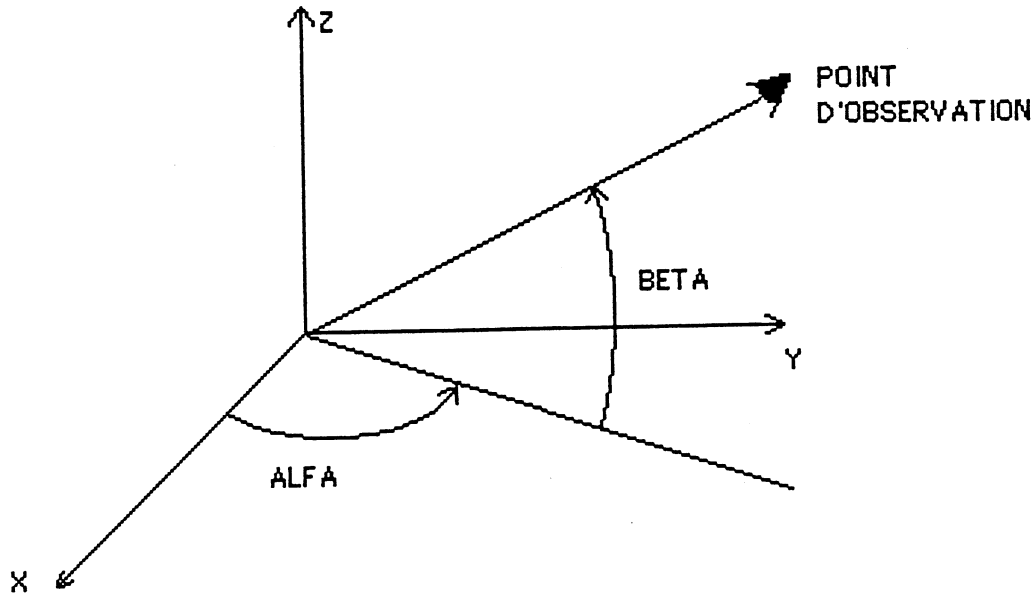
4.2 Corrélation avec les essais

Des essais en bassin avaient été effectués sur cette structure. Nous disposons des courbes reliant les paramètres ci-dessus à l'excursion du navire pour la configuration sans courant et le tirant d'eau 40%.

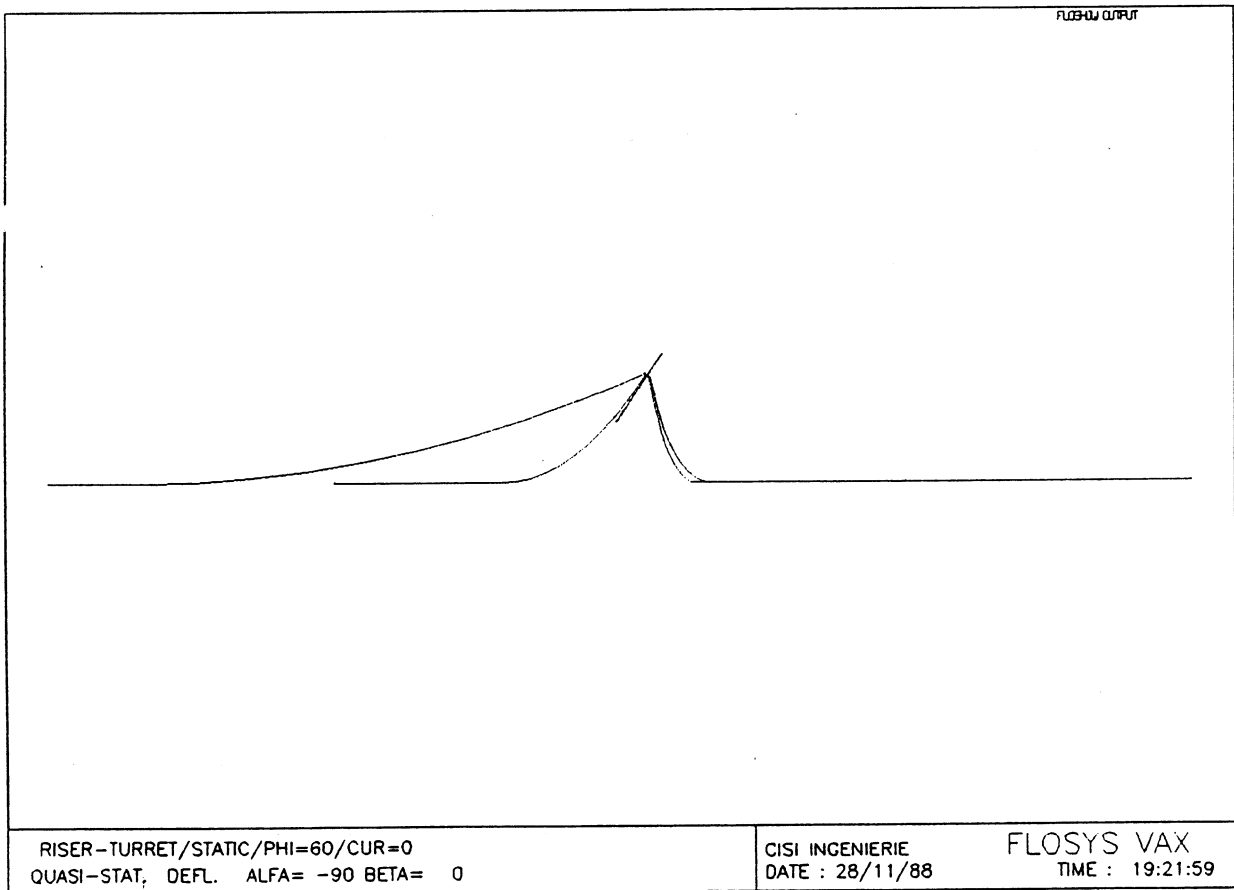
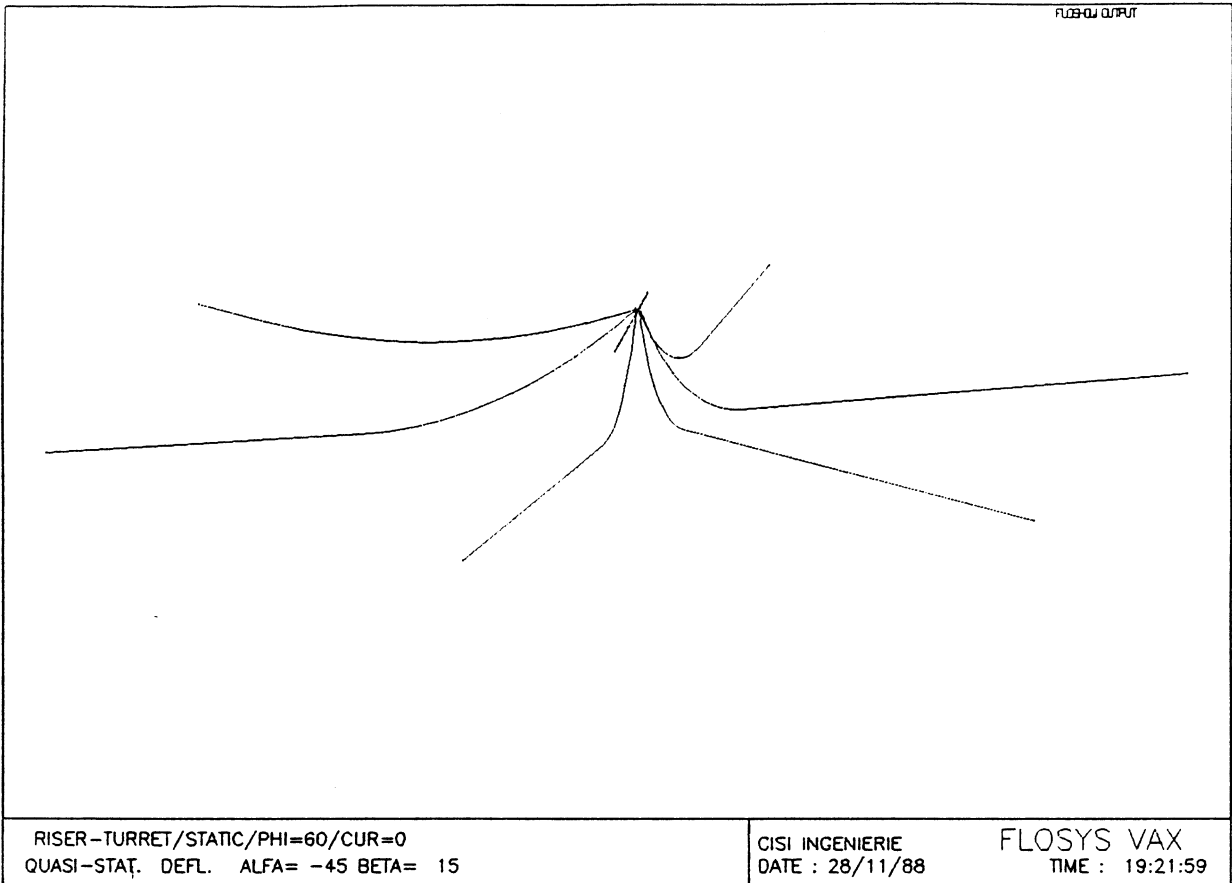
L' écart maximal entre les essais et les calculs a été observé sur l'effort en tête pour les grandes excursions du navire. Cet écart est de 9 %. Pour la tension maximale et l'inclinaison prise par la colonne, les écarts sont inférieurs à 5 %. Ces écarts sont sans doute dûs à la précision du modèle, les paramètres influençant le plus les calculs étant l'élasticité des lignes d'ancrage et le bilan des poids de la colonne.

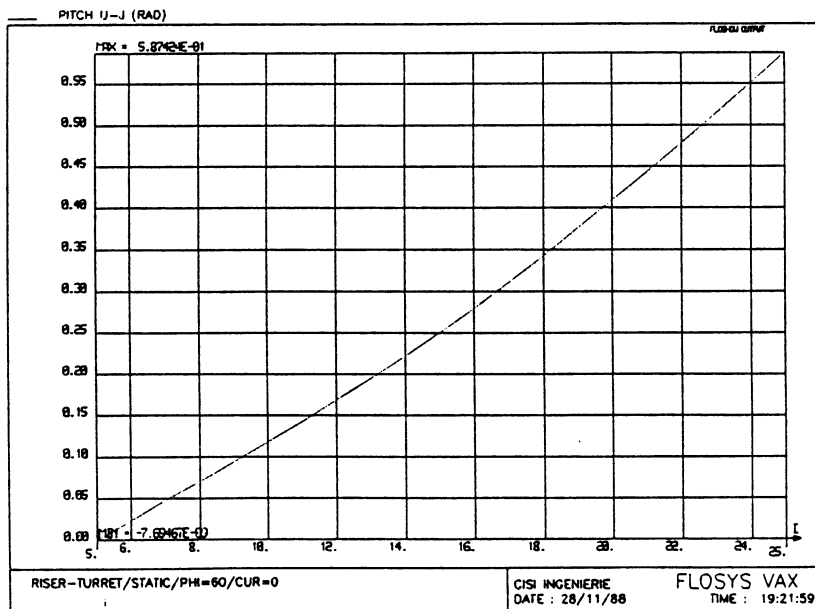
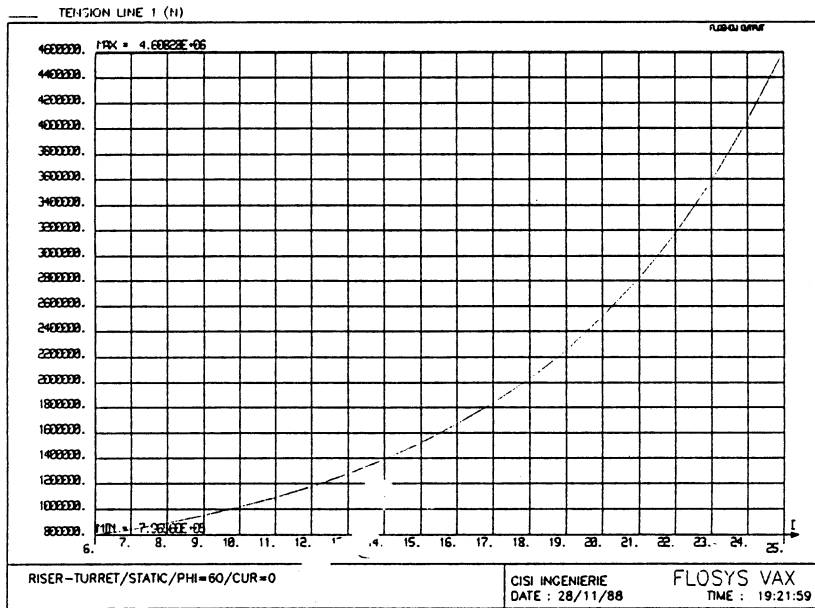
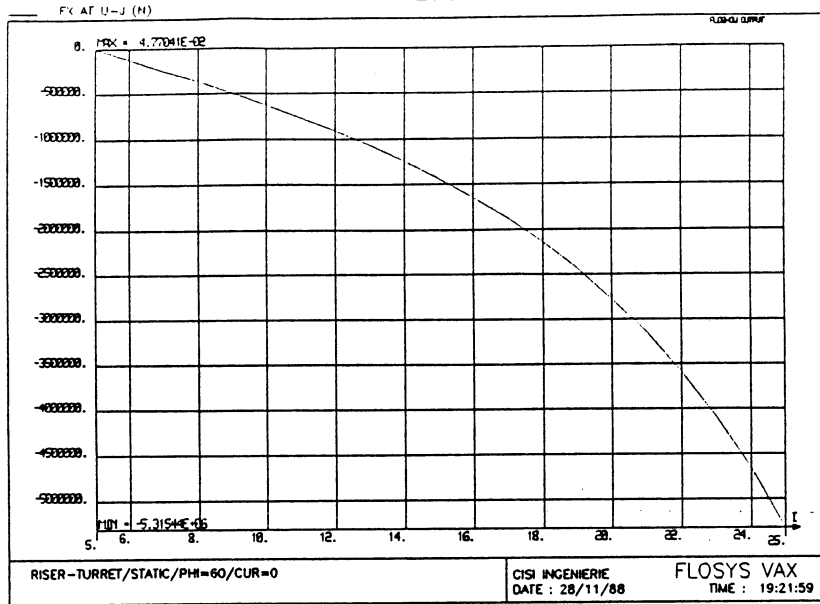
4.3 Graphiques présentés

La page suivante présente deux vues du système pour une excursion du navire de 50 mètres, le tirant d'eau 40% et un courant nul. La direction du point d'observation est définie par les angles ALFA et BETA indiqués sur les dessins.



La page suivante présente les courbes de l'effort en tête, de la tension maximale et de l'inclinaison de la colonne en fonction du cas de charge. Les cas de charge sont ici les déplacements successifs du sommet de la colonne. Les 5 premiers cas servent à soulever la colonne verticalement pour l'amener à sa position avec le tirant d'eau 40% et les 20 cas suivants correspondent à une excursion de 50 mètres du navire.





4.4 Analyse dynamique

Deux analyses dynamiques ont été effectuées sur le système.

La première consiste à placer la colonne déconnectée dans les conditions de tempête.

La deuxième consiste à simuler le comportement du système connecté dans la mer annuelle. Dans ce cas, nous avons tout d'abord imposé une excursion du navire de 30 mètres, assimilable à une dérive constante, puis un mouvement ellipsoïdal autour de cette position.

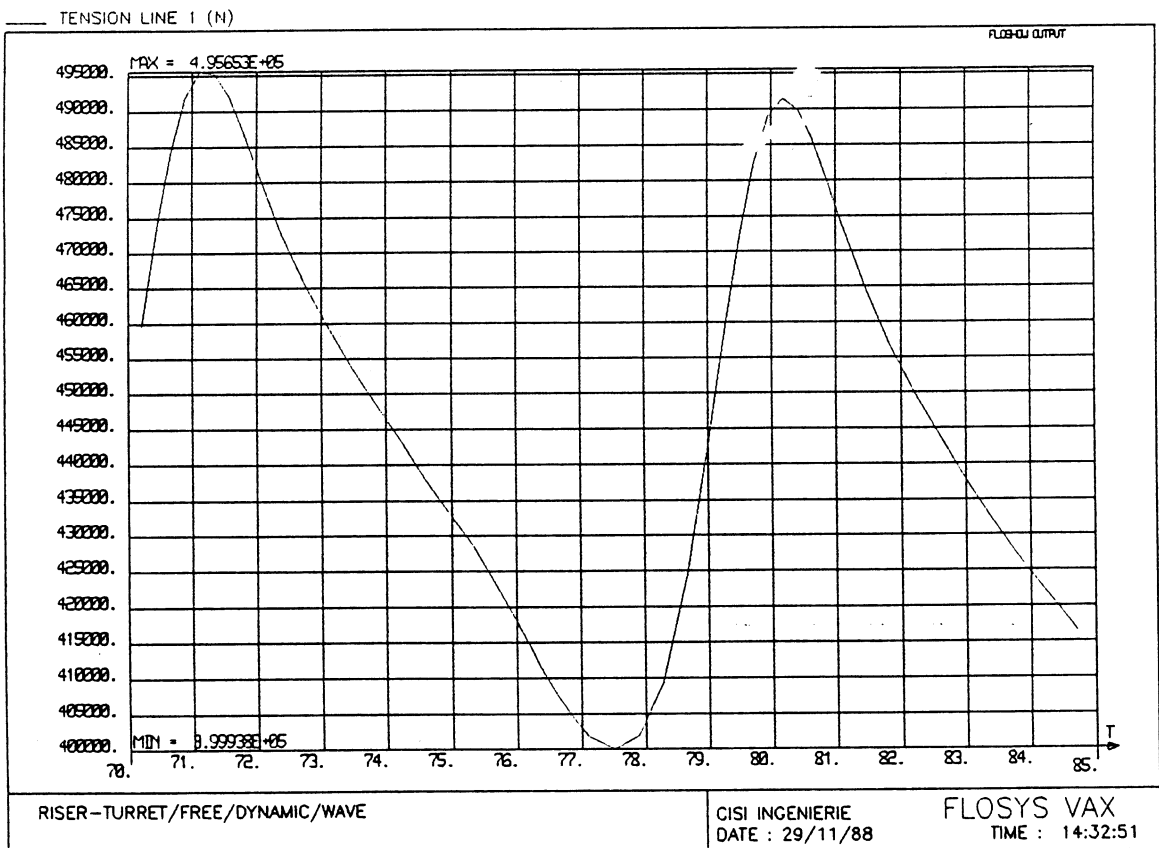
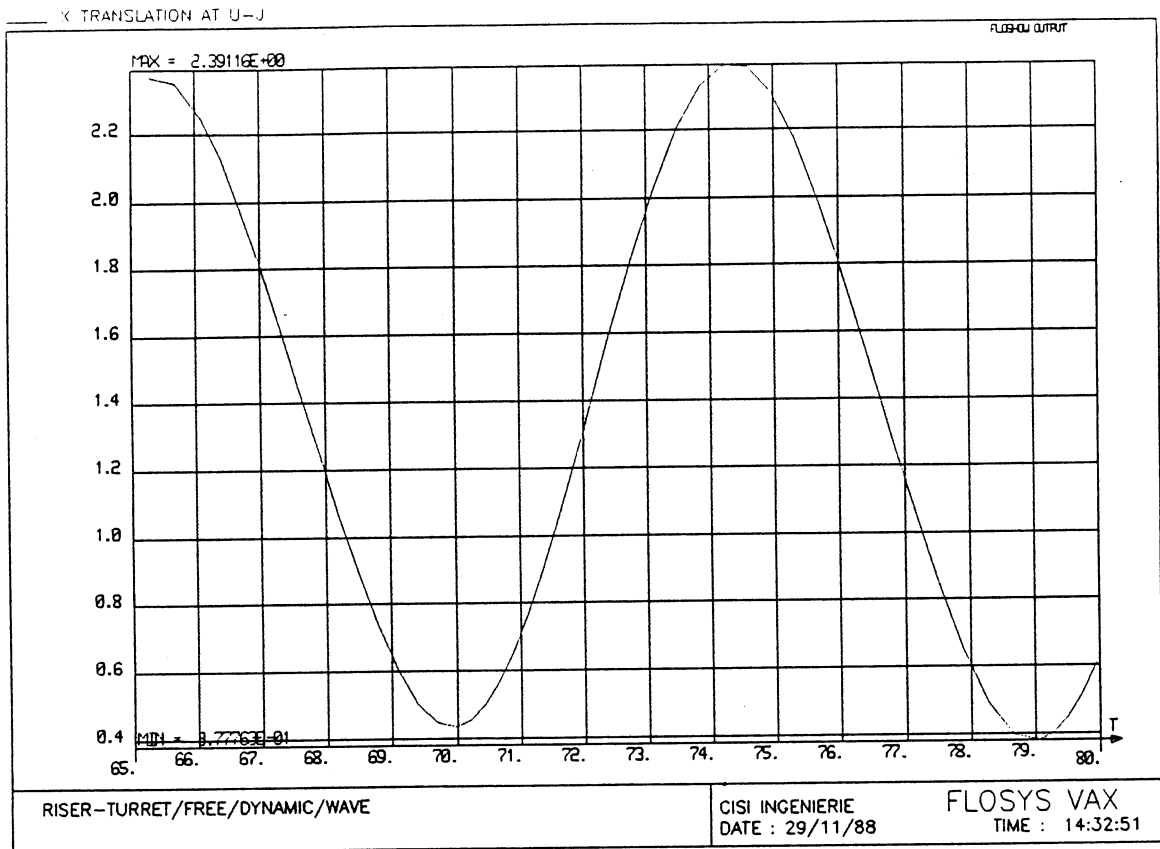
Dans la première simulation, nous observons une dérive de la colonne. Cette dérive est causée par les efforts du second ordre dûs à la houle. Elle est peu importante puisque le sommet de la colonne se déplace au maximum de 2,4 mètres. Cette dérive et les efforts hydrodynamiques sur les éléments funiculaires entraînent une surtension de 4 tonnes sur la ligne la plus tendue.

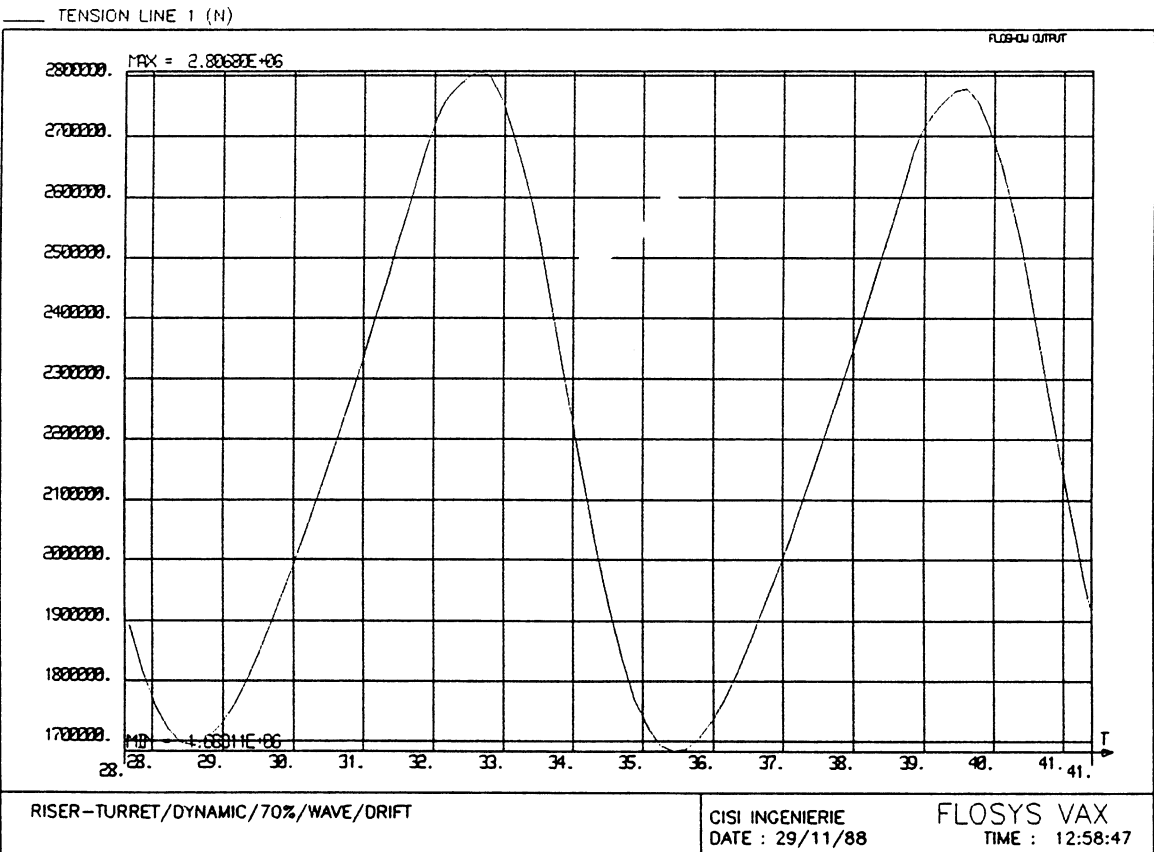
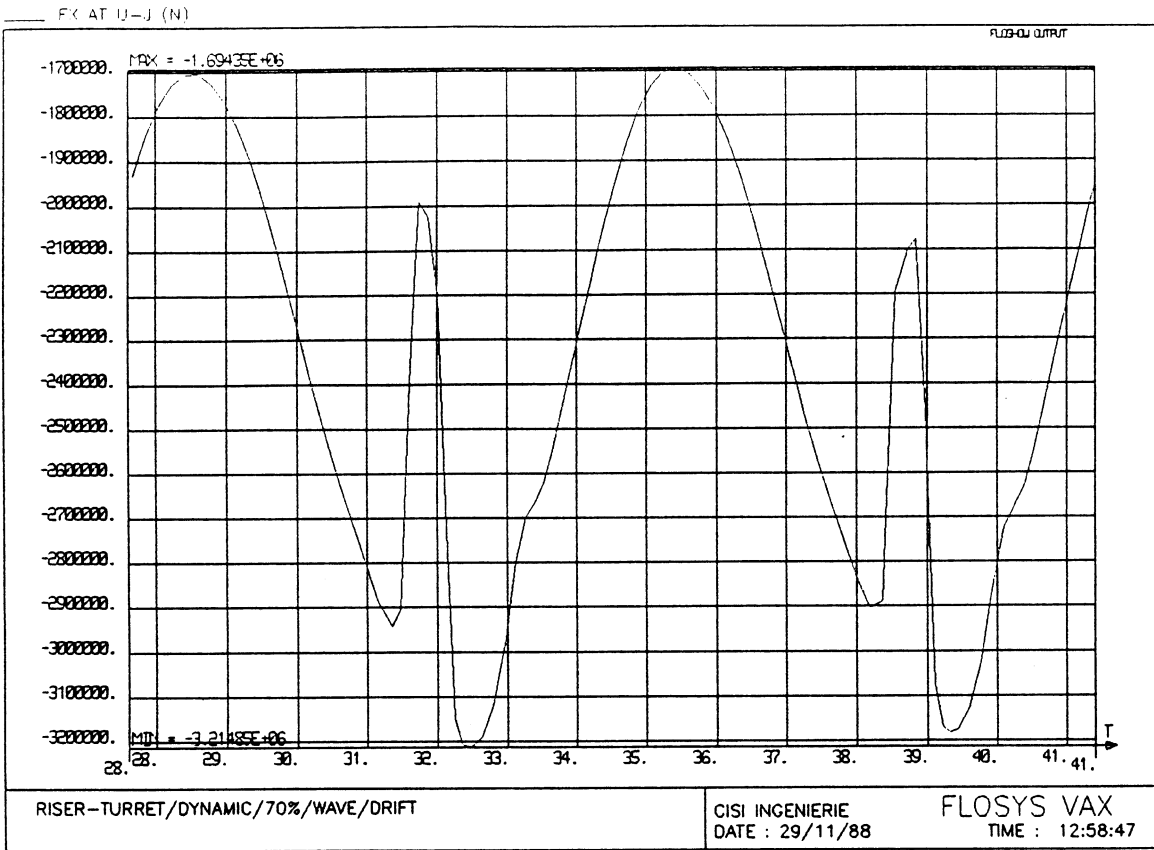
Dans la deuxième analyse dynamique, la combinaison de la houle et des mouvements déphasés du navire entraîne une réponse périodique mais non sinusoïdale au niveau de l'effort en tête. Dans ces conditions de mer, on observe une augmentation de l'effort en tête de 140 tonnes et de la tension maximale de 100 tonnes par rapport à l'analyse statique. Toutefois, ces efforts ne sont pas de nature à mettre le système en péril.

4.5 Graphiques présentés

La page suivante présente, en fonction du temps, le déplacement en X du sommet de la colonne, correspondant à la dérive du système déconnecté dans les conditions de tempête. On trouve, en dessous, l'évolution dans le temps de la tension dans la ligne la plus sollicitée.

La page suivante présente les résultats obtenus avec le système connecté à un navire dérivant de 30 mètres et soumis à l'action de la houle annuelle. Les courbes représentent l'évolution dans le temps de l'effort en tête et de la tension maximale dans les lignes d'ancrage.





5. INTERET DU LOGICIEL

Le principal intérêt de l'utilisation de logiciels pour l'étude de systèmes complexes de mouillage est de ne plus faire appel systématiquement aux essais sur modèles réduits en bassin.

Cela permet de réduire les coûts des pré-études servant au dimensionnement des structures puisque l'on peut modifier facilement et rapidement les principaux paramètres.

Ensuite, quand la structure est dimensionnée, on peut simuler son comportement dans une grande quantité de conditions d'environnement sans immobiliser un bassin pendant des semaines. De plus, certains environnements (superposition de courants et de houles croisées par exemple) sont difficilement reproductibles dans la plupart des bassins.

Enfin, la possibilité de FLOSYS a été interfacé avec des codes calculant les efforts hydrodynamiques subis par un navire permet d'envisager des études informatiques complètes de systèmes tels que celui présenté au paragraphe 1.

6. REFERENCES

- (1) PEYROT and GOULOIS - Analysis of flexible transmission lines.
Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 104, no.ST5, p. 763,779.
- (2) PEYROT and GOULOIS - Analysis of Cable Structures .
Journal of Computer and Structures, Vol 10, no.5, p. 805,813, Oct 79.
- (3) PEYROT - Static and Dynamics of Offshore Cable and Flexible Pipe Systems. Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol 35, no.5, p.833,848, Oct. 80.
- (4) PRZEMIENIECKY - Theorie of Matrix Structural Analysis, Mc Graw Hill.
- (5) DE VILLE DE GOYET and FREY - Use of Marguerre Theorie in the non linear analysis of beam and plate structures. ART in FEM Technology, ed. J. ROBINSON, Proceedings of the 4th World Congress on FEM, Interlaken, Sept. 84.
- (6) DE VILLE DE GOYET - Thèse de Doctorat - Université de Liège. 1988.