

2èmes JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

13 au 15 Février 1989 - Nantes

---

## MODELISATION D'UNE EXTREMITE DE CABLE

### *A CABLE EXTREMITY MODEL*

Henri Serindat

Société E C A  
Z.I. de Toulon-EST  
83078 TOULON CEDEX BP 242

Un logiciel de simulation de câble a été utilisé pour élaborer un modèle d'extrémité de câble. Ce modèle (valable pour de petits déplacements) est simple à intégrer à une simulation de véhicule sous-marin et permet ainsi d'étudier les interactions véhicule-câble et la stabilité du véhicule qui en résulte.

Cette démarche trouve son application pour les engins remorqués lorsque des performances de stabilité élevées sont requises.

*A cable numerical simulation has been carried out to elaborate a model of cable extremity. This model (valid for small displacements) can be easily integrated in a vehicle simulation software and hence, allows the study of the vehicule-cable interaction and the resulting vehicle stability.*

*This work applies to towed systems with high stability requirements.*

CONTEXTE DE L'ETUDE
---------------------

**DES SIMULATIONS DE PLUS EN PLUS COMPLEXES**

L'étude des véhicules sous-marins passe par une modélisation des phénomènes mis en jeu. Dans le cas de véhicules libres, on a en général à faire à des corps indéformables et la partie délicate de la modélisation porte sur les efforts hydrodynamiques.

En ce qui concerne les véhicules pilotés, dès lors que l'on cherche une prévision assez fine des performances, il est courant d'inclure dans un modèle de simulation complet l'autopilote du véhicule.

La modélisation d'un autopilote comporte en général les modules suivants :

- simulation des capteurs et des actionneurs, avec notamment leurs temps de réponse, leurs saturations, ..
- simulation des lois de pilotage
- génération d'un programme de navigation (déroulement d'une trajectoire)

Dans le cas de véhicules à câble, la simulation se heurte aux difficultés suivantes :

- simulation d'un système déformable (plus complexe à mettre en oeuvre, plus longue en temps de calcul)
- nombre de cas à simuler multiplié par plusieurs ordres de grandeur

Cette multiplication est liée aux différentes combinaisons possibles des éléments suivants :

- longueur et caractéristiques du câble
- coordonnées relatives des 2 extrémités du câble
- variations de courant sur la hauteur d'eau
- perturbations diverses engendrées par les mouvements du navire
- etc...

Les programmes de simulation et leur mise en oeuvre prend alors une ampleur souvent incompatible avec les budgets disponibles.

**NOUVELLE APPROCHE**

Nous avons donc recherché une méthode permettant de déconnecter la simulation du véhicule de celle du câble.

Au niveau du véhicule, la base de la simulation consiste en un équilibre des forces et moments :

- effets de la pesanteur (poids, flottabilité)
- efforts d'inertie
- efforts hydrodynamiques en régime permanent et en régime non permanent
- efforts exercés par le câble

Ces derniers doivent être exprimés comme les autres, c'est-à-dire notamment en fonction de la cinématique du véhicule (position, vitesse, accélération).

Afin d'élaborer ce modèle de câble, nous avons utilisé un logiciel de simulation dynamique de câble où les 2 extrémités ont une trajectoire imposée.

En soumettant l'extrémité 'véhicule' à une excitation, on caractérise l'interaction câble-véhicule. Il est bien évident que le modèle qui en découle ne dépend pas du véhicule.

De même, les efforts recueillis à l'extrémité 'véhicule' à la suite d'une excitation de l'extrémité 'navire' caractérisent la transmission de perturbations par le câble.

Les efforts perturbateurs engendrés par le navire peuvent avoir pour origine la houle ou des déplacements accidentels du navire (simulés par un enchaînement de trajectoires différentes).

## METHODE DE SIMULATION

### SIMULATION DE CABLE

Les méthodes de simulation de la dynamiques d'un câble sont assez complexes pour mériter quelques remarques. Elles sont souvent basées sur une décomposition du câble en segments rigides avec diverses hypothèses de concentration.

Nous nous sommes limités à un espace à 2 dimensions, et pour chaque segment de câble :

- les masses sont concentrées aux extrémités
- les efforts hydrodynamiques sont calculés au centre puis répartis également sur les 2 extrémités

La difficulté principale qui a du être résolue dans ce logiciel est la maîtrise des fréquences propres parasites qui apparaissent avec la discrétisation du câble compte tenu de son élasticité.

### SIMULATION DES EXTREMITES

Les extrémités du câble ont une cinématique imposée.

La réalisation d'un logiciel à la fois puissant et simple nous a conduit à sauvegarder l'état du système en fin de simulation, avec possibilité de démarrer une nouvelle simulation à partir d'un état sauvegardé. Ainsi l'enchaînement des mouvements n'est pas limité par le programme. Seuls sont limités les types de trajectoire réalisables.

Ceux-ci sont caractérisés (de la même manière pour les 2 extrémités) par une vitesse constante, avec les particularités suivantes :

- ajout de mouvements perturbateurs (actuellement sinusoidaux)
- passage d'un segment de trajectoire à un autre par une phase de transition

Cette transition a pour but de limiter les accélérations à des valeurs finies et se traduit par des coordonnées qui suivent une loi d'ordre 2 ou 3.

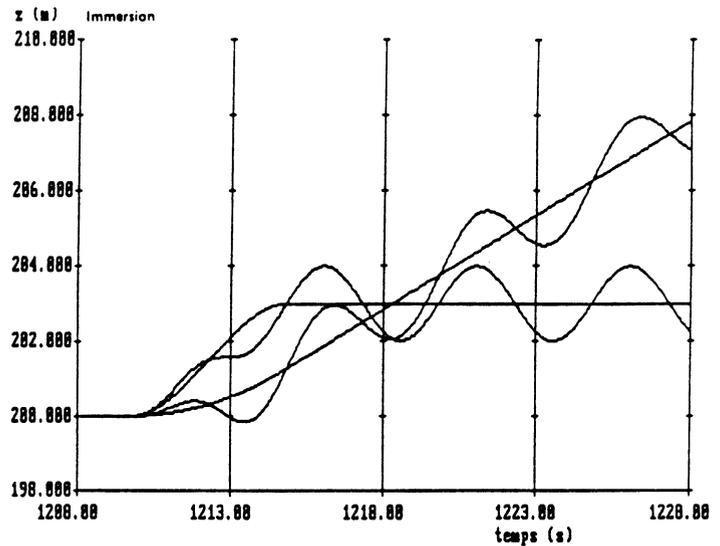
La figure 1 montre quelques exemples de transition entre 2 simulations.

figure 1

changement :

- de vitesse (0 à 0.5 m/s)
- de position (3 m)

en 5 s,  
avec et sans perturbations



### RESULTATS DE SIMULATION

#### CONDITIONS EXPERIMENTALES SIMULEES

Les résultats qui suivent simulent la configuration suivante :

- câble - caractéristiques physiques :
 

longueur totale :	400 m
masse linéique :	2 kg/m
poids dans l'eau :	15 N/m
discrétisation :	5 segments
élasticité - module de Young :	8000 N/mm <sup>2</sup>
constante de temps d'amortissement :	81,5 ms
- câble - caractéristiques hydrodynamiques avec rubans (Eames) :
 

diamètre :	0.025 m
coefficient de traînée normale :	0.9
coefficient de traînée tangentielle :	0.1
- contexte de simulation :
 

immersion (z) du véhicule :	200 m
recul par rapport au navire :	300 m
vitesse :	4 m/s

En régime permanent, le câble arrive à peu près vertical sur le véhicule avec une tension (F) de 9658 N. Les efforts étant dans l'alignement du câble, nous ne nous intéresserons qu'aux mouvements et aux efforts suivant cette direction.

#### EXCITATION DE L'EXTREME 'VEHICULE'

L'excitation que nous appliquons est un pseudo-échelon avec un temps de montée, comme indiqué plus haut, de manière à avoir des accélérations finies.

Les figures qui suivent montrent la réponse à diverses excitations de faible amplitude autour du régime permanent.

figure 2

déplacement de :

- 1 m
- 1 m
- 2 m
- 3 m
- 4 m

en 5 s

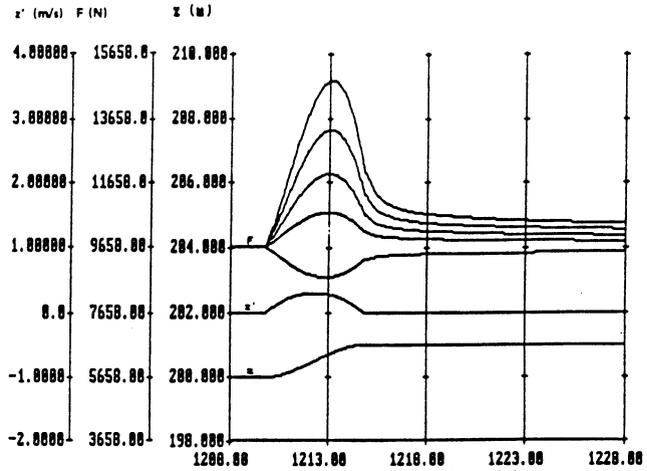
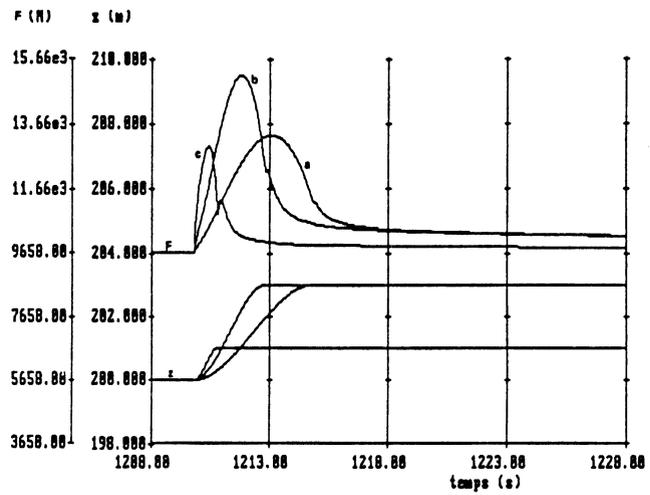


figure 3

déplacement de :

- a : 3 m en 5 s
- b : 3 m en 3 s
- c : 1 m en 1 s

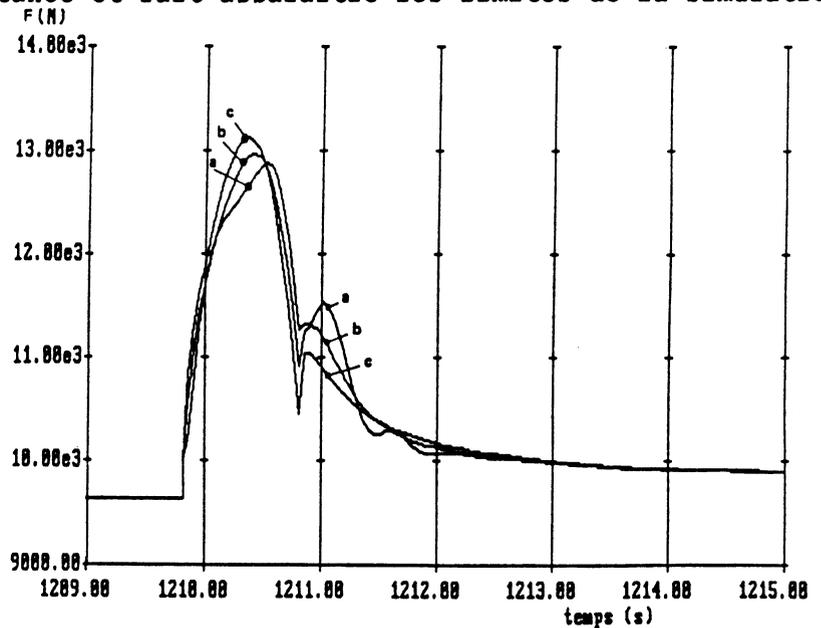


Pour les transitions de courte durée, l'amortissement structural du câble a une certaine importance et fait apparaître les limites de la simulation.

figure 4

influence de l'amortissement :

- a : 8.1 ms
- b : 81 ms
- c : 204 ms



Il apparaît sur les courbes précédentes 2 phénomènes :

- la résonance des segments de câble
- des échelons dus à l'inertie du dernier segment de câble

#### EXCITATION DE L'EXTREMITE 'NAVIRE'

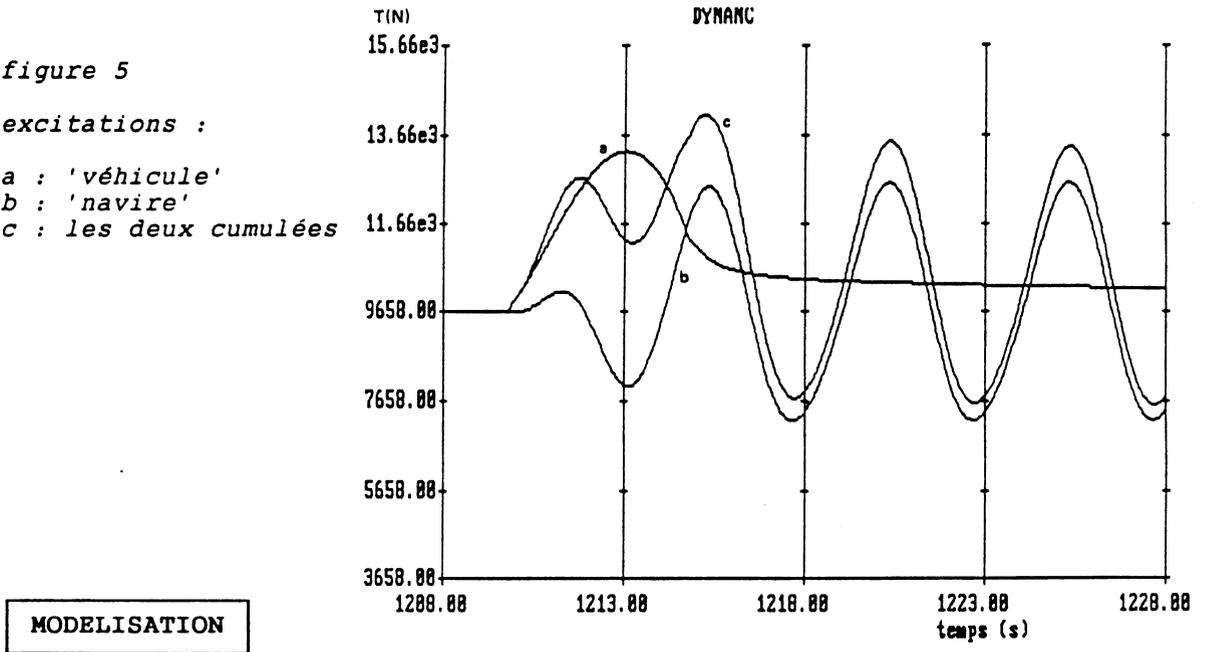
Cette simulation a été effectuée en simulant l'effet de la houle sous forme d'un mouvement sinusoïdal de l'extrémité 'navire' :

- amplitude : 2.8 m crête-à-crête
- période : 5 s
- orientation : 45 ° vers le bas

figure 5

excitations :

- a : 'véhicule'
- b : 'navire'
- c : les deux cumulées



#### INTERACTION CABLE-VEHICULE

Dans un premier temps, il apparaît (cf figure 5) une bonne superposition des efforts perturbateurs si bien que l'on peut écrire que les efforts recueillis au niveau du véhicule sont la somme de :

- efforts dus à l'interaction câble-véhicule
- efforts dus à l'excitation de l'extrémité 'navire' et transmis par le câble

Dans un deuxième temps il apparaît que les efforts d'interaction câble-véhicule sont linéaires (cf figure 2 et 3).

On peut donc écrire d'une manière générale :

$$[F] = [C][X] + [P]$$

avec : [F] : tension câble au niveau du véhicule  
 [C] : modèle d'extrémité de câble  
 [X] : vecteur d'état du véhicule (point d'attache du câble)  
 [P] : efforts perturbateurs transmis par le câble

L'allure des réponses (figures 2 et 3) nous a conduit au modèle suivant, exprimé en fonction de la vitesse d'allongement du câble ( $z'$ ), et sous forme de transformée de Laplace :

$$\frac{F}{z'} = a + \frac{b}{1 + \tau p} + \frac{c}{p}$$

L'interprétation des coefficients est la suivante :

- $c$  : terme intégral correspondant au régime permanent
- $a + b$  : terme de gain
- $a/b, \tau$  : traînage

Ce traînage caractérise le temps que met le câble pour retrouver un état stable.

Une optimisation de ces coefficients (cas de la figure 6) donne :

- $a = 1355$
- $b = 2035$  (pour  $F$  en N et  $z'$  en m/s)
- $c = 187$

Les courbes suivantes montrent ce que donne ce modèle d'extrémité dans différentes configurations.

figure 6

comparaison

- $a$  : simulation de câble
- $b$  : modèle d'extrémité

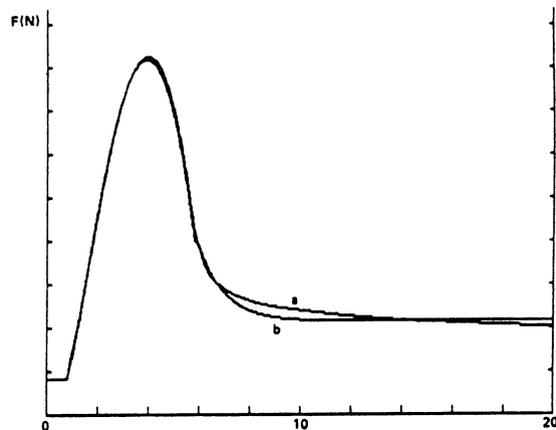
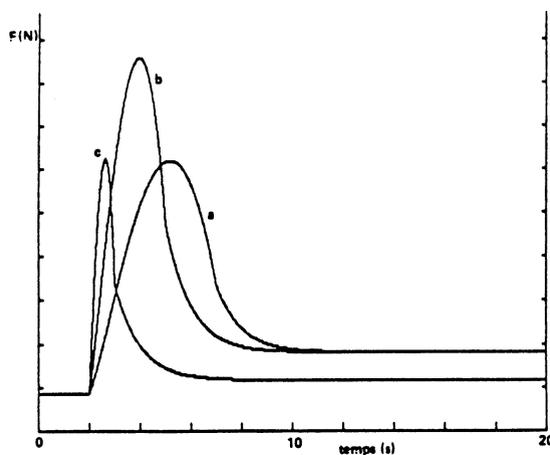


figure 7

réponse à des déplacements de :

- $a$  : 3 m en 5 s
- $b$  : 3 m en 3 s
- $c$  : 1 m en 1 s



Les résultats précédents montrent la validité du modèle d'extrémité, notamment en comparant les figures 3 et 7.

La précision au niveau du trainage n'est pas très bonne, il faudrait un terme de trainage d'ordre 2 ou plus. Si l'on se réfère à la finalité du modèle (interaction véhicule-câble), cette imprécision est peu gênante car elle se produit dans une zone où les efforts sont relativement stables.

Si l'on examine la figure 4, on constate que le modèle ne reproduit pas les brusques variations de tension en début et en fin du déplacement. En fait ces échelons (environ 400 N) sont dus à l'inertie de l'extrémité inférieure du câble qui subit une accélération brutale de  $6 \text{ m/s}^2$ .

#### **EFFORTS PERTURBATEURS**

En soumettant l'extrémité 'navire' à une excitation, l'autre étant fixe, nous recueillons des efforts perturbateurs au niveau du véhicule. Nous avons vu (cf figure 5) qu'il n'y a pas interaction avec le véhicule mais simplement superposition.

Pour étudier le comportement d'un véhicule lorsque le navire remorqueur est soumis à des mouvements, il suffit donc d'avoir un modèle numérique (et non analytique) des perturbations.

#### **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Cet article a développé divers aspects de la modélisation de systèmes remorqués et montré que l'on peut modéliser une extrémité de câble vis-à-vis des mouvements et de efforts longitudinaux.

Il en résulte notamment que, grâce à un modèle d'extrémité, on peut séparer :

- l'étude du câble : recherche de configurations optimales (câble, courant, géométrie du système)
- l'étude du comportement du véhicule (modèle d'extrémité très facile à mettre en oeuvre)

Cette étude sera poursuivie pour élaborer un modèle d'extrémité qui soit également valable en flexion (mouvements du véhicule perpendiculaires au câble). Ceci nécessite une bonne modélisation du câble en flexion, et une discrétisation assez fine.

La démarche utilisée à une extrémité est également applicable en tout point du câble.

Enfin, comme toutes les études théoriques, il importe de les confronter à l'expérience. Nos modèles de câble ont été vérifiés expérimentalement. Par contre un effort important doit être maintenu pour instrumenter les systèmes sous-marins et obtenir des informations plus fines qui sont nécessaires à l'obtention de bons modèles dynamiques.