

# ANALYSE STRUCTURALE D'UN BARRAGE FLOTTANT ANTI-HYDROCARBURE PAR ELEMENTS-FINIS

**Frédéric MUTTIN, Serge NOUCHI**

Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels – EIGSI – La Rochelle  
(France)

## SOMMAIRE

La modélisation complète d'un barrage flottant anti-hydrocarbure fait intervenir un problème de mécanique des fluides et un problème d'analyse structurale. Ces deux problèmes interagissent entre eux. Le problème de l'écoulement de l'eau et de l'hydrocarbure au voisinage du barrage est traité par une méthode numérique couplée à une étude expérimentale en bassin. L'analyse structurale d'un barrage utilise la méthode des éléments-finis de type membrane non linéaire. Le calcul présenté est celui du plan de protection par barrage de la rivière Elorn, de la rade de Brest. Le barrage est considéré dans son environnement physique réel. La modélisation fournit des résultats détaillés de chaque partie du barrage. La recherche présentée vient du projet SIMBAR du réseau de recherche RITMER.

## SUMMARY

A structural analysis and a flow problem compose a complete modelling of oil-spill boom. These two fluids and solid problems interact. The oil and water flow around the vicinity of the boom is studied by a numerical model and experimental tests in a towing tank. The structural analysis is done using the finite-element method and a non-linear membrane element. The Elorn river boom contingency plan is presented. The boom plan is studied in its real environment of the Brest bay. The modelling is able to provide detailed results in every part of the boom. The research presented is issued from the project SIMBAR of the research network RITMER.

### 1. INTRODUCTION : LA PROBLEMATIQUE DES BARRAGES

Il existe de nombreux types de barrages flottants, adaptés à différents usages et milieux, depuis les plans d'eau intérieurs jusqu'à la mer ouverte. Néanmoins, ces barrages de types différents sont généralement tous composés des cinq mêmes éléments principaux : un

flotteur et un lest destinés à assurer leur flottabilité, un franc-bord et une jupe immergée visant à contenir effectivement la pollution à la surface libre, et un élément de reprise de tension permettant d'absorber les efforts. L'efficacité d'un barrage est limitée pour plusieurs raisons. En particulier, nous avons analysé le cas d'un courant marin trop important. La figure 1 montre un barrage en présence d'un courant trop important.



Figure 1. La limite d'efficacité d'un barrage en présence d'un courant important

Les barrages s'utilisent en haute mer pour confiner une nappe d'hydrocarbure. Ils s'utilisent en mer côtière pour arrêter une nappe d'hydrocarbure. Ils permettent de protéger le littoral. Un barrage peut être positionné dans un estuaire. Deux sources de courant présentent des variations propres : la marée et le débit de la rivière. Lorsque le courant est important, l'alignement du barrage est placé de biais par rapport au courant. La figure

2 présente un barrage placé de biais par rapport au courant. Une approche classique consiste à dire que les efforts sur le barrage sont dus à la résultante des pressions dynamiques calculée à partir de la composante normale du courant, intervient ainsi,  $\cos(\alpha)$ , où  $\alpha$  est l'angle entre la normale au barrage et le courant marin. L'angle  $\alpha$  est nul lorsque le courant est normal au barrage.



Figure 2. L'alignement de biais d'un barrage pour diminuer les efforts

*Remarque :* L'implication d'EDF dans ce projet est due à l'intérêt de protéger la source froide des CNPE en bord de mer ou en estuaire en évitant le colmatage des tambours filtrants par des hydrocarbures avec la pose de barrage en cas de d'accident ou d'incident.

Nous allons présenter la méthode numérique qui a permis l'analyse structurale du barrage.

## 2. L'ELEMENT FINI MEMBRANE NON-LINEAIRE

Le premier élément membrane non linéaire est apparu en 1967 dans les travaux de J.T. Oden

[1]. Cet élément est un triangle d'interpolation linéaire à 3 nœuds. L'introduction de la courbure de la surface dans un élément membrane est apparue dans les travaux de E.J. Haug en 1972 [2]. Cet élément quadrilatère possède 4 nœuds. Il permet une interpolation bilinéaire du déplacement de la membrane. En 1980, B. d'Uston et P. Trompette ont développé l'élément triangulaire quadratique à 6 nœuds [3]. Tous ces éléments permettent une continuité  $C^0$  du déplacement entre les éléments. Nous utilisons ici l'élément-fini de Haug-Powell à 4 nœuds pour résoudre l'équation non linéaire des membranes.

L'architecture textile tendue est une thématique de recherche qui est à l'origine de ce type de méthode numérique, en particulier le laboratoire SFB64 de l'Université de Stuttgart. La mise en forme des tôles minces utilise un élément membrane non linéaire avec une loi de comportement non-linéaire dans le domaine plastique. Il existe d'autres domaines d'application comme les voiles de navire, les airbags, les flottabilités.

La théorie des membranes est une partie de la théorie des coques minces. La déformation mécanique d'une membrane s'exprime avec une fonction non linéaire de son déplacement  $U$  dans l'espace. L'opérateur de déformation  $X$  d'une membrane est une mesure de la demi-différence de métrique entre celle de la surface après déplacement  $a^*$  et celle de la surface initiale  $a$ .

$$X = \frac{1}{2} (a^* - a) \quad (1)$$

L'opérateur de déformation s'écrit en fonction du gradient de déplacement

### 3. LES DONNEES D'ENTREE DU PROBLEME

#### 3.1. Hydrocarbures et barrage

##### 3.1.1. Choix des hydrocarbures à simuler

Les hydrocarbures rencontrés à l'occasion d'une pollution marine peuvent être de natures très diverses, induisant des comportements différenciés. Afin que les résultats Du projet SIMBAR puissent être à même de couvrir un champ suffisamment large, il a été décidé de modéliser trois types d'hydrocarbures :

- un hydrocarbure léger, de faible viscosité

$$X = \frac{1}{2} ( \nabla U + {}^t\nabla U + {}^t\nabla U \cdot \nabla U ) \quad (2)$$

L'équation d'équilibre des membranes est non linéaire. La résolution de cette équation utilise la méthode de Newton-Raphson.

Le comportement du matériau d'un barrage est considéré linéaire et élastique (loi de Hooke). Une membrane est dépourvue de rigidité à la flexion. Le déplacement d'une structure souple comme un barrage peut être de plusieurs mètres.

Les chapitres suivants de l'article vont aborder les points suivants. La modélisation mécanique complète du barrage intègre:

- les informations issues du CEDRE (les données dimensionnelles d'un barrage de référence, les propriétés des hydrocarbures) et du CETMEF (les données du plan d'installation du barrage dans l'environnement de l'Elorn)
- des résultats d'essais en bassin à l'échelle 1/15ème menés par l'Université de La Rochelle
- la modélisation numérique réalisée par le LHNE-EDF R&D de Chatou (la méthode SPH, Smoothed Particles Method, appliquée à l'écoulement eau et hydrocarbure).

Le calcul de structure d'un barrage commence par un modèle numérique d'un barrage de 30 m de long. Le modèle est prolongé à un barrage de 150 m. Un modèle de barrage complet multi-tronçons est obtenu par duplication. Ce modèle est utilisé pour le calcul du barrage de l'Elorn. ■

- un hydrocarbure lourd, de forte viscosité
- une émulsion visqueuse non newtonienne.

##### 3.1.2. Définition des paramètres dimensionnels des barrages

La définition des caractéristiques dimensionnelles à prendre en compte pour le barrage à simuler s'est appuyée sur la préoccupation de ce que les situations modélisées au sein du projet SIMBAR correspondent au mieux, à échelle réelle, à des situations de pollutions potentielles. Dans cette optique, le choix s'est porté sur un barrage gonflable lourd de caractéristiques proches des barrages de type SILLINGER TRS55, ou TMB

INF 600, qui semblaient bien correspondre aux utilisations de barrages visées par l'étude.

En conséquence, les caractéristiques définies pour le barrage de référence du projet SIMBAR, ont été les suivantes :

- Type de barrage : gonflable à jupe souple
- Diamètre du boudin : 55 cm
- Profondeur de la jupe : 75 cm
- Masse linéaire du barrage: 13 kg / m
- Charge de rupture de la chaîne : 32000 daN
- Diamètre d'équivalent acier de la chaîne : 18 mm
- Longueur d'un élément de barrage : 10 à 20 m
- Longueur d'un tronçon de barrage : 100 à 200 m

La difficulté d'un essai hydrodynamique en bassin provient du choix du changement de dimension. Un modèle numérique à échelle 1 vient corrélés nos résultats expérimentaux. Le modèle numérique est décrit dans le prochain chapitre.

### 3.2. Modélisation numérique de l'écoulement eau et hydrocarbure autour du barrage

Le but de l'étude menée par le LNHE est d'étudier le comportement du barrage de référence et des trois types d'hydrocarbures ainsi que les mécanismes de fuite et l'estimation des débits de fuite :

- Pour différents hydrocarbures (lourd, léger, émulsion),
- Pour différentes vitesses de courant  $V$ ,

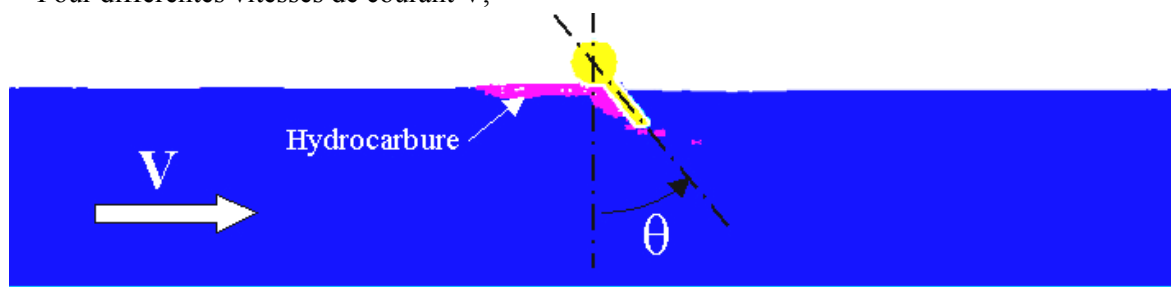


Figure 3 : paramètres du canal à courant (16 mètres de long, hauteur d'eau de 2,5 mètres).

La méthode calcul a été calée sur des écoulements tests qui ne sont pas présentés ici.

- Pour différentes hauteurs  $H$  et périodes  $T$  de vagues.

Le moyen utilisé pour atteindre cet objectif est la construction d'un canal à courant et d'un canal à houle. Ces canaux sont numériques. Le problème comprend une section de boudin flottant équipé d'une jupe. Ce travail a été réalisé avec le logiciel Spartacus-2d (système Telemac). Il est basé sur la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) qui est décrite dans les références sur l'hydrodynamique des barrages [4]-[7]. Nous utilisons pour le barrage flottant la notion de solide mobile dont le mouvement n'est pas prescrit par l'utilisateur mais résulte des efforts exercés sur lui par l'eau.

Comme le modèle numérique proposé est 2D et que la structure réelle est typiquement 3D (la déformation du barrage, l'inclinaison de la jupe ne sont pas les mêmes dans une zone proche des ancrages ou une zone loin de ceux-ci), nous considérons des « coupes » 2D verticales du barrage et nous considérons que l'angle vertical de jupe  $\theta$  est un paramètre choisi. Deux cas de calcul sont présentés. Le premier cas correspond à un barrage en présence d'un courant marin uniforme. Le deuxième cas modélise l'écoulement en présence d'une houle.

Les variables principales du problème sont  $V$  la vitesse du courant marin et  $\theta$  l'angle vertical de la jupe. La figure 3 nous montre un cas de calcul où le mode de fuite est le « sous tirage ». L'angle  $\theta$  vaut ici la valeur de  $40^\circ$ .

### 3.3. Synthèse des résultats « courant seul »

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant. On distingue trois types de fuites possibles : entraînement, débordement et submergement.

Les résultats obtenus pour le canal à courant sont présentés dans le tableau 1. Les

résultats obtenus dans le canal à houle ne sont pas présentés ici.

Hydrocarbure\ courant	Angle de jupe $\theta$	V = 0,3 m/s	V = 0,7 m/s
Léger	-10°	Pas de fuite	Pas de fuite
	10°	Pas de fuite	entraînement
	40°	Pas de fuite	débordement
Lourd	-10°	entraînement puis débordement	débordement
	10°	entraînement puis débordement	débordement
	40°	entraînement et débordement	débordement
Emulsion	-10°	Pas de fuite	débordement
	10°	Pas de fuite	débordement

Tableau 1. Mode de fuite suivant la valeur du courant V et de l'angle de jupe  $\theta$

Les essais expérimentaux ont portés sur le cas du courant marin seul. Les essais font l'objet du prochain chapitre.

### 3.4. Essais expérimentaux des efforts hydrodynamiques sur les barrages

Les expérimentations et les visualisations des écoulements étudiés sont réalisées dans le canal hydrodynamique du LEPTAB à l'Université de La Rochelle. Ce bassin hydrodynamique de 20 m de longueur est équipé d'un chariot motorisé qui permet de faire évoluer, progressivement, la vitesse du courant marin.

Des maquettes sont réalisées à l'échelle 1/15 (échelle de Froude). Notre gamme de vitesses expérimentales est comprise entre 0,08 et 0,2 m/s. Les maquettes font 37 mm de diamètre de flotteur, et 51 mm de hauteur de jupe.

Les essais en bassin ont portés sur deux types de mesures. La première série d'essais a servi à mesurer les efforts hydrodynamiques sur le barrage. La deuxième série d'essais a permis de visualiser l'écoulement de l'eau et de l'hydrocarbure autour du barrage.

Des jauges de contrainte sont utilisées pour mesurer les efforts. La balance

## 4. ANALYSE STRUCTURALE D'UN BARRAGE PAR ELEMENTS-FINIS

Les références [8]-[13] présentent des travaux sur la modélisation structurale des barrages.

hydrodynamique possède deux bras et trois ponts d'extensométrie. Nous mesurons les  $C_x$ ,  $C_y$  et  $C_m$  du barrage en fonction des paramètres de l'écoulement. Les résultats obtenus sur la balance hydrodynamique sont présentés dans le tableau n°2. Le coefficient  $C_x$  est le coefficient de traînée horizontale, le coefficient  $C_m$  est le coefficient de moment autour du centre du flotteur et le coefficient  $C_y$  est le coefficient de portance verticale.

$\theta - 10^\circ : C_x = 1.5 \quad C_m = 1.498 \quad C_y = -0.84$
$\theta 10^\circ : C_x = 1.64 \quad C_m = 1.635 \quad C_y = 0.92$
$\theta 40^\circ : C_x = 1.061 \quad C_m = 1.058 \quad C_y = 0.593$

Tableau 2. Les coefficients d'efforts hydrodynamiques sur un barrage

Le coefficient de traînée suivant l'axe du courant  $C_x$  a été utilisé dans les calculs de structure du barrage.

Les modes de fuite du barrage ont été cherchés en utilisant des visualisations d'écoulement. ■

### 4.1. Analyse d'un élément de barrage de 30 m

Un élément de barrage est modélisé avec un faible nombre d'éléments-finis. Cela permet de limiter au mieux le nombre d'éléments-finis lorsque nous dupliquerons ce modèle pour construire un barrage complet. Sur la figure 4



nous observons en partie basse, la jupe. Celle-ci est « pincée » aux deux extrémités pour favoriser le mouvement de torsion de la chaîne

sur elle-même. Ce mouvement s'apparente aux mouvements de torsion entre les maillons d'une chaîne tendue.

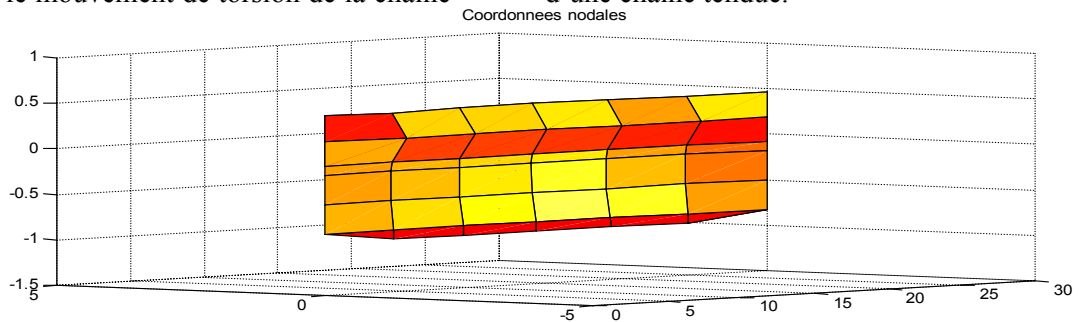


Figure 4: Visualisation du modèle éléments-finis d'un élément de barrage de 30 m.

De part de d'autre de l'élément de barrage nous appliquons des conditions aux limites de Dirichlet. Ce type de condition simule un appui simple des extrémités de l'élément de barrage. Une opération d'homothétie suivant l'axe du barrage permet de construire un modèle « élément-fini » pour un barrage plus long.

variation de la pression de gonflage du flotteur. La pression de gonflage du flotteur influe sur sa rigidité en flexion. Une pression plus importante conduit à un flotteur plus raide. Le tableau 3 présente l'influence de la pression de gonflage sur la tension de la chaîne en bas de la jupe, et l'angle vertical de la jupe.

Parmi les nombreuses analyses de paramètres de conception de barrage nous présentons la

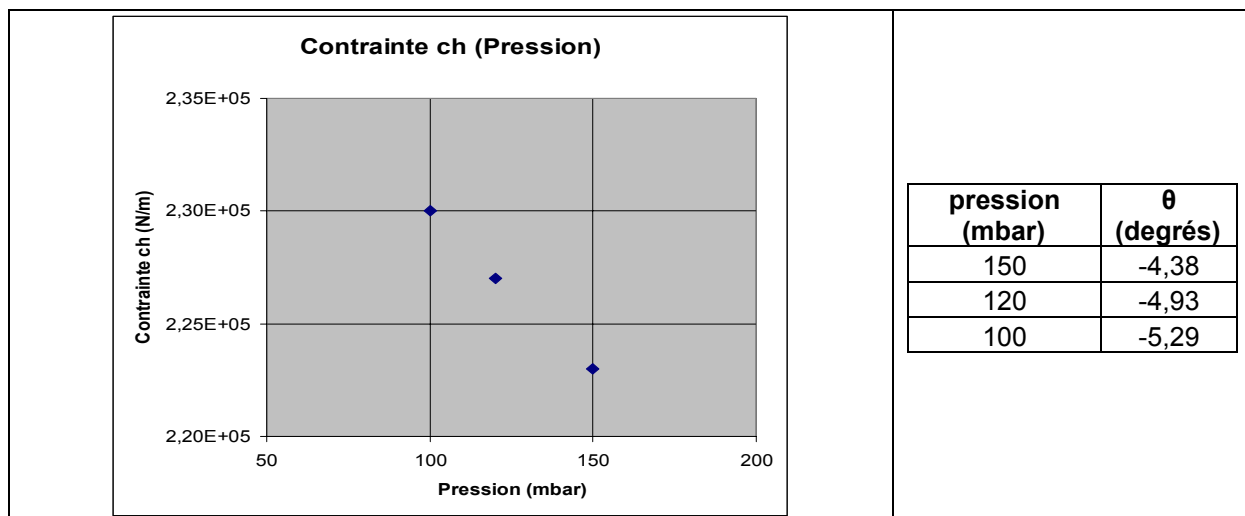


Tableau 3. La variation de la pression dans le flotteur

L'angle  $\theta$  diminue lorsque la pression augmente. Le tableau 4 présente les résultats numériques de l'influence de la pression de gonflage.

redresse le barrage. Nous notons un déplacement horizontal plus grand avec un petit diamètre de flotteur. La chaîne est plus sollicitée avec un petit diamètre, au contraire de la sangle qui est moins sollicitée.

*Remarque :* Un diamètre plus important du flotteur augmente aussi sa rigidité. Comme dans le cas de la pression, cette rigidité

Pression (mbar)	Angulation $\theta$ (°)	Déplacement vertical haut jupe (cm)	Déplacement horizontal haut jupe (cm)	Contrainte chaîne $10^5$ N/m	Contrainte sangle N/m
100	-5,29	-0.8	25.8	2.30	668
120	-4,93	-0.7	25.2	2.27	676
150	-4,38	-0.7	24.3	2.23	676

Tableau 4. L'angle  $\theta$ , déplacements, contraintes, en fonction de la pression de gonflage

Une pression de gonflage plus importante, conduit à une rigidité de flotteur plus importante. Cette rigidité supplémentaire du flotteur redresse le barrage. Lorsque la rigidité du flotteur augmente nous constatons une diminution des contraintes dans la chaîne.

Nous avons aussi effectué une variation du barrage avec un bas de jupe parabolique au lieu d'être rectiligne. Il y a eu 3 calculs avec des flèches de la parabole au centre de la jupe de : 0, 10, 20cm. La plus grande hauteur de la parabole est de 20cm. La jupe du barrage se redresse (de  $-4.36^\circ$  à  $-3.19^\circ$ ) lorsque l'on

#### 4.2. Analyse d'un tronçon de barrage de 150 m

Pour le calcul d'un barrage de longueur L nous considérons une homothétie suivant l'axe du barrage. La topologie des maillages de 30 m ou L mètres de long est identique. Le coefficient d'homothétie  $k_{L\text{tron}}$  est appliqué sur le vecteur des coordonnées X

$$X = X_{30} * k_{L\text{tron}} \quad (3)$$

augmente la flèche de la parabole. La carte des contraintes dans le barrage à jupe « parabolique » est originale. La contrainte s'irradie des extrémités de la chaîne jusqu'à diminuer fortement au milieu du barrage. Une jupe avec une forme parabolique (« concave ») permet de diminuer la tension de la chaîne au profit du bas de la jupe, au centre du barrage. Cette diminution de tension de la chaîne redresse le barrage. ■

Nous considérons un tronçon de barrage de 150 m, et une vitesse de courant perpendiculaire au barrage  $V = 0.3$  m/s. La figure 5 montre une géométrie des sections (barrage sans chaîne) avec une angulation de la jupe de  $+4^\circ$  au centre du barrage.

La visualisation des contraintes, sur la figure 6, montre que les contraintes dans le flotteur sont plus fortes côté aval, que côté amont. Cet effet est dû à la flexion du flotteur dans le plan de l'eau.

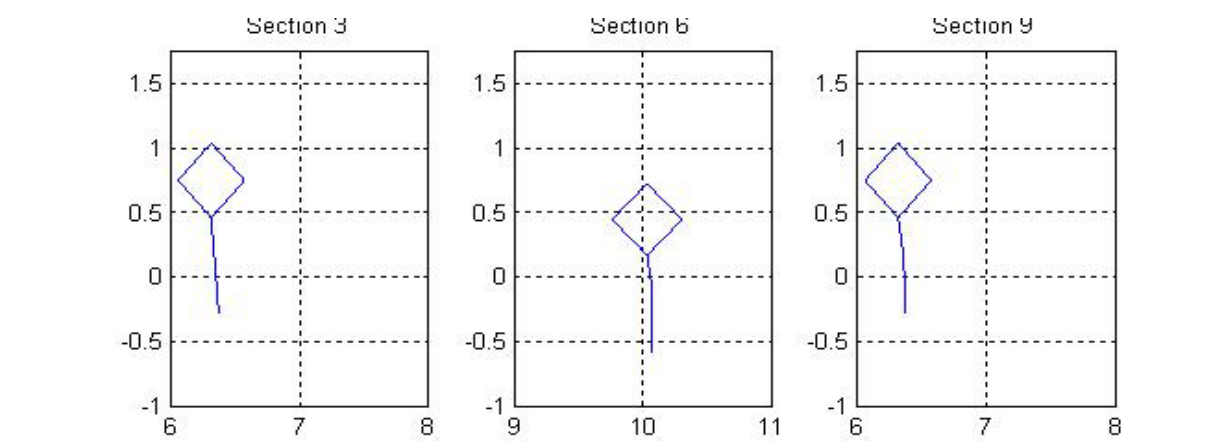


Figure 5: Visualisation de section d'un tronçon de barrage de 150 m.

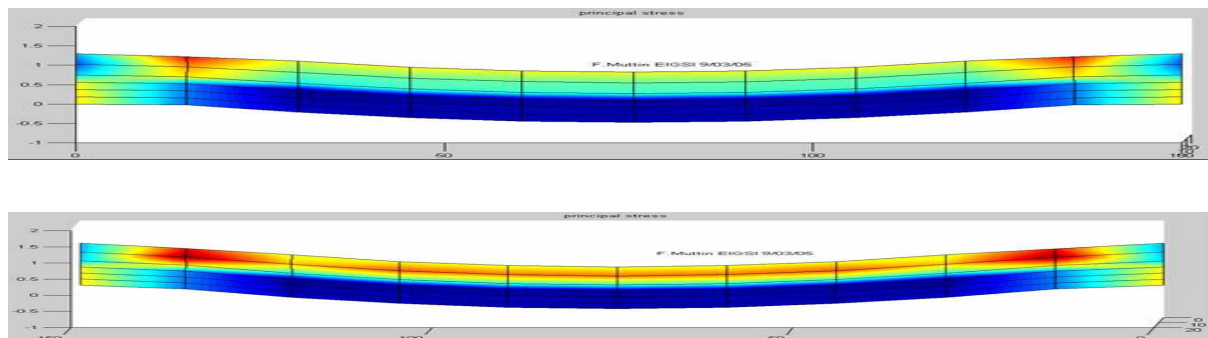


Figure 6: Contraintes mécaniques dans un tronçon de barrage de 150 m (côté amont : en haut, côté aval : en bas).

Par multiplication d'un tronçon de barrage, nous construisons un barrage complet. L'opération de multiplication des tronçons utilise une série de duplication et de translation d'un tronçon de barrage de longueur quelconque.

Une suite de  $N_{btron}$  copies d'un même tronçon utilise une translation de 1, 2, ( $N_{btron}-1$ )

## 5. ANALYSE STRUCTURALE DU BARRAGE DE LA RIVIERE ELORN

Le calcul du barrage de l'Elorn nécessite au préalable la données du champ de courant au voisinage du barrage. Nous présentons maintenant le calcul du champ de courant et de hauteur d'eau autour du barrage.

### 5.1. Champ de courant à proximité du barrage de l'Elorn

Le cas d'application du projet a été choisi par le CETMEF et le CEDRE. Le site se trouve sur l'Elorn dans la Rade de Brest. La position du barrage relie les deux rives approximativement d'Ouest (Brest) en Est. Le barrage est constitué de 6 tronçons dont les positions sont fournies par les coordonnées des 7 points, extrémités de tronçon. Ces positions sont numérotées de 1 à 7 de la gauche (rive côté Brest) à la droite. La position du barrage et la position des coffres d'amarrage sont indiqués sur la figure 7.

Le modèle numérique de courant utilise le logiciel Telemac-2D. La mise en données du calcul couvre la Rade de Brest et l'estuaire de l'Elorn. Ce calcul a été effectué par le LNHE. L'étendue de la zone a demandé la digitalisation de trois cartes : 2 cartes marines SHOM (n° 7066 et n° 7400) plus 1 carte IGN pour l'Elorn.

longueurs de tronçon. Toutes les copies ont une table de connectivité dont les numéros sont adaptés au bon repérage des différents points du maillage.

Cette opération de multiplication est appliquée au barrage de l'Elorn, qui compte 6 tronçons.■

Dans ce calcul de structure d'un cas réel, nous utilisons le champ de vitesse du courant au niveau du barrage, ainsi que la hauteur d'eau, pour le jour du 13 décembre 2005.

Les conditions aux limites des frontières liquides du modèle sont basées sur :

- La vitesse ou la hauteur (condition de Thomson) pour les frontières maritimes. Les valeurs de ces grandeurs sont issues du modèle de prédiction des harmoniques de marées du LNHE
- Les débits des rivières Elorn et Aulne,

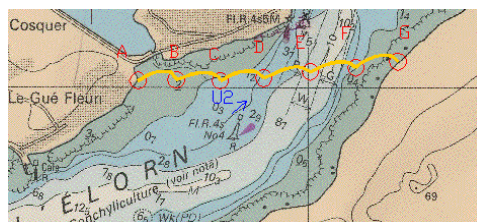


Figure 7. Barrage de l'Elorn

Les débits des rivières font parties des paramètres de calage du modèle car leurs valeurs ne sont pas connues pour le jour considéré.

Le calage du modèle consiste à faire varier un certain nombre de paramètres pour que les simulations concordent avec des mesures dans des cas bien précis.



Pour initialiser les écoulements, on débute la simulation numérique 24 heures avant (soit environ 2 marées avant).

### 5.2. Analyse par éléments-finis du barrage de l'Elorn

Le barrage de l'Elorn est composé de 6 tronçons de 171.2 m de long. Le barrage est calculé à plusieurs instants d'une même journée. La journée considérée est le 13 décembre 2005. La durée d'une marée étant d'un peu plus de douze heures, nous avons

décidé de choisir 6 instants, toutes les deux heures pour réaliser des simulations représentatives du cycle de la marée. Nous montrons ci-dessous le calcul où la marée descendante est la plus forte. Le barrage a la forme suivante 3h 52 mn après la pleine mer. La convention de signe pour l'angle  $\theta$  est prise pour la marée montante. Pour l'interprétation hydrodynamique l'angle  $\theta$  doit être changé de signe dans le tableau 5.

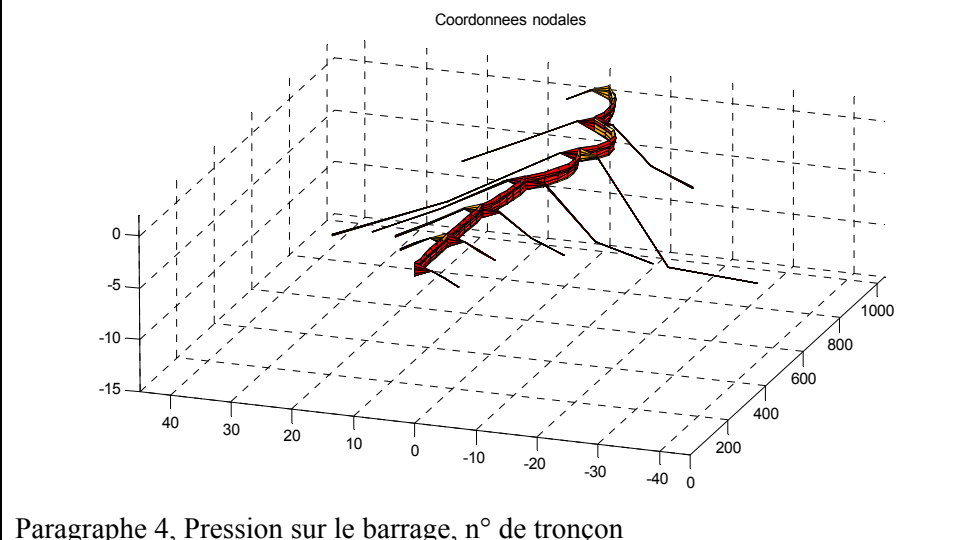
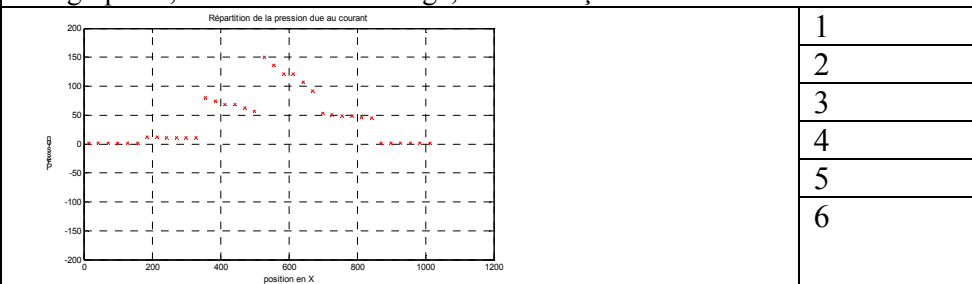
	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)																		
<p>Paragraphe 4, Pression sur le barrage, n° de tronçon</p> 	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>-0.0679</td><td>6.89e+04</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.256</td><td>6.9e+04</td></tr> <tr><td>3</td><td>1.87</td><td>6.9e+04</td></tr> <tr><td>4</td><td>10.4</td><td>6.88e+04</td></tr> <tr><td>5</td><td>15.4</td><td>6.85e+04</td></tr> <tr><td>6</td><td>7.92</td><td>6.89e+04</td></tr> </table>	1	-0.0679	6.89e+04	2	0.256	6.9e+04	3	1.87	6.9e+04	4	10.4	6.88e+04	5	15.4	6.85e+04	6	7.92	6.89e+04	
1	-0.0679	6.89e+04																		
2	0.256	6.9e+04																		
3	1.87	6.9e+04																		
4	10.4	6.88e+04																		
5	15.4	6.85e+04																		
6	7.92	6.89e+04																		

Tableau 5. Le barrage de l'Elorn par marée descendante 3h 52 mn après la pleine mer

La répartition de pression sur la jupe du barrage tient compte de la forme en plan courbe du tronçon de barrage. Il y a une dissymétrie droite/gauche de la pression sur le tronçon. Les pressions sont calculées en tenant en compte de la vitesse normale au barrage et de son sens.

La convergence du calcul prend 380 itérations environ. Le temps CPU est de 435 mn.

Le courant marin peut monter ou descendre pendant la journée. Un double système d'amarrage permet de maintenir le barrage. Pour construire ce double système d'amarrage

nous avons effectué une symétrie sur une des deux lignes d'amarre situées entre deux tronçons adjacents.

### 5.3. Récapitulatif inclinaison de la jupe et tension de la chaîne au milieu des tronçons

Le tableau n°6 récapitule l'angle de jupe au centre des 6 tronçons du barrage, et la tension de la chaîne sur chaque tronçon. Les 6 calculs suivent toutes les 2 heures, la marée du matin du 13 décembre 2005.

Paragraphe 2, n° de tronçon 8 mn avant la pleine mer	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)
1	-0.0374	3.68e+004
2	-0.0175	3.68e+004
3	-1.11	3.68e+004
4	-4.38	3.7e+004
5	-6.43	3.67e+004
6	-3.78	3.68e+004

Paragraphe 3, n° de tronçon 1 h 52 mn après la pleine mer	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)
1	0.0487	3.21e+004
2	0.376	3.22e+004
3	1.47	3.21e+004
4	3.61	3.21e+004
5	4.79	3.23e+004
6	3.43	3.2e+004

Paragraphe 4, n° de tronçon 3h 52 mn après la pleine mer	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)
1	-0.0679	6.89e+004
2	0.256	6.9e+004
3	1.87	6.9e+004
4	10.4	6.88e+004
5	15.4	6.85e+004
6	7.92	6.89e+004

Paragraphe 5, n° de tronçon 5h52 mn après la pleine mer	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)
1	0.0741	3.95e+004
2	-0.0481	3.95e+004
3	0.5	3.95e+004
4	4.08	3.95e+004
5	8.04	3.93e+004
6	1.2	3.95e+004

Paragraphe 6, n° de tronçon 7h 52 mn après la pleine mer	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)
1	-0.00389	3.44e+003
2	-0.0162	3.45e+003
3	-0.00795	3.45e+003
4	0.0311	3.44e+003
5	-0.0592	3.43e+003
6	0.00161	3.44e+003

Paragraphe 7, n° de tronçon 9 h 52 mn après la pleine mer	Téta au milieu (°)	Tension chaîne au milieu (N)
1	-0.0576	5.33e+004
2	-0.115	5.34e+004
3	-2.01	5.33e+004
4	-7.68	5.33e+004
5	-10.9	5.31e+004
6	-7.58	5.33e+004

Tableau 6. Angle de jupe et tension de chaîne au centre des tronçons au fil d'une marée

#### 5.4. Interprétation

Par marée montante, l'angle de jupe maximal calculé est de  $10.9^\circ$  sur le tronçon n°5. Il s'agit du calcul à 9 h 52 mn après la pleine mer. Le module de la vitesse du courant maximale atteint 0.4 m/s au coffre 5, avec un angle de  $54.3^\circ$  avec la normale au barrage. D'après les calculs hydrodynamiques eau et hydrocarbure du tableau 1 paragraphe 3.3, en cas de polluant

de type «pétrole lourd», une vitesse  $V=0.3$  m/s, et un angle  $\theta$  de  $-10^\circ$ , il est possible que des **fuites** par entraînement puis débordement apparaissent. En effet les composantes de la vitesse du courant sont de (0.25, 0.3) m/s au coffre 5. En cas de polluant de type "pétrole léger" le barrage considéré assurerait le **confinement**.

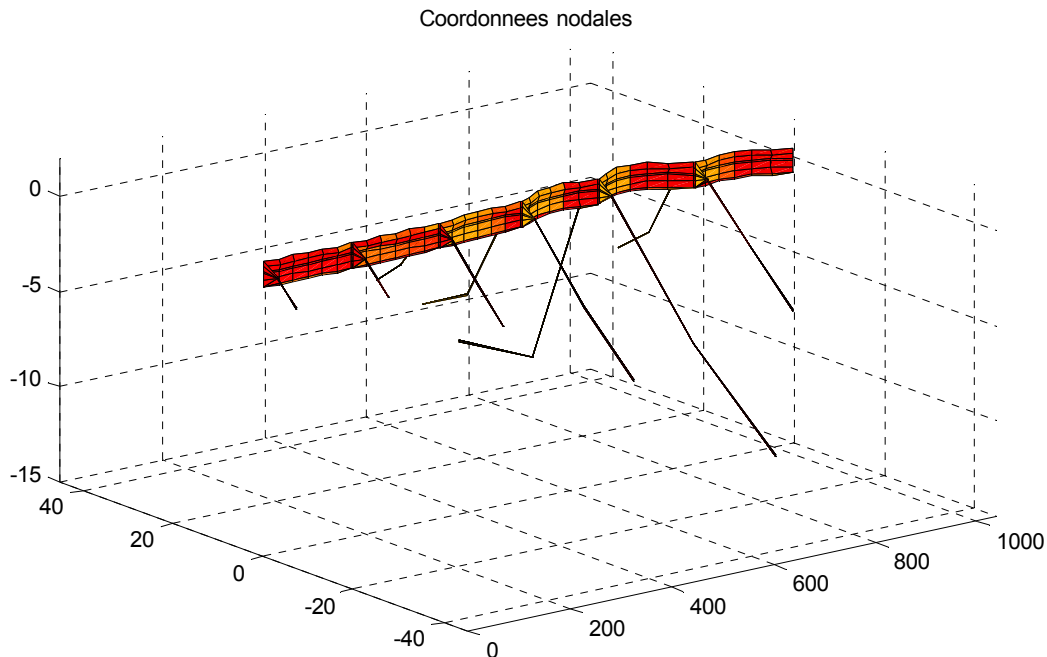


Figure 8. Le barrage « 9 h 52 mn après pleine mer » au plus fort de la marée montante

La forme prise par le barrage « 9 h 52 mn après la pleine mer » est indiquée sur la figure 8. Sur le tronçon n°5, il pourrait y avoir fuite ici en présence pétrole lourd. Le barrage arrêterait du pétrole léger.

L'angle de jupe maximal est obtenu à la **marée descendante**. Il est observé sur le 5ème tronçon lors du calcul à 3h 52 mn après la pleine mer. Sa valeur est de  $15.4^\circ$  (voir tableau 6). Le module de la vitesse du courant est maximum à 0.48 m/s au coffre 4, avec un angle de  $51^\circ$  avec la normale au barrage. Si le polluant est du côté amont du barrage (moins envisageable que du côté aval), il est vraisemblable que le barrage ait des fuites, en présence de pétrole lourd. En effet, d'après le tableau 1 paragraphe 3, dans le cas d'un pétrole lourd, d'un angle de jupe de  $10^\circ$  et d'une vitesse normale de 0.3 m/s, il y a fuite par entraînement puis débordement. Or ici, les composantes de la vitesse maximales sont (-0.35,-0.33) m/s. Pour un pétrole léger, pour ce

même cas de courant, le barrage assurerait le confinement. En effet, pour une vitesse de 0.3 m/s et un angle de  $10^\circ$  à  $40^\circ$ , le tableau 1 indique "pas de fuite". De même, dans les essais en bassin, à échelle 1/15ème, avec une petite vitesse et un angle de jupe de  $10^\circ$ , aucune fuite n'est observée.

Les valeurs des contraintes dans la **chaîne** exprimées semblent approximativement constantes tout le long du barrage pour une heure de marée donnée. Nous trouvons une tension voisine de 6,9 tonnes, par marée descendante, à 3h 52 mn après la pleine mer, et une tension voisine de 5,3 tonnes, par marée montante, à 9 h 52 mn après la pleine mer. La reprise de la tension de la chaîne à terre varie de 30% entre le maximum de la marée montante et le maximum de la marée descendante.

La force maximale de ripage des **corps-morts** ou des ancrs sur le fond correspond à la marée

descendante au calcul, à 3h 52 mn après la pleine mer. Ses composantes sont (10340, 1463) N au corps-mort n°10. A marée montante, la force de traction maximale sur les corps-morts a pour composante (8199, 1006) N, au calcul à 9 h 52 mn après la pleine mer, au corps-mort n°11. A marée montante la force est donc moins importante qu'à marée descendante. Le coefficient de sécurité de la masse du corps mort dépend de sa masse (6 tonnes) de la traction horizontale maximale (1,034 tonne), de son volume et du coefficient de frottement du corps mort sur le fond.

La plus grande force d'enfoncement des **coffres de flottabilité** est obtenue par marée descendante, à 3h 52 mn après la pleine mer. Sa valeur est de 5685 N au coffre n°8. Le coefficient de sécurité sur l'enfoncement d'un coffre de 2m<sup>3</sup> est donc de 2000/568=3.52. La force d'enfoncement maximal par marée montante (à 9 h 52 mn après la pleine mer) est de 4511 N au coffre n°9.

*Remarque* : Le courant V maximal à marée montante a lieu une demi heure après l'instant considéré au calcul « 9 h 52 mn après la pleine mer ». Cela se situe au coffre n°5, et l'augmentation n'est que d'environ un centième de m/s. Les résultats obtenus à ce calcul « 9 h 52 mn après la pleine mer » sont significatifs du courant maximum par marée montante le matin du 13 décembre 2005.

*Remarque* : Une confirmation de **l'ordre de grandeur** du résultat sur la tension de chaîne a été fait sur le tronçon n°5 du calcul « 9 h 52 mn après la pleine mer ». Pour cela nous utilisons une triangulation de la force de tension du barrage, et de la poussée hydrodynamique.

Les vitesses du courant au voisinage du barrage de l'Elorn des calculs « 3h 52 mn après la pleine mer » et « 9 h 52 mn après la pleine mer » sont indiqués sur le tableau 7.

Instant	T(s) à partir de 0h du matin	N° Coffre	Hauteur d'eau (m)	U (m/s)	V (m/s)	Module Vitesse (m/s)	Angle Vitesse/ Normale Barrage α (°)
3h 52 mn après la pleine mer « § 4 » Calcul n°3	108000 s	1	0,068019	-0,007768	-0,002585	0,00818682	75,2
		2	1,637365	-0,090021	-0,076745	0,11829444	53,2
		3	3,631409	-0,248568	-0,151931	0,29132298	62,2
		4	6,674396	-0,353963	-0,325165	0,48064757	51,0
		5	10,631531	-0,264004	-0,387776	0,46911442	37,9
		6	5,342501	-0,092468	-0,191231	0,21241381	29,4
		7	0,076969	-0,001335	0,001329	0,00188374	138,5
9h 52 mn après la pleine mer « § 7 » Calcul n°6	129600 s	1	0,10906	0,050843	0,00368	0,050976	89,5
		2	1,737738	0,139751	0,038244	0,14488943	78,3
		3	3,728989	0,238075	0,11705	0,26529306	67,4
		4	6,769756	0,308818	0,253056	0,39925668	54,3
		5	10,717773	0,254295	0,298543	0,39216562	44,0
		6	5,436062	0,126144	0,208152	0,24339179	34,8
		7	0,112363	-0,042313	0,041	0,0589185	137,7

Tableau 7. Hauteurs d'eau et vitesses du courant sur le barrage de l'Elorn 3h 52 mn et 9h 52 mn après la pleine mer

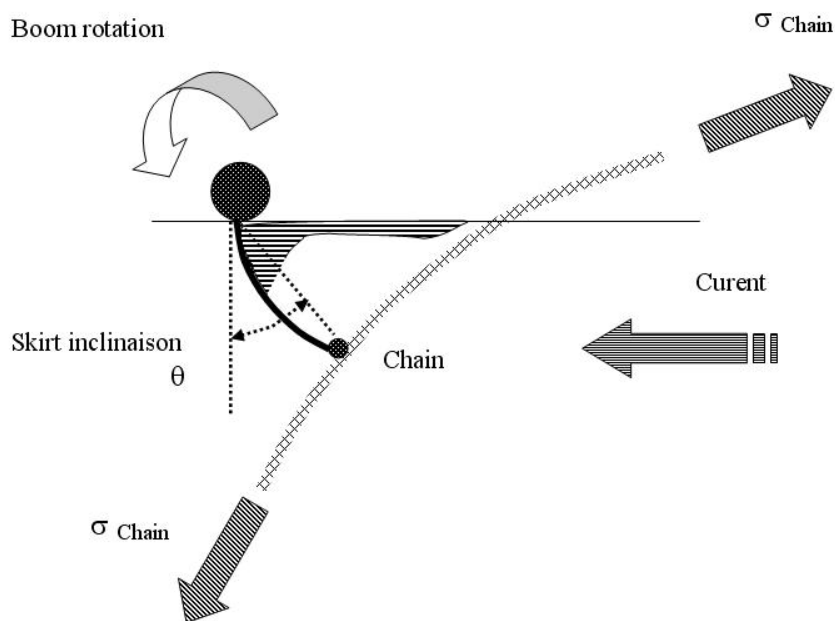


Figure 9: Rotation de l'ensemble flotteur+jupe autour de la chaîne tendue

L'explication phénoménologique de la mécanique d'un élément de barrage est montrée sur la figure 9. Le principal effet est la rotation de l'ensemble jupe+flotteur autour de la chaîne tendue. ■

## 6. CONCLUSION

La corrélation entre les essais expérimentaux en bassin et les calculs numériques d'écoulement nous a permis de nous affranchir des difficultés intrinsèques des deux approches.

La construction d'un modèle à faible nombre d'éléments-finis « membrane » nous a permis de construire un modèle éléments-finis pour un barrage de grande longueur comme celui de l'Elorn.

Les calculs de structure utilisent les coefficients d'effort hydrodynamique mesurés en bassin. Le calcul par éléments-finis fournit la forme du barrage et l'inclinaison de la jupe. Les calculs hydrodynamiques par la méthode SPH nous disent si le barrage confine le polluant.

A la construction du projet SIMBAR, nous avons défini la fonction binaire  $f_{pol}$ . Elle décrit l'efficacité d'un barrage donné.  $f_{pol} = 0$  indique un confinement du polluant,  $f_{pol} = 1$

indique une fuite. A l'issue du projet nous connaissons  $f_{pol}$  comme une fonction de la vitesse  $V$  du courant, de l'angle  $\theta$  pris par la jupe, et du type de polluant  $H$ . La fonction  $f_{pol}$  est définie par :

$$f_{pol}(V, \theta, H) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 1, mode \end{array} \right\} \quad (4)$$

Où le *mode* de fuite est d'un type connu, l'entraînement ou le débordement.

Pour préciser la notion de coefficient de sécurité, nous mentionnons qu'il existe deux types de limite sur le matériel anti-pollution. Le matériel doit être conçu et installé pour pouvoir être utilisé jusqu'aux conditions extrêmes du lieu. Le non endommagement du matériel et la réutilisation de celui-ci sont imposés. Pour ce type de limite, une notion classique de coefficient de sécurité peut s'appliquer (coefficient sur les efforts appliqués, par exemple).

En deuxième lieu, le matériel possède une limite d'efficacité, dépendant du lieu, et des conditions d'utilisation. Il existe une condition de forçage à partir de laquelle des fuites d'hydrocarbure seront constatées. Cette limite d'efficacité, peut être connue par la modélisation.



## 7. REFERENCES

- [1] J.T. Oden, T. Sato, Finite strains and displacements of elastic membranes by the finite element method, *Int. J. Solids Struct*, 1967
- [2] E Haug, G. H. Powell, Finite element analysis of non linear membrane structures, IASS Pacific Symposium Part II on tension Structures and Space Frames, Tokyo and Kyoto. Paper N° 2-3, Architectural Institute of Japan. 1972
- [3] B. D'Uston de Villeregran, Conception et analyse mécanique de structures textiles tendues, Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 1987
- [4] Buvat C., Violeau D., 2006, Lagrangian numerical modelling of boom and oil spill motion for the management of coastal pollution risk, *proc. VIth Hydroinformatics conf. (AIRH)*, Nice 2006.
- [5] Violeau D. et Issa R., 2004, *Modelling turbulent free surface flows with Smoothed Particle Hydrodynamics*, Bulletin Ercoftac (European Research community on Flow, Turbulence And Combustion) n° 62, Sept. 2004, pp. 47-54.
- [6] D. Violeau, et R. Issa R, *Guide utilisateur du logiciel SPARTACUS-2D VIP1 : calcul lagrangien d'écoulements bidimensionnels laminaires et turbulents par la méthode SPH*, rapport EDF/LNHE n° HP-75/04/046/A, 2006
- [7] F. Fang, et A.J. Johnston, Oil Containment by Boom in Waves and Wind. I: Numerical Model, *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, **127(4)**, pp. 222-227, 2001.
- [8] S.S. Badesha, J. Hunt, et E. Wenck, Structural Analysis of Oil Containment Booms, *Proc. International Oil Spill Conference IOSC 2005*, Index by year & title pp. 199, International Oil spill conference 1993.
- [9] D. Fauvre, Evaluation and limits of protecting boom plans for high tidal range and strong current areas, *Proc. International Oil Spill Conference IOSC 2005*, Index by year & title pp. 214, International Oil spill conference 1995.
- [10] A. Amini, M. Mahzari, E. Bollaert et A. Schleiss, Fluid-structure interaction analysis applied to oil containment booms, *Proc. International Oil Spill Conference IOSC 2005*, Index by year & title pp. 405, International Oil spill conference 2005.
- [11] M. Darras, *Mise en œuvre des barrages antihydrocarbures, exemple d'application du programme Forbar : l'estuaire de l'Orne*, Industrial report, Laboratoire National d'Hydraulique, EDF n°HE/42.84.26, september 1984
- [12] F. Muttin et S. Nouchi, Numerical Study of Oil Spill Containment Boom by the Finite-Element Method, *Proc. Water Pollution 2006*, 245-254, *Eighth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Water Pollution*, Bologne, Italy 4 - 6 September 2006
- [13] F. Muttin, Présentation du programme de recherche national SIMBAR Modélisation des barrages antihydrocarbure, *Proc. Colloque Société Hydraulique de France « Qualité des eaux marines »*, Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, 22-23 Janvier 2007, La Houille Blanche, à paraître, 2007

## REMERCIEMENTS

Cette recherche est financée par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), convention de recherche n° CV 13 2003, Accord n°CV 03000142, notifiée le 15/03/2004.

Le projet Simbar est labellisé depuis 2003 par le RRIT (Réseau de Recherche et d'Innovations Technologiques) RITMER, "Pollutions Marines Accidentelles et leurs Conséquences Ecologiques", du Ministère de la Recherche.