



**HAL**  
open science

# Membranes, fluides et couplages, application aux pollutions marines

Frédéric Muttin

► **To cite this version:**

Frédéric Muttin. Membranes, fluides et couplages, application aux pollutions marines. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Université de Limoges, France, 2010. tel-02165885

**HAL Id: tel-02165885**

**<https://theses.hal.science/tel-02165885v1>**

Submitted on 26 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES ET INGÉNIERIE EN MATÉRIAUX,  
MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE ET AÉRONAUTIQUE

Faculté des Sciences et Techniques

Laboratoire XLIM – UMR CNRS n° 6172

## HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Mathématiques Appliquées et Applications des Mathématiques

# Membranes, fluides et couplages, application aux pollutions marines

présentée et soutenue publiquement le 15 octobre 2010 par

**Frédéric MUTTIN**

devant le jury composé de

### **Rapporteurs :**

Abdallah El Hamidi	Maître de conférence HDR à l'université de La Rochelle
Bernard Legube	Professeur à l'université de Poitiers
Daniel Priour	Ingénieur HDR à l'IFREMER de Brest

### **Examineurs :**

Rémi Abgrall	Professeur à l'université de Bordeaux 1
Samir Adly	Professeur à l'université de Limoges
Nourredine Igbida	Professeur à l'université de Limoges
Michel Théra	Professeur à l'université de Limoges, Chargé du suivi



## Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à Michel Théra professeur à l'Université de Limoges.

Je remercie également Dominique Breuil, directeur de la recherche de l'EIGSI et de l'EIG-SICA, pour ses précieux conseils et ses encouragements constants.

Je remercie les membres du jury de l'honneur qu'ils me font, par leur présence, et de m'avoir consacré de leur temps.

Je remercie les rapporteurs, Abdallah El Hamidi, maître de conférence HDR à l'Université de La Rochelle, Bernard Legube, professeur à l'Université de Poitiers, et Daniel Priour, ingénieur HDR à l'IFREMER de Brest.

Je remercie les examinateurs, Rémi Abgrall, professeur à l'Université de Bordeaux I, Samir Adly, professeur à l'Université de Limoges, et Nourredine Igbida, professeur à l'Université de Limoges.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance auprès de nombreuses personnes qui m'ont fait confiance, Jacques Morelli professeur à l'Université de Nice, thématique de la GIZC, Bernard Legube professeur à l'Université de Poitiers-thème de la chimie de l'eau, Jean-François Maître, professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, Carlos Brebbia directeur du Wessex Institute of Technology, et les professeurs : Denise Chenais, Heinrich Schoop, John Hinch, John Ockendon, et Philippe Trompette.

Je remercie l'Ecole des Mines de Paris et l'Ecole d'Ingénieurs EIGSI de La Rochelle, pour mes deux expériences de chercheur, puis d'enseignant-chercheur, pilotées par Michel Bellet et Jean-Loup Chenot, puis Claude Adés et Dominique Breuil.

Je remercie Jean-Claude Lahournère et Sylvain Orsat, directeurs généraux de l'EIGSI.

Je remercie l'Université de Limoges, l'école Doctorale "Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, énergétique et Aéronautique", et Armelle Vardelle. Je les remercie que ma soutenance ait lieu à l'EIGSI de La Rochelle.

Je remercie l'ANR, Agence Nationale de la Recherche, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable MEDD et le pôle de Compétitivité Mer Bretagne.

Je tiens à remercier les établissements partenaires, CETMEF, CEDRE, TOTAL, LNHE d'EDF, l'Université de La Rochelle, ainsi que Georges Peigné pour leur confiance dans les projets nationaux SIMBAR et BAR3D. Je remercie Jean Croquette de l'IFREMER-Brest, thématique des pollutions marines.

J'ai une pensée particulière de reconnaissance envers les établissements, entreprises, universités, partenaires des projets, collègues de l'EIGSI ou à Limoges, élèves-ingénieurs, doctorants, et à celles et ceux qui m'ont permis d'avancer dans mes recherches et ma démarche.



# Table des matières

<b>Synthèse des travaux de recherche</b>	<b>3</b>
1 Préambule . . . . .	3
2 Introduction . . . . .	3
3 Les activités de recherche depuis le doctorat . . . . .	4
3.1 Modèle de membrane élastique non-linéaire . . . . .	4
3.2 Membrane trouée ou plissée . . . . .	6
3.3 Elasticité $3D$ , viscoplasticité $2D$ et couplage . . . . .	6
3.4 Couplage entre écoulement compressible, membrane élastique et solides rigides . . . . .	8
3.5 Couplage entre écoulement incompressible à surface libre et membrane élastique . . . . .	9
3.6 Liste des articles et communications, distinctions . . . . .	11
4 L'obtention des contrats de recherche . . . . .	11
4.1 AIRBAG 96-99 . . . . .	12
4.2 SIMBAR 2002-2006 . . . . .	14
4.3 RAPACE 2005-2008 . . . . .	17
4.4 BAR3D 2006-2009 . . . . .	19
4.5 WATERBALLOON 2003-2006 . . . . .	22
4.6 Liste des brevets, workshops et contrats de recherche obtenus ou déposés . . . . .	24
5 Direction des étudiants de 2ème et 3ème cycle . . . . .	26
5.1 Etudiants de 2ème cycle, élèves-ingénieurs de l' <i>EIGSI</i> . . . . .	26
5.2 DRT . . . . .	27
5.3 Doctorants . . . . .	28
5.4 Encadrement PostDoc . . . . .	30
5.5 Liste de projets de R-D de 4ème et 5ème années et des étudiants de 3ème cycle encadrés . . . . .	30
6 Projets de recherche futurs . . . . .	32
6.1 Prolongement, exemples ETIER et PARABAR . . . . .	33

*Table des matières*

---

6.2	Diversification multidisciplinaire, exemple POLCLEAN . . . . .	34
6.3	Futur des travaux de recherche . . . . .	34
6.4	Liste de Projets futurs . . . . .	34
7	Conclusion . . . . .	34
<b>Bibliographie</b>		<b>37</b>
8	Chronologie . . . . .	38
<b>Compléments</b>		<b>39</b>
	Curriculum Vitae . . . . .	40
	Liste des publications . . . . .	50
<b>Exemplaires des publications</b>		<b>63</b>
	Structural analysis of oil-spill containment booms in coastal and estuary waters . . . .	64
	Oil Spill Boom Modeling, Numerical Approximation and Contingency Plan Optimization	71

# Synthèse des travaux de recherche

## 1 Préambule

Nos études doctorales en mathématiques étaient appliquées aux voiles de navire. La démarche était originale sur le plan industriel et scientifique. Un post-doctorat puis un poste de chercheur permanent nous ont ensuite conduit à produire nos premières publications. Notre fonction actuelle est enseignant-chercheur à l'Ecole d'Ingénieurs de La Rochelle. L'*EIGSI* est une école de statut privé, à pilotage public, par le Conseil-Général de La Charente-Maritime. La localisation de l'*EIGSI* à La Rochelle nous a permis de coordonner au niveau national des travaux de recherche technologique tournés vers les pollutions marines.

## 2 Introduction

Ce document de synthèse reprend les principes de construction donnés par l'extrait de la circulaire 92-336 du 16 novembre 1992 relative à l'HDR. En particulier des ouvrages et travaux publiés seront joints à la procédure HDR, en plus de cette synthèse.

Ce document est organisé autour de quatre sections.

La première détaille nos activités de recherche depuis le doctorat. Elles portent sur la théorie des membranes, la méthode des éléments-finis et la mécanique des fluides.

La deuxième section concerne l'obtention de contrats de recherche. Il y sera mentionné la conception et l'obtention de contrats, ainsi que la coordination et le déroulement des projets et recherches.

La troisième section décrit la direction d'étudiants de 2ème et 3ème cycles.

La quatrième section, présente les futurs projets de recherche.

Chaque section est rédigée de façon à faire apparaître les éléments d'appréciation sur la conception, la direction, l'animation, la coordination de nos activités de recherche et de valorisation.

En aide au jury, chaque fin de section est pourvue d'une liste spécifique. En fin de section 1 nous listons les articles publiés, et les distinctions reçues. En fin de section 2 nous listons les brevets, les workshops organisés, les contrats de recherche réalisés, ou en cours, en tant que coordinateur ou partenaire. En fin de section 3 nous listons les élèves-ingénieurs de l'*EIGSI* et leurs projets de R-D, les étudiants de 3ème cycle *DRT* et les étudiants doctorants de 3ème cycle encadrés avec les publications produites. En fin de section 4 nous listons les contrats de recherche envisagés, leurs contextes, les collaborations et les impacts attendus.

Nos études doctorales nous ont permis de nous fonder sur le plan scientifique sur la théorie des membranes non-linéaires et sur la méthode des éléments-finis. L'application de notre doctorat aux voiles de navire nous a appris à lier l'activité de recherche avec un débouché pratique.

Nos premiers postes de chercheur débutant, puis de chercheur permanent, nous ont donné de

l'expérience sur de nouveaux sujets. Ils demeurent en relation avec les éléments-finis, la mécanique des fluides et les surfaces libres. Il existe un travail sur la méthode multi-grilles, ainsi qu'un travail sur le flambement local des membranes par les contraintes dans les plis. Ces travaux correspondent à notre première série de publications.

Grâce à notre troisième poste en tant qu'enseignant-chercheur, nous avons tiré parti de notre environnement local pour concevoir des coordinations nationales. Cela nous a permis de coupler la théorie des membranes et la méthode des éléments-finis avec la mécanique des fluides. Ces recherches sont appliquées à de nouveaux secteurs industriels et technologiques. Elles sont appliquées depuis l'an 2000 au domaine des pollutions marines et des barrages flottants. Il s'agit d'un domaine où il existe peu de travail de recherche. Ces activités sont liées à l'environnement maritime local. Elles ont légitimé nos coordinations de plusieurs projets de recherche technologique. Elles nous ont dirigé vers une seconde série de publications et de communications.

### 3 Les activités de recherche depuis le doctorat

Cette section comprend cinq sous-sections. Les deux premières concernent les membranes à surfaces régulières puis irrégulières. La sous-section 3 concerne plusieurs thèmes, l'élasticité, les équations de Navier-Stokes, et montre un premier couplage entre-eux. Les deux dernières sous-sections présentent des couplages plus complexes encore. Ils sont basés sur des membranes, des fluides compressibles ou incompressibles, des écoulements à surfaces libres lisses ou non-lisses. La logique suivie est l'augmentation de la complexité dans les couplages structure-fluide présentés, et cela à partir des membranes, de l'élasticité et de la mécanique des fluides.

Les points communs entre les thèmes de recherche présentés sont les équations de l'élasticité, la méthode des éléments-finis et l'application au calcul de structure.

Nous adoptons les notations suivantes. Une membrane élastique est désignée par  $\omega$ . Il en est de même pour la surface libre d'un fluide, l'interface entre deux fluides. Dans ces deux cas, la tension de surface est définie par une constante physique, la tension de surface ou tension d'interface. Un domaine occupé par un fluide est désigné par  $\Omega$ . Le fluide peut être Newtonien ou non-Newtonien. Le domaine du fluide peut être  $2D$  ou  $3D$ . En présence de plusieurs domaines "fluide" en interaction, nous noterons les domaines  $\Omega_1, \Omega_2, \dots$ . Un domaine occupé par un solide élastique  $2D$  ou  $3D$ , autre qu'une membrane, est noté  $D$ . En présence de plusieurs domaines solides en interaction, nous noterons les domaines  $D_1, D_2, \dots$ . Un milieu curviligne est noté  $l$ . Le champ de vitesse dans un fluide est noté  $V$ , et sa pression est notée  $p$ . Le champ de déplacement d'une membrane est noté  $u$ . Le domaine occupé par une membrane après déplacement est noté  $\omega + u$ .

#### 3.1 Modèle de membrane élastique non-linéaire

Le modèle de membrane élastique non-linéaire en grands déplacements et petites déformations nous servira de base pour exposer l'ensemble de nos recherches depuis le doctorat.

Les expressions suivantes sont connues. Le plus souvent, elles sont écrites en formulation tensorielle, liée au système de coordonnées défini sur  $\omega$ . Nous utilisons une formulation intrinsèque, indépendante du système de coordonnées utilisé.

**Definition 0.3.1** *Soit une membrane  $\omega \in \mathbb{R}^3$  et  $u : \omega \rightarrow \mathbb{R}^3$  le déplacement de la membrane, nous définissons la fonctionnelle d'énergie totale  $e : U_{CA} \rightarrow \mathbb{R}$  dépendant du déplacement cinématiquement admissible (CA) de la surface  $\omega$  par*

$$e(u) = e_i(u) - e_e(u)$$

où la fonctionnelle d'énergie de déformation élastique  $e_i$  s'écrit

$$e_i(u) = \frac{1}{2} \int_{\omega} \text{tr}(\sigma(u)x(u))d\omega$$

où  $\text{tr}$  est l'opérateur trace,  $\sigma$  le tenseur des contraintes de Piola-Kirchhoff de seconde espèce, et  $x$  le tenseur de Green mesurant les déformation de la membrane.

L'énergie potentielle des efforts extérieurs est donnée par

$$e_e(u) = \int_{\omega+u} (-p\vec{n} \cdot \vec{u} + \vec{d} \cdot \vec{u}) d(\omega + u) - \int_{\omega+u} \rho g \vec{z} \cdot \vec{u} d(\omega + u)$$

où  $\vec{d}$  représente la friction tangentielle à la surface,  $p$  la pression normale à la surface,  $\vec{n}$  la normale extérieure à  $\omega + u$ ,  $\rho$  la densité surfacique de la membrane,  $g$  l'accélération de la gravité, et  $\vec{z}$  le vecteur indiquant la verticale de bas en haut.

L'énergie des efforts appliqués  $e_e$  peut être complétée d'efforts extérieurs supplémentaires, définis par une intégrale posée sur le domaine occupé initialement par la membrane.

La pression  $p$  peut provenir d'un fluide extérieur compressible ou incompressible (gaz, eau, hydrocarbure,...). Nous laissons de côté les changements de température de la membrane, les forces d'origine électrique ou magnétique.

L'intégrale définissant  $e_e$  est posée sur le domaine occupé par la membrane après déplacement. Cette intégrale dépend du déplacement  $u$ , qui est l'inconnue. La nature implicite du problème pose une difficulté essentielle pour un couplage structure-fluide.

La géométrie donnée par la structure et les efforts transmis par le fluide dépendent de l'inconnue  $u$ .

L'intégrale définissant  $e_i$  est posée sur le domaine initial de la membrane.

La densité surfacique  $\rho$  est la sommation locale de la densité du matériau, suivant l'épaisseur de la membrane. Cette sommation est considérée dans la configuration déformée de la membrane.

La proposition suivante donne l'équation d'équilibre d'une membrane par rapport à son déplacement.

**Proposition 0.3.2** *En négligeant les efforts d'inertie de la membrane, à un instant donné  $t$ , le déplacement  $u$  de la membrane est solution du problème suivant*

$$\text{Existe } -t - \text{il } u \in U_{CA} \text{ tel que } \frac{d e(u)}{du} \cdot v = 0 \quad \forall v \in U_{CA}$$

**Proof.** Nous utilisons le principe des travaux virtuels écrit en coordonnées Lagrangiennes, avec l'hypothèse d'une membrane en grands déplacements et petites déformations. Nous négligeons les effets d'inertie de la membrane. ■

La méthode des éléments-finis permet de déterminer une approximation du minimum de l'énergie mécanique totale  $e(u)$ .

Souvent, le calcul d'une structure souple utilise en plus d'un domaine de type membrane, des domaines adjacents curvilignes, de type câble (membrane de dimension 1), et de type poutre (coque mince de dimension 1). Il s'agit par exemple du sujet des voiles de navire et de leur gréement. La poursuite du thème de recherche de notre thèse sur les membranes et les voiles de navire nous a permis notre première publication [1] dans un journal international à comité de lecture, et notre premier chapitre dans un livre [2], coordonné par le professeur Philippe Trompette.

L'enrichissement de ce modèle va maintenant être décrit.

### 3.2 Membrane trouée ou plissée

Nous nous intéressons au cas où une membrane plane  $\omega \in \mathbb{R}^2$  a été perforée d'un trou, suite à un poinçonnage d'une portion de la membrane  $\delta$ .

$$\omega_p = \omega - \delta \in \mathbb{R}^2$$

Cette problématique est issue d'un problème de percolation, où l'opération de poinçonnage fait apparaître un réseau de  $N$  trous. La présence d'un trou induit une zone particulière de concentration de contraintes dans la membrane. Elle peut conduire à la formation de plis lorsque la membrane est constituée d'un matériau très mince, comme une feuille d'aluminium. La zone plissée de la membrane est notée  $W$ , pour "wrinkling zone".

**Definition 0.3.3** *La zone plissée d'une membrane est définie par*

$$W = \{ \text{Min} \lambda_\sigma \leq 0 \in \omega_p \}$$

où  $\lambda_\sigma$  désigne les valeurs propres du tenseur des contraintes  $\sigma$ .

Nous avons étudié la géométrie très particulière, de type "Croix de Malte", de la forme de la frontière  $\partial W$  de  $W$ . La frontière  $\partial W$  dépend de la forme du trou  $\delta$ , et des conditions aux limites sur le bord de  $\omega$ .

Cette recherche nous a conduit à notre deuxième publication dans *European Journal of Mechanics A/Solid* [3]. Elle a aussi été valorisée lors du projet *AIRBAG* qui sera exposé dans la section suivante.

Avec le modèle standard de membrane  $\omega \in \mathbb{R}^3$ , la partie plissée  $W$  d'une membrane présente une valeur propre négative ou nulle du tenseur des contraintes  $\sigma$ . Ce défaut a été résolu en modifiant le modèle standard. La définition du tenseur de Green  $x(u)$  a été modifiée afin qu'elle prenne en compte les plis. Nous avons conçu la généralisation suivante  $x^*(u)$  du tenseur de Green.

$$x(u) \longrightarrow x^*(u)(\alpha, \beta)$$

L'inconnue supplémentaire  $\alpha$  donne la direction locale du pli dans le plan tangent à la surface plissée de la membrane. L'inconnue supplémentaire  $\beta$  s'interprète comme l'amplitude locale du pli. Ces inconnues sont solutions d'un système d'équations, pour lequel les valeurs propres du tenseur des contraintes réactualisée sont positive ou nulle.

Les résultats de ce travail de recherche ont été utilisés dans la thématique des voiles de navire [4].

Ce travail a permis des échanges de points de vue avec le professeur Heinrich Schoop de l'Université de Berlin, sur les membranes plissées et les voiles de navire. Nous avons apprécié la coïncidence de nos travaux de recherche, qui portaient tous les deux du modèle de Rodemann. Il utilisait l'élément-fini à trois nœuds d'Oden. Nous avons utilisé en même temps l'élément de Haug à quatre nœuds. Les cas des éléments quadratiques à six et à huit nœuds restent à être explorés.

Nous présentons maintenant la formulation d'autres modèles issus de la mécanique.

### 3.3 Elasticité 3D, viscoplasticité 2D et couplage

**Elasticité 3D.** Soit  $D$  un solide élastique 3D, son énergie de déformation interne  $e_i$  s'écrit

$$e_i(U) = \frac{1}{2} \int_D \text{tr}(\Sigma(U)\Upsilon(U)) dD \quad \forall U \in H^1(D) \quad (1)$$

avec l'hypothèse de petits déplacements  $U$  de  $D$ . Le tenseur des contraintes est noté  $\Sigma$ , et le tenseur des déformations linéaires  $\frac{1}{2}(\nabla U + \nabla U^t)$  est noté  $\Upsilon$ .

Pour résoudre l'équation de l'élasticité  $3D$  par éléments-finis, nous avons conçu une méthode multi-grille, du type deux-grilles  $(D_h, D_{2h})$ . Elle nécessite un opérateur d'interpolation  $i_{2h}^h : D_{2h} \rightarrow D_h$ , et un opérateur de projection  $p_h^{2h} : D_h \rightarrow D_{2h}$ . Ils permettent de transférer l'approximation de la solution et le résidu d'équilibre entre les maillages fin et grossier. Dans notre méthode deux-grilles, l'opérateur de lissage des erreurs sur le maillage fin est du type gradient-conjugué.

Les équations d'équilibre résolues sont issues de l'approximation par éléments-finis de problèmes réguliers et irrégulier de l'élasticité linéaire en dimension 3.

La méthode proposée permet des gains de temps calculs importants. Pour un problème régulier, le temps calcul est proportionnel au nombre d'inconnues  $n$ . La complexité de l'algorithme est moindre vis à vis des méthodes directes, dont les algorithmes ont une complexité polynomiale en  $O(n^3)$ . Cela a été validé sur deux cas-tests de problèmes réguliers, posés sur un domaine cubique. Pour le nombre d'inconnues  $n$  considéré, le temps de calcul pour la grille grossière est négligeable par rapport au temps de calcul des itérations sur la grille fine.

Les travaux de recherche sur la méthode multi-grille ont été présentés dans une publication [6].

**Un problème de mécanique des fluides  $2D$ .** La formulation Lagrangienne des équations de Navier-Stokes permet de poser dans un schéma d'intégration numérique temporel, un problème linéaire à chaque pas de temps. L'avantage de cette formulation, lorsque le problème est discrétisé par la méthode des éléments-finis, est de pouvoir traiter les problèmes de surface-libre, sans faire d'approximation autre que géométrique, sur la condition non-linéaire de surface-libre. L'inconvénient de cette formulation est de devoir remailler le domaine fluide lorsque le maillage dégénère, et ainsi d'occasionner une approximation des variables lors de leurs transports sur le nouveau maillage. Cela occasionne aussi une accumulation des approximations du domaine occupé par le fluide, à chaque remaillage.

Soit  $\Omega \in \mathbb{R}^2$  le domane occupé par un fluide visqueux (Newtonien) incompressible à l'instant  $t$ , il s'agit de résoudre le système d'équations suivant par une méthode d'éléments-finis.

$$\exists ? (V, p) \in (V_{CA}, \mathbb{R}^+) \text{ tel que} \quad (2)$$

$$\rho \frac{dV}{dt} - \nu \Delta V - \nabla p = \rho f \text{ sur } \Omega \quad (3)$$

$$p = -\frac{1}{\epsilon} \operatorname{div} V \text{ sur } \Omega \quad (4)$$

$$\sigma \cdot \vec{n} = \tau \text{ sur } \omega_l \quad (5)$$

$$V = 0 \text{ sur } \partial\Omega / \omega_l \quad (6)$$

Dans ce système d'équations, la première équation exprime la conservation de la quantité de mouvement du fluide. Cette équation est linéaire par rapport à  $V$  lorsqu'elle est écrite en variable Lagrangienne. La seconde équation est le traitement par pénalisation de la contrainte d'incompressibilité  $\operatorname{div} V = 0$  à l'aide d'un petit paramètre  $\epsilon$ . La troisième équation est la condition sur la surface libre  $\omega_l$ . Elle relie la tension de surface  $\tau$  du fluide au tenseur des contraintes  $\sigma$ . La surface libre  $\omega_l$  peut être assimilée à une membrane dont l'élasticité est particulière. Sa tension est constante, cette membrane a le comportement d'une bulle de savon. La dernière équation est la condition d'adhérence du fluide sur le complément non-libre du bord  $\partial\Omega$ .

La technique de résolution et la technique de remaillage du domaine discrétisé par éléments-finis ont été publiées [5]. Cette recherche a été valorisée à l'origine pour l'amélioration du procédé de fonderie. Elle a été l'origine du logiciel de remplissage *R2*.

Elle nous a été utile à nouveau pour concevoir le projet de recherche *SIMBAR* sur les barrages anti-pollution. Ce projet sera présenté dans la prochaine section.

Un algorithme d'auto-contact de la surface libre avec elle-même a été mis au point. Il a été utilisé pour d'autres procédés où la surface libre se replie.

**Modèle couplé structure-fluide 2D.** Soient, à l'instant  $t$ ,  $\Omega \in \mathbb{R}^2$  le domaine occupé par un fluide viscoplastique (non-Newtonien) incompressible, et  $D \in \mathbb{R}^2$  le domaine d'un solide élastique en contact avec une partie de la frontière  $\partial\Omega$ . Il s'agit de poser de façon couplée une généralisation du système d'équations précédent 3 4 5 6, avec les équations de l'élasticité linéaire associées à l'énergie de déformation 1, considérée ici en 2D.

La généralisation du système précédent considère une fonctionnelle d'énergie. La viscosité  $\nu$  du fluide dépend de sa vitesse de déformation. La loi de *Norton – Hoff* relie le tenseur des contraintes à une puissance décimale du tenseur des vitesses de déformations.

Le couplage induit une contrainte de continuité des contraintes normales à l'interface du fluide et du solide.

$$\sigma \cdot \vec{n}_\Omega = \sigma \cdot \vec{n}_D \text{ sur } \partial\Omega \cap \partial D$$

Cette recherche a été valorisée à l'origine pour l'amélioration du procédé de forgeage, en prenant en compte la déformation de l'outil dans une modélisation numérique (*FORGE2*). Elle a été utile aussi plus tard, dans le projet *AIRBAG*, lors de nos recherches sur l'interaction entre une membrane gonflée et un solide venant s'y amortir.

Cette thématique de recherche va être présentée dans la prochaine sous-section.

### 3.4 Couplage entre écoulement compressible, membrane élastique et solides rigides

Un autre assemblage des parties fluides et déformables définit un autre type de couplage. Il concerne la mécanique d'un fluide compressible, la mécanique d'une membrane, et la mécanique de solides rigides. La membrane est considérée dans l'espace 3D. Le domaine du fluide compressible est le volume intérieur de la membrane.

Soient  $\omega$  une surface fermée,  $\delta$  un trou dans  $\omega$  et  $\delta_0$  l'opercule pouvant refermer  $\delta$ . La surface  $\omega$  est remplie d'un fluide compressible  $\Omega$ . De plus, nous considérons deux solides rigides  $D_1$  et  $D_2$  en contact avec la surface  $\omega$ . Ces différents domaines peuvent s'appliquer à un système d'airbag permettant d'amortir un choc entre les deux solides rigides.

Lors de son gonflage, de son déploiement, et du début de l'absorption d'énergie de choc, l'airbag doit être une surface hermétique, et donc fermée,  $\omega - \delta + \delta_0$ . Le trou  $\delta$  s'interprète comme un événement, refermé par l'opercule  $\delta_0$ . L'opercule est constitué d'un matériau hermétique peu résistant. De cette manière, l'opercule cède à partir d'une certaine pression du gaz  $\Omega$ . La recherche du matériau constituant l'opercule est en rapport avec la recherche présentée sur les membranes trouées et plissées.

Lors de la phase d'amortissement de choc, le gaz  $\Omega$  s'écoule à travers  $\delta$ . Cet écoulement du gaz assure l'évacuation de l'énergie de choc du système airbag.

L'énergie interne dans la membrane  $\omega$  est complétée par son énergie cinétique  $e_i(u) + \int_\omega \rho \frac{d^2 u}{dt^2}$ , où  $u$  est le champ de déplacement de la membrane et  $\rho$  est la densité surfacique initiale du matériau.

Le comportement du gaz compressible est modélisé avec la loi des fluides parfaits, et une loi de débit massique d'un gaz à travers une tuyère. La tuyère représente l'évent  $\delta$ .

Cette modélisation du gaz dans l'évent  $\delta$ , et à l'intérieur de la surface  $\omega + u$  conduit à un système d'équations différentielles non-linéaires. Ce système a pour inconnues le volume de  $\omega + u$ , la masse et la pression du gaz dans l'airbag.

Le débit massique du gaz à dépend de la surface de l'évent  $\delta$ , et d'un coefficient de restriction du jet du gaz. Cette restriction du jet est un phénomène d'ajutage. Le coefficient d'ajutage a été défini en recalant un modèle numérique avec des essais. Pour cela, nous avons utilisé les techniques d'analyse en composantes principales et d'arbre de regression.

Le principe fondamental de la dynamique modélise les mouvements des deux solides rigides, en contact avec l'airbag, de part et d'autre de celui-ci.

L'amortissement de chaque solide est lié à la somme de deux forces, situées à l'interface entre l'airbag et le solide. Une force de pression est due au gaz  $\Omega$ . Elle est localisée à l'intérieur de l'interface. Une force est due à la tension de la surface  $\omega + u$ . Elle peut se situer à l'intérieur de l'interface, et sur le pourtour de l'interface. Nous nommons par effet de membrane la cause de cette deuxième force.

Au cours d'essais, un phénomène d'ondes de contraintes a été observé sur l'airbag. En début de choc, nous observons sur  $\omega + u$  la propagation d'ondes dues à des plis. Le domaine occupé par la zone plissée  $W$  évolue au cours du temps.

Nos travaux ont considéré une modélisation géométrique simplifiée de la membrane  $\omega$ . Ils restent à valoriser dans un article. La modélisation numérique en  $3D$  du fluide  $\Omega$  était en dehors de nos travaux.

Le travail de recherche a été utilisé par le projet d' "Airbag extérieur pour tramway" *AIRBAG*, présenté dans la prochaine section.

### 3.5 Couplage entre écoulement incompressible à surface libre et membrane élastique

Ce thème de recherche concerne un couplage difficile entre une membrane  $\omega$  et un écoulement incompressible diphasique  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ . Cet écoulement possède à la fois une surface libre et une interface entre les deux fluides. Ce thème de recherche est appliqué aux barrages flottants anti-pollution. Les deux fluides sont le plus souvent de l'eau de mer et un hydrocarbure. La difficulté de ce couplage nous a conduit à utiliser des modèles disjoints pour le rendre plus simple sur le plan numérique. La membrane est considérée dans l'espace  $3D$ . Les domaines des fluides visqueux seront  $2D$  sur le plan numérique, et à échelle réduite dans l'approche expérimentale.

Soit  $\omega$  une surface composée d'une partie cylindrique, gonflée par une pression interne, soumise à une pression hydrostatique, et d'une partie plane, soumise à une pression hydrodynamique et à son propre poids de lest. Ces deux parties sont connexes et attachées entre elles suivant une ligne notée  $l_1$ . Le gaz de gonflage  $\Omega_3$  est maintenu dans la membrane. La membrane peut ainsi flotter à la surface de l'eau, et sa partie plane est immergée.

Dans certains cas, la partie cylindrique est absente. Dans ce cas la partie plane est remplacée par une surface en forme d'accordéon. Cette surface contient alors des solides articulés en mousse de basse densité. Ils fournissent la flottabilité nécessaire.

Soient  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$  deux fluides de densités différentes. Ils forment une surface libre et ont une interface entre eux. La condition de surface libre suit l'équation 5 décrite dans une section précédente. L'interface entre les deux fluides suit une condition du même type. Cette interface peut être une surface non-lisse.

La figure 1 suivante montre la surface libre régulière et l'interface non-lisse entre de l'eau et un hydrocarbure, retenus par un barrage flottant.

gouttellettes angle jupe vers ar Cedre.jpg gouttellettes angle jupe vers ar Cedre.jpg



FIG. 1 – Surface libre régulière et interface non-lisse, photo CEDRE

La surface  $\omega$  est soumise à des efforts hydrostatiques et hydrodynamiques. Ces efforts sont issus de la pression hydrostatique des fluides  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ . Les efforts hydrodynamiques viennent de la pression induite par le champ de vitesse  $V$  des fluides  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ . Une pression interne provient du gaz de gonflage  $\Omega_3$ .

D'autres efforts externes s'appliquent à un barrage flottant. La membrane  $\omega$  doit être amarrée. Cela peut être sur le fond marin ou estuarien, à un navire, à une berge ou à un quai.

L'énergie des forces appliquées  $e_e(u)$  fait intervenir la pression  $p$  sur la configuration déformée de la membrane  $\omega + u$ . Le terme de pression est formée des trois termes suivants : la pression hydrodynamique, la pression de gonflage  $p_t$ , et la pression hydrostatique  $P_1$ .

$$\begin{aligned} & \int_{\omega+u} p \vec{n} \, d(\omega + u) = \\ & + \frac{1}{2} \rho C_\theta (V f(\alpha))^2 \int_{\omega+u} \vec{n} \, d(\omega + u) \\ & + p_t \int_{\omega+u} \vec{n} \, d(\omega + u) \\ & + \int_{l_1} P_1 \vec{z} \, d(l_1) \end{aligned}$$

Le couplage hydrodynamique  $(\omega, V)$  dépend du coefficient de trainée  $C_\theta$  et de l'angle vertical  $\theta$  de la partie immergée du barrage. Nous utilisons des résultats expérimentaux en bassin hydrodynamique pour identifier  $C_\theta$  pour chaque angle  $\theta$  d'une section verticale de barrage.

Le couplage hydrodynamique  $(\omega, V)$  dépend aussi de l'angle local  $\alpha$  entre la direction de la normale au barrage  $\vec{n}$  et le courant marin  $V$ . Ce couplage est pris en compte par une fonction de pondération  $f(\alpha)$ .

Le couplage hydrostatique ( $\omega, \Omega_1, \Omega_2$ ) dépend de la poussée verticale  $P_1$ . Elle est définie sur la ligne  $l_1$  reliant les parties flottante et immergée du barrage.

Cette recherche est valorisée dans les projets *SIMBAR* et *BAR3D* sur les barrages flottants anti-pollution. Ils sont présentés dans la prochaine section.

Une extension de ce travail de recherche a débuté pour une application maritime innovante. Il s'agit du projet *WATERBALLON* sur le stockage d'eau douce  $\Omega_2$ , dans une membrane  $\omega$ , flottante sur l'eau de mer  $\Omega_1$ . Ce projet sera décrit dans la prochaine section.

La modèle numérique permet de comparer plusieurs voies d'amélioration de la conception d'un barrage, et de mieux connaître son fonctionnement. Le modèle par éléments-finis est adapté au calcul de plan de pose de barrage en zone côtière ou portuaire.

Cette recherche a donné lieu à deux publications [7] [8] en 2008.

### 3.6 Liste des articles et communications, distinctions

Publications :

Les articles publiés sont au nombre de sept, parmi lesquels quatre sont en tant que seul auteur (EJM, CNME, APOR, PJO), deux en tant qu'auteur principal (IJNME, EC), et un en tant que co-auteur (EJM).

Nous avons deux articles qui demeurent à réviser (IJNMF, EJM), et un article refusé en tant que seul auteur (EJM).

Nous avons un chapitre dans un livre (éditeur : Hermès Sciences).

- Articles cf document annexe
- Chapitre dans un livre cf document annexe
- Communications publiées cf document annexe

Distinctions :

Nous avons obtenu deux prix scientifiques, une distinction nationale et un award international.

- (1) National, ATMA 2007 - Médaille Richelieu, prix spécial du jury ATMA, Association Technique Maritime et Aéronautique, ENSTA, Juin 2007
- (1) International, Hromadka 2008 - Rhomadka Award 2008, Wessex Institute of Technology, Université d'Alicante, Prof. C.A. Brebbia, Prof. I. J. Raneda, Prof. J. Ramon G. Anton, Juin 2008

Nous avons réalisé trois conférences invitées (APMEP 2000, FORUM EAU 2006, LITMED 21), cf document annexe.

A deux reprises, nous avons participé à un comité scientifique de congrès (NUMIFORM 1992, WATER POLLUTION 2008).

- Membre Comité scientifique international et comité local d'organisation, Congrès international NUMIFORM' 92, CEMEF, Sophia Antipolis, Septembre 1992.
- Membre International Scientific Advisory Committee, Water Pollution 2008, WIT et Université d'Alicante, 9-11 Juin 2008.

## 4 L'obtention des contrats de recherche

Nous présentons les principaux contrats de recherche menés à l'*EIGSI* dans le cadre de nos recherches en tant qu'enseignant-chercheur depuis 1993. L'obtention de contrats de recherche est stratégique pour une école d'ingénieurs de statut privé, en lui assurant une reconnaissance et un soutien financier. Nous présentons cinq projets de recherche. Le premier est un contrat financé en totalité par un industriel du transport public. Les trois suivants sont des contrats financés par l'état dans le cadre de l'*ANR* et du programme *PRECODD* sur les éco-technologies. Le

dernier projet est un projet européen (STREP) qui est un projet prospectif *EIGSI* et qui a été déposé pour financement, au 6ème *PCRD* "Changement global et Développement Durable". Nous sommes coordinateur national de tous ces projets, à l'exception d'un.

Avant d'être recruté comme enseignant-chercheur à l'*EIGSI* fin 1993, nous avons construit plusieurs projets de recherche moins ambitieux. En 1992, au *CEMEF*, une démarche a débuté auprès de l'*ADEME* et de l'*ANVAR* sur la simulation du forgeage. En 1992, un projet de recherche sur les surfaces libres a été rédigé en vue d'un recrutement comme *CR2* à l'*INRIA* de Lorraine. En 1993, un projet de recherche a été élaboré sur l'interaction océan-atmosphère pour un concours de recrutement comme *CR2* au *CNRS*, dans la section "Enveloppes Superficielles Terrestres". A propos de ce projet, nous avons été encouragés à nous représenter au grade de *CR1* en 1994. En 1994, nous avons élaboré avec le *CRAIN* un projet sur un logiciel de simulation pour voiles, qui a été proposé pour financement au représentant de l'état en Charente-Maritime. Notre intérêt pour la modélisation des airbags commence en 1995.

#### 4.1 AIRBAG 96-99

**Contexte et enjeux.** Aux début des années 90, le retour du tramway dans les villes, comme *Grenoble* et *Nantes*, a conduit les constructeurs à étudier des dispositifs d'absorption d'énergie de chocs, dus aux collisions entre un tramway et les autres usagers.

Il s'agissait pour nous d'intégrer dans un modèle numérique, les travaux des partenaires en dynamique rapide et éléments-finis 3D, les mesures d'essais en vraie grandeur, tout en assurant le développement industriel d'un nouveau produit avec des fournisseurs potentiels.

**Objectifs.** Le projet *AIRBAR* concernait un airbag extérieur pour tramway afin d'amortir les chocs. Il a permis une valorisation de nos compétences en mécanique des membranes et en structures souples, pour un besoin industriel international, porté par un établissement industriel local. Il vient aussi de notre souhait de développer dès 1995 à l'*EIGSI* la thématique en vogue liée aux airbags et à la sécurité des transports.

La partie scientifique du projet concernait un modèle dynamique simplifié 1D pour une membrane pneumatique  $\omega - \delta$ , couplé avec une loi de décharge de gaz compressible à travers un évent  $\delta$ . Ce modèle a été recalé avec deux campagnes d'essais à l'échelle 1. Ce modèle a été comparé à un modèle numérique 3D par éléments-finis en dynamique.

Le gonflage rapide et le déploiement de l'airbag restent à étudier des points de vue industriel et expérimental. L'étude du déclenchement de l'airbag reste à mener des points de vue industriel, opérationnel et ergonomique.

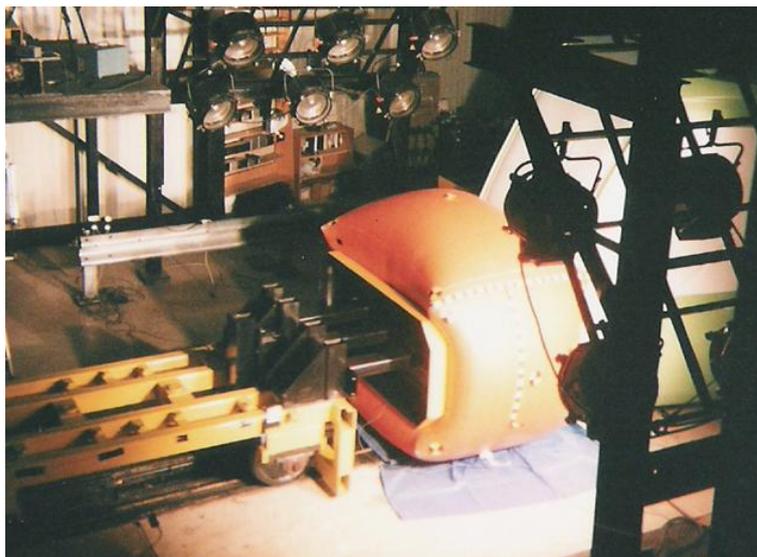
**Partenariat et montant financier.** Le projet était piloté par *ALSTOM* (maître d'ouvrage) et coordonné par l'*EIGSI* (maître d'oeuvre). Le consortium du projet groupait cinq industriels et deux établissements de recherche.

Nous avons été le chef de projet de l'*EIGSI*, qui coordonne anime et conçoit l'activité de recherche. *AERAZUR* était l'industriel qui fournit l'enveloppe de l'airbag. La *SNPE* était l'industriel qui fournit le système de génération de gaz pour déployer l'airbag. *PYROALLIANCE* était l'industriel qui fournit les pyromécanismes pour actionner l'airbag. *VALUTECH* était le laboratoire de L'Université de Valenciennes qui possédait la catapulte inverse permettant des essais de choc à l'échelle 1 d'une cabine de tramway. *ESI* était l'industriel fournisseur du code de calcul *PAM - SAFE* dédié aux airbags. Il utilise une méthode explicite d'intégration temporelle pour des éléments-finis de type membrane.

*ALSTOM* et sa division tramway dans son établissement d'Aytré finançaient le projet en totalité. Le montant total du projet était évalué à trois millions de francs, dont la moitié finançait les travaux de recherche de l'*EIGSI*.

**Résultats obtenus.** Les essais à l'échelle 1 à l'Université de Valenciennes ont utilisé la catapulte *VALUTECH*.

La figure 2 suivante présente au cours d'un essai de choc, le matériel roulant, l'airbag et la cabine de tramway utilisés.



VALUVAL.jpg VALUVAL.jpg

FIG. 2 – Un essai d'airbag extérieur pour tramway

Nous avons utilisé des techniques d'analyse des données pour dépouiller les résultats des essais à l'échelle 1. Les principales méthodes utilisées sont l'analyse en composantes principales (ACP), et la classification hiérarchique par les arbres de régression. L'ACP permet d'identifier les groupes d'essais similaires et d'écartier les mesures aberrantes. Les arbres de régression permettent de quantifier des seuils de décision optimaux parmi des variables explicatives. Ils concernent une variable à expliquer, comme l'absorption de l'énergie de choc.

**Innovations.** L'innovation majeure du projet a été un airbag extérieur de plus de  $4m^3$ . Ses performances ont été validées. Il permet l'absorption de l'énergie de choc entre deux tramways à  $10km/h$ , ou bien celle d'un choc frontal entre un tramway arrêté et une voiture à  $40km/h$ .

Ce projet a été valorisé en 1996 par le dépôt de deux brevets internationaux. Ils sont référencés à la fin de cette section. *ALSTOM* a déposé en 2002 trois extensions de revendications, issues des résultats de ce projet.

Les impacts du projet touchent la sécurité des transports urbains et des usagers. Nos travaux ont été présentés de façon officielle en Septembre 1999 au siège social d'*ALSTOM – Transport*, aux directions industrielle et de recherche du groupe, ainsi qu'au chef de projet du tramway *CITADIS*.

Depuis 1996 à aujourd'hui, le seul autre projet de recherche d'airbag géant a été aux USA pour la mission spatiale *PATHFINDER*. Il a été encore plus ambitieux, avec un assemblage de plusieurs airbags extérieurs de grande taille, destiné à amortir la dépose sur Mars.

**Extension et transfert.** Il a été mis en évidence lors des essais une onde de tension qui se propageait à la surface de l'airbag. La vitesse de cette onde est la vitesse de déplacement de la frontière de la partie plissée  $W$  de l'airbag.

$$\vec{c}_{\omega+u} = \frac{d\partial W}{dt}$$

La vitesse de cette onde est donnée par  $\sqrt{\frac{\sigma_{max}}{\rho}}$ , où  $\sigma_{max}$  est la contrainte principale dans la membrane et  $\rho$  sa masse surfacique.

Ce projet nous a engagé pour un autre projet avec l'industriel *AERAZUR*, sur un système de flottabilité pour engin blindé, dont le client final était *ST – Engineering* à Singapour.

Pour des raisons de confidentialité, sur la base du modèle numérique utilisé, nous avons réalisé une communication sur un autre système d'airbag. Il s'agit d'un éjecteur pneumatique de charges de l'industriel *PYROALLIANCE*. Elle a été publiée au congrès *IMACS* de 2000[9]. Mon premier article sur le sujet de départ a été accepté en 2003, sous condition d'une importante révision[10]. Une tentative de révision totale de l'article a été refusée en 2007[11], à cause de la faible adaptabilité géométrique de notre modèle *1D* pour airbag.

Plusieurs diversifications du concept d'airbag extérieur ont été initiées vers les poids-lourds avec *RVI*, l'automobile avec *FAURECIA* et la *SNPE*, et à nouveau pour le tramway et l'utilisateur vulnérable (piéton) avec *ALSTOM* et la *SNPE* dans le cadre du réseau *PREDIT*.

Nous présentons maintenant un projet qui sera initié l'année suivante et qui démarrera trois ans plus tard.

## 4.2 SIMBAR 2002-2006

**Contexte et enjeux.** Les catastrophes de l'*Erika* en Décembre 1999, et du *Prestige* en 2002, ont motivé une relance importante des recherches sur les dispositifs de lutte contre les pollutions marines. Le confinement et la récupération d'hydrocarbure en mer permettent de diminuer la masse de polluant collectée sur le littoral. La masse du déchet collecté est multipliée par un dix, dès lors que l'hydrocarbure se dépose sur le littoral. Un barrage flottant est le principal dispositif utilisé pour confiner, ou dévier, les pollutions flottantes.

L'idée du projet *SIMBAR* a débuté à la suite de la catastrophe de l'*Erika*, et des discussions que nous avons entamées avec *AERAZUR* et poursuivies avec le *CETMEF* de Brest en Juin 2000, puis l'*IFP*. La création en avril 2001 du *RRIT* (Réseau de Recherche et d'Innovation Technologique) *RITMER* par le Ministère de La Recherche et de La Technologie a motivé la conception du projet *SIMBAR*, durant les années 2001-2003.

**Objectifs.** La partie scientifique du projet *SIMBAR* portait sur un modèle numérique de membrane, auquel sont adjoints des essais expérimentaux, couplés à des calculs hydrodynamiques. L'objectif pratique était de répondre à des questionnements des opérationnels et des acheteurs publics de barrages. Le modèle numérique était construit à partir d'éléments-finis de type membrane. Il utilisait les mesures d'efforts réalisées en bassin hydrodynamique.

Les essais permettaient aussi les visualisations d'écoulements d'eau et d'hydrocarbures autour de sections verticales d'un barrage standard. Ces visualisations ont été comparées aux résultats des calculs numériques du *LNHE* par la méthode *SPH – 2D*.

Nous avons mis en oeuvre un modèle de membrane pour réaliser l'étude paramétrique de nombreuses variables de conception d'un barrage et de son système d'amarrage.

Nous avons ensuite réalisé le calcul du barrage de l'estuaire de l'Elorn, débouchant dans la rade de Brest.

Les méthodes *SPH* assimilent un fluide à un ensemble de particules Lagrangiennes. Elle est adaptée à la description d'écoulements diphasiques ayant une interface non-lisse, du type hydrocarbure-eau.

Les essais hydrodynamiques utilisaient l'échelle de Froude au 1/15. Les essais permettaient d'identifier les coefficients de traînée d'une section verticale de barrage. Ils ont été utilisés par l'*EIGSI* pour le calcul de structure de barrage.

**Partenariat et montant financier.** Le projet *SIMBAR* est labellisé depuis 2003 par le *RITMER* sur les "Pollutions Marines Accidentelles et leurs Conséquences Ecologiques".

Le projet *SIMBAR* nous a permis d'obtenir notre premier label national de recherche et cela en tant que coordinateur national. Le consortium du projet groupait un service central public, un industriel et trois établissements de recherche.

L'*EIGSI* était le coordinateur du projet.

Le *CEDRE* qui est l'organisme de conseil des autorités publiques en cas de marée noire, agissait comme industriel.

Le *CETMEF* est le centre technique du Ministère de l'Équipement, en charge de la cellule *POLMAR*.

Le *LNHE* est le centre de recherche de *EDF R – D* spécialisé dans les méthodes de type *SPH – 2D*, pour le calcul des écoulements à surfaces libres.

L'Université de La Rochelle utilisait le bassin hydrodynamique de l'*IUT* de La Rochelle, pour réaliser des essais à échelle réduite de barrage.

Le projet a été financé par le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) à partir de mars 2004, jusqu'en Juin 2006. Le budget global du projet pour l'ensemble des partenaires a été évalué à 700 k-euros, dont la moitié était financée par le *MEDD*.

**Résultats obtenus.** La particularité d'un système de barrage flottant est d'être composé de plusieurs domaines. Un système de barrage  $\omega$  est formé de  $N$  tronçons,

$$\omega = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \omega_{i,j}$$

où  $\omega_{i,1}$  est le tronçon  $i$  du barrage. Il est composé d'un flotteur, d'une jupe immergée, munie dans sa partie inférieure d'une chaîne de reprise d'effort et de lest, et dans sa partie supérieure d'une sangle. Une "mini-jupe" de barrage  $\omega_{i,2}$ ,  $i = 1 \dots N - 1$ , relie deux tronçons de barrage adjacents. Un système d'amarrage du tronçon  $i$ , sur des coffres de flottaison est représenté par  $\omega_{i,3}$ . Les amarres du tronçon  $i$  entre les coffres et les ancres, ou les corps-mort, sont définies par  $\omega_{i,4}$ .

Le modèle numérique a pu être utilisé pour calculer le barrage de plus d' $1km$  de l'estuaire de l'Elorn. Ce barrage est composé de six tronçons, ancrés sur cinq paires de coffres de  $2m^3$  et cinq paires de corps-morts de  $6T$  chacun. Ce calcul comprend six configurations du barrage. Elles correspondent au courant marin et à la hauteur d'eau, sur un cycle marée de coefficient 73, d'un peu plus de 12 heures. Ce cycle est défini entre deux marées hautes.

La figure 3 suivante montre le maillage du barrage de l'Elorn, avec son double système d'amarrage. Les amarres à l'aval du courant sont soumises à leur seul poids propre, tandis que les amarres à l'amont sont tendues par l'effort du courant marin sur les six tronçons.

Pour parvenir à ce calcul du barrage de l'Elorn, et à évaluer son efficacité, nous avons intégré les résultats de recherche de nos partenaires. Les coefficients hydrodynamiques du barrage de

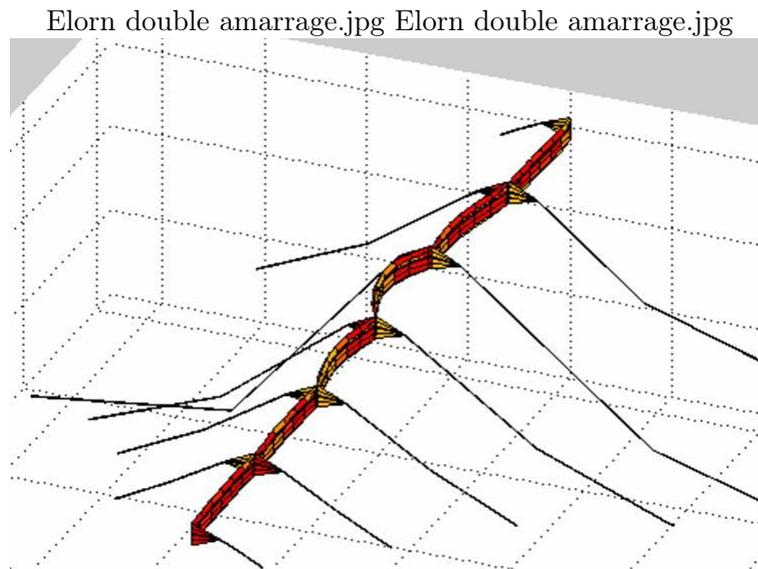


FIG. 3 – Le barrage de l’Elorn avec un double système d’amarrage, à l’amont et l’aval du courant

l’Elorn sont issus des essais à l’Université de La Rochelle. La table d’efficacité des sections de ce barrage, en fonction de la nature du polluant et du courant, est issue des calculs *SPH* du *LNHE*.

Dans le modèle numérique *SPH* il y a eu jusqu’à 100,000 particules dans les calculs *2D*, d’écoulements autour d’une section verticale de barrage. Chaque calcul prenait environ une semaine de temps calcul.

**Innovations.** Nous avons amélioré les connaissances sur les modes de fuite d’hydrocarbures autour des barrages, l’hydrodynamique des barrages, le confinement ou la déviation des hydrocarbures, l’analyse structurale des barrages. Pour cela, nous avons intégré les travaux des partenaires sur les plans numériques et expérimentaux. D’autre part, nous avons fourni les résultats permettant d’assurer des retombées opérationnelles et industrielles. Nos résultats ont donné des réponses à des questionnements sur la conception et l’utilisation des barrages.

Par exemple, le double amarrage permet de réduire le déplacement du barrage lors du renversement de marée.

Les impacts du projet concernent la sécurité maritime et la protection du littoral. Notre activité de recherche a construit un travail commun entre différentes autorités nationales chargées de l’environnement. Le Ministère de l’Environnement nous a encouragé à montrer ce savoir faire dans nos futures actions de dissémination auprès des décideurs et des chercheurs.

**Extension et transfert.** Nous avons organisé trois workshops internationaux en mars et octobre 2006 et en décembre 2008. Ils sont référencés à la fin de cette section. Notre type de workshop utilise une approche intégrée, de façon à grouper des autorités publiques, des industriels et des scientifiques autour de problématiques communes. Le premier workshop était orienté sur les barrages flottants. Le second workshop était dédié aux filets et aux chaluts pour collecter les hydrocarbures lourds et les boulettes flottantes. Le troisième porte sur l’usage des logiciels pour la protection côtière.

Le projet *SIMBAR* a conduit à deux articles, un du *LNHE – EDF* [12] et un de l'*EIGSI* [7], dans deux journaux internationaux à comité de lecture. Le plan de dissémination global de *SIMBAR* comprend 27 publications pour plusieurs types de public. La dissémination du projet utilise un site web qui recevait 700 visites/mois à la fin du projet.

Nous avons rédigé une communication publiée à l' " *International Oil – Spill Conference* " de 2005 [13]. A la suite de cette conférence, l'agence américaine *NOAA*, par le *CRRC* du New-Hampshire en charge des pollutions marines par hydrocarbure, nous a demandé d'expertiser un projet de recherche en mathématiques appliquées sur la dérive des hydrocarbures en mer. Nous aurons à nouveau une communication à cette conférence en 2009.

Ce projet a eu une suite, *BAR3D* sur le développement d'un logiciel de calcul 3D de barrage, exposé plus loin.

Nous présentons maintenant un projet de recherche dans lequel nous sommes partenaire.

### 4.3 RAPACE 2005-2008

**Contexte et enjeux.** La détection des nappes d'hydrocarbure à partir d'un navire est très limitée à cause de la trop faible altitude du point d'observation. Pour être détectable, la nappe doit être à moins de 300m du navire.

Les contacts de l'*EIGSI* avec une société de construction de drones dans le département de la Charente-Maritime, ont facilité le coordinateur de projet pour construire un consortium ayant des compétences en aéronautique, en engins volants motorisés et en aérostatique.

En 2005, le programme *PRECODD* de l'*ANR*, l'Agence Nationale de la Recherche, reprend les activités des *RRIT RITMER* et *RITEAU*, et répond au niveau national au plan d'action européen *ETAP* sur les éco-technologies.

Le projet *RAPACE* a été agréé en Décembre 2005 par le programme *PRECODD* de l'*ANR*. Ce projet nous a permis d'obtenir en 2005 notre premier label de recherche de l'*ANR*.

**Objectifs.** Un engin muni d'instruments optiques, volant à une altitude de 150m permettrait de détecter les nappes d'hydrocarbure jusqu'à 1500m de distance. Cet engin motorisé pourra précéder le navire sur sa route et ainsi le guider dans ses opérations de collecte du polluant. Cet engin sera captif pour une raison de réglementation aérienne dès 30m d'altitude, même en mer. La motorisation électrique de l'engin est alimentée en énergie par un ombilical à courant de haute tension. La résistance mécanique de l'ombilical permet le maintien de l'engin au navire. L'ombilical peut transmettre aussi des images et des commandes de vol. L'engin aérostatique doit être autopiloté pour être stable et transmettre au navire des images de qualité.

**Partenariat et montant financier.** Coordinateur du projet, la société *GEOCEAN* mène cette recherche technologique et industrielle, pour aboutir à la mise sur le marché de cet engin volant, pour détecter les hydrocarbures flottants à partir d'un navire.

Le consortium du projet groupe le centre d'expertise anti-pollution de la Marine Nationale, trois industriels et trois établissements de recherche.

Le coordinateur *GEOCEAN* est un industriel de l'offshore de la région *PACA*. L'*EIGSI* réalise les travaux de recherche sur la modélisation aéro-mécanique du système volant captif, et construit un banc d'essais pour les mesures aéro-électriques de la chaîne de propulsion du moteur et de l'hélice. L'industriel *AEROCOMPOSITE – Saintonge* construit le système aérien. Le *CEDRE* apporte son expertise en antipollution marine. Le *CEPPOL* est le centre d'expertise

de la Marine Nationale pour les pollutions en mer. L'industriel *THOMSEA* représente la profession des marins-pêcheurs impliqués dans les opérations de dépollution en mer. Le *LNE* est le laboratoire national fournissant le système d'observation optique, embarqué et téléopéré.

Le montant global du projet s'évalue à 1,4 M-euros, dont 160 k-euros pour l'*EIGSI*, qui est financée pour moitié par l'*ANR*.

La figure 4 suivante montre une illustration de l'engin volant captif, à partir d'un navire de la Marine Nationale.

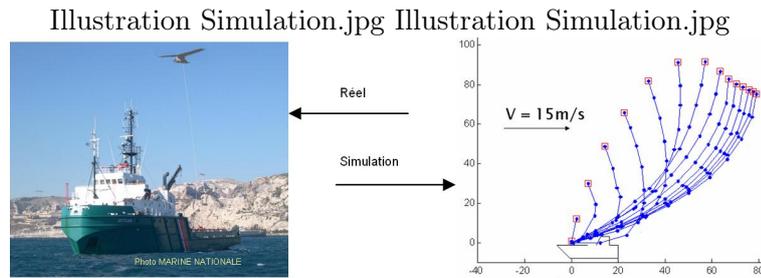


FIG. 4 – Le système d'engin volant captif, illustration et simulation

**Résultats obtenus.** Notre recherche concerne la modélisation numérique de l'ombilical. Nous le considérons comme un milieu curviligne  $l$ , élastique et instationnaire. La restriction du modèle de membrane en régime instationnaire, à un milieu mono-dimensionnel s'écrit de la façon suivante.

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} = \vec{T} + Q \vec{t} + p \vec{n}$$

où  $\rho$  est la masse linéique locale,  $\vec{T}$  est le vecteur tension de l'ombilical,  $Q$  la friction tangentielle,  $p$  la pression normale et  $u$  le déplacement du milieu curviligne.

La figure 4 montre le résultat d'une simulation numérique de l'*EIGSI*, sur le déploiement de l'engin et de son ombilical à partir de l'avant d'un navire.

Sur la chaîne de propulsion du moteur et de l'hélice, les mesures effectuées par l'*EIGSI*, sont la tension et l'intensité du courant, la poussée de l'hélice, son régime, la température du moteur et de son contrôleur.

Dans le projet initial il était prévu d'étudier la mécanique du vol, avec un code de calcul du type *FLUENT*. Il s'est avéré suffisant dans un premier temps d'utiliser des connaissances empiriques sur un drone à voilure annulaire du type *COLEO*. Par contre, la connaissance était insuffisante sur les motorisations électriques spécifiques et les hélices. Pour ces raisons, les résultats du projet ont dérivé vers la construction et l'exploitation d'un banc d'essais aéro-électrique.

**Innovations.** L'impact général du projet *RAPACE* s'adresse à la sûreté maritime, la sécurité civile et l'observation côtière. Les activités de recherche de l'*EIGSI* ont été dirigées vers la conception d'un banc d'essais aéro-électrique. Il permet d'analyser les paramètres des modèles associés aux composants d'un petit engin volant motorisé aérostatique. Les activités de l'*EIGSI* ont aussi permis de mettre au point un simulateur en 2D d'un engin volant relié à un navire par un ombilical.

L'exploitation commerciale et la propriété industrielle des résultats du projet suivront l'accord de consortium signé en mai 2008 entre les partenaires.

**Extension et transfert.** Le déploiement de l'ombilical  $l$  est décrit dans le problème discret de deux façons, un dépilement d'éléments-finis ou une génération de nœuds.

Nous envisageons des mesures acoustiques sur l'écoulement de tuyère et mécaniques sur le couple transmis par l'arbre moteur.

Le projet *AIRBAG* a abordé les problématiques du déploiement d'un maillage éléments-finis et de mesure acoustique dans une tuyère.

Le projet qui va être présenté fait partie du programme *PRECODD* de l'année qui suivra la labélisation de *RAPACE*.

#### 4.4 BAR3D 2006-2009

**Contexte et enjeux.** Les plans d'urgence des terminaux, et les plans *POLMAR* départementaux, utilisent des barrages flottants. Ils indiquent souvent la forme du barrage avec un simple trait de crayon.

L'origine du projet vient de cet empirisme qui peut être utilisé, pour définir et représenter, la forme et la position d'un barrage flottant, dans un plan *POLMAR* ou un plan d'intervention d'urgence.

La figure 5 suivante montre un extrait d'un plan *POLMAR*. Il décrit un plan de pose de barrage avec trois segments de droite, placés sur une carte du littoral. Ces segments relient les trois positions de corps-morts, notées *CM1* – 3.

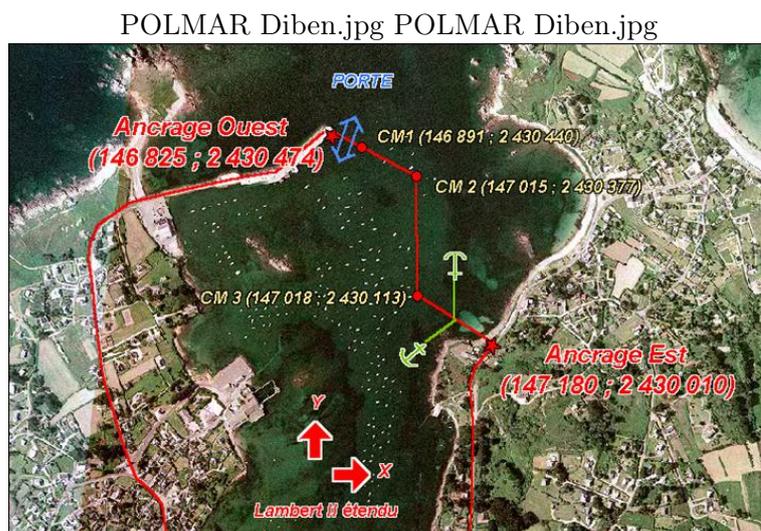


FIG. 5 – Le plan *POLMAR* de la rivière Diben

Parfois la forme du barrage et les efforts dans les ancrages sont calculés avec le logiciel *FORBAR*. Celui-ci résout une équation différentielle non-linéaire d'ordre 1. Elle définit la forme et la tension de chaque tronçon d'un barrage. Elle fournit les efforts de chaque tronçon sur les ancrages. Cette équation est résolue par une méthode de tir. Pour chaque tronçon de barrage, cette méthode de tir converge, lorsque l'intégration du champ de courant à partir d'une extrémité du tronçon, permet à l'autre extrémité d'être proche d'un point, positionné à l'avance.

Le projet a été labellisé par l'*ANR* et le programme *PRECODD* de 2006 sur les éco-technologies et les pollutions marines. Le projet nous a permis d'obtenir en Juillet 2006 le label de recherche de l'*ANR* en tant que coordinateur.

**Objectifs.** Le projet *BAR3D* est la continuation du projet *SIMBAR*, qui a été présenté dans cette section. L'objectif du projet *BAR3D* est de fournir un logiciel de calcul, qui définit la forme prise par un barrage, avec un modèle numérique par éléments-finis, de type membrane.

Le *LNHE* met à notre disposition le logiciel *FORBAR*, dont le *CETMEF* est co-proprétaire, sur lequel viendra se greffer le logiciel *BAR3D*.

La partie scientifique du projet *BAR3D* consiste à améliorer le résultat obtenu par le logiciel *FORBAR*. La méthode d'éléments-finis 3D de membrane est initialisée par le barrage et l'amarrage issus de *FORBAR*. Elle permettra de connaître de façon plus précise la forme et la tension du barrage.

Des nouveaux calculs *SPH* supposent une superposition de la houle avec le courant, et une prise en compte de l'élasticité d'une section verticale de barrage. Les coefficients d'élasticité utilisés par le *LNHE* seront issus de résultats de l'*EIGSI*, obtenus avec le modèle de membrane construit lors de *SIMBAR*.

**Partenariat et montant financier.** L'*EIGSI* coordonne le projet. Le consortium du projet groupe un service technique de l'état, un industriel et trois établissements de recherche. Le consortium est celui de *SIMBAR*, auquel s'est associé *TOTAL – SA* et ses différentes entités, liées aux risques du transport maritime des hydrocarbures. *TOTAL – SA* fournit des moyens matériels et met à disposition du personnel et des installations portuaires pour la réalisation des exercices antipollution du projet.

Le *CEDRE* est l'utilisateur final du logiciel de calcul de barrage par éléments-finis, mis au point par le projet. Le *CETMEF* apporte son expertise dans la construction des plans de pose de barrage, et donne un appui pour les exercices anti-pollution, réalisés dans le cadre du projet. Le *LNHE* de *EDF R – D* réalise des nouveaux calculs de barrage. La modélisation numérique de l'écoulement à surface libre utilise la méthode *SPH*.

Le budget total du projet est évalué à 350 k-euros. Le financement de L'Agence Nationale de La Recherche est de 160 k-euros. Le budget de l'exercice antipollution par barrage, réalisé au Port Autonome de La Rochelle, vient s'ajouter au budget initial.

**Résultats obtenus.** Pour mener cette recherche, nous utilisons un niveau intermédiaire de discrétisation par éléments-finis, basé sur l'élément de type câble. Le logiciel *BAR3D* constitue un chaînage de calculs entre des maillages de barrage de plus en plus précis.

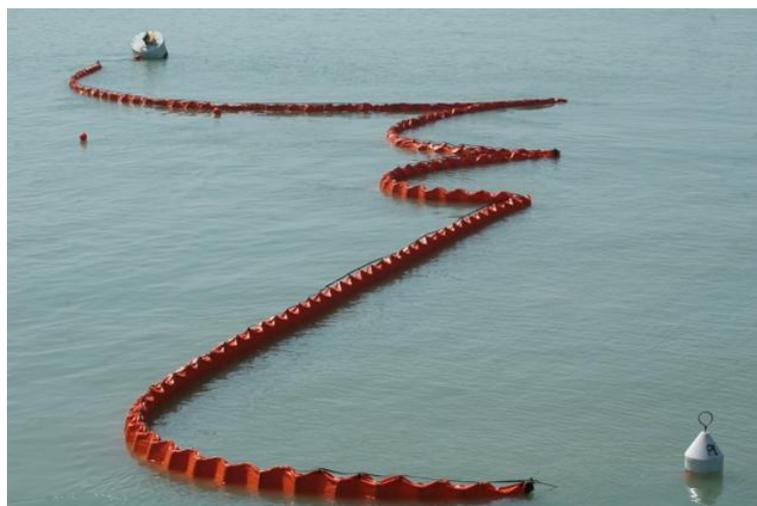
Nous utilisons le maillage déformé du barrage issu de *FORBAR*, pour définir le maillage initial  $l_h$  en éléments-finis de type câble. Ce maillage est ensuite complété suivant la direction verticale, pour fournir le maillage éléments-finis de type membrane  $\omega_h$ . La construction du maillage de *BAR3D* accroît le nombre de nœuds suivant la hauteur du barrage  $Z_h$ , avec le pas de discrétisation  $h$ . Le passage 2D - 3D, est défini par l'injection  $i_{2D}^{3D}$  entre deux grilles.

$$i_{2D}^{3D} : l_h \in \mathbb{R}^2 \longrightarrow \omega_h = l_h \times Z_h \in \mathbb{R}^3$$

Le résultat du logiciel *BAR3D* sera validé par un exercice de barrage à l'échelle 1.

Un pré-exercice, en mai 2008, nous a entraîné à l'utilisation d'un barrage, et à valider le cahier des charges d'essais. Par exemple, une flottabilité suffisante du barrage est nécessaire, en présence d'un courant marin important.

La figure 6 suivante montre le plan de pose de barrage utilisé lors du pré-exercice au Port Autonome de La Rochelle, au début d'une marée montante. Le plan de pose utilise trois doubles-amarrages intermédiaires. Le barrage prend une forme courbe entre chacun de ses amarrages. Le pré-exercice a permis à l'*EIGSI* de mieux connaître le fonctionnement d'un barrage.



PALR.jpg PALR.jpg

FIG. 6 – Le plan de pose de barrage au Port Autonome de La Rochelle

Le résultat du projet est un logiciel de calcul 3D de barrage, greffé au logiciel *FORBAR*. Celui-ci utilise un modèle simple monodimensionnel pour le barrage et ses amarrages.

**Innovations.** Le projet apporte des connaissances pour maîtriser des risques liés au transport maritime. Les impacts du projet touchent la sécurité maritime et la protection côtière contre les pollutions par hydrocarbures.

Un plan de pose de barrage issu du projet concerne le Port Autonome de La Rochelle *PALR*, où a eu lieu le pré-exercice. Le projet a conduit à la réalisation d'un exercice de barrage dans le port, en associant les nombreuses administrations concernées. Un autre plan de pose concerne le Dépôt Pétrolier de Lorient *DPL* où aura lieu un autre exercice de barrage. Cet exercice validera le calcul du logiciel *BAR3D*. Cet exercice est prévu en mai 2009. Le projet permettra d'associer les nombreuses parties prenantes du port de Lorient dans la lutte antipollution.

Le projet contribue ainsi à la maîtrise des risques liés au déchargement d'hydrocarbure à un appontement.

Une formation à *BAR3D* sera organisée pour un personnel non-spécialiste des méthodes numériques utilisées. Un workshop a été organisé en décembre 2008 pour identifier des synergies possibles entre différents logiciels de calcul dédiés à la protection côtière.

**Extension et transfert.** L'utilisation du logiciel *BAR3D* concerne les plans *POLMAR* et les plans d'urgence des terminaux qui utilisent des barrages flottants.

Une extension importante du projet intéresse *EDF* et la protection des *CNPE*, les centrales nucléaires de production d'énergie.

Pour sa ressource en eau, une *CNPE* est souvent située sur le littoral, ou en bordure de fleuve. Ses eaux de refroidissement doivent être protégées contre les pollutions par hydrocarbures. Le dispositif adéquat par barrage flottant pourra être défini en utilisant les résultats de nos projets.

Les *CNPE* pourraient ainsi bénéficier des retombées du projet, par des échanges entre l'ingénierie d'*EDF* et *EDF R – D*, partenaire du projet.

L'exploitation commerciale de *BAR3D* reste en dehors du projet de recherche. Les droits de propriété intellectuelle issus de *BAR3D* suivront l'accord de consortium signé en Avril 2009. Les

services juridiques de *EDF* et de *TOTAL* ont participé de façon importante à son établissement. Nous présentons maintenant la conception d'un projet de recherche européen.

#### 4.5 WATERBALLOON 2003-2006

Il s'agit d'un projet interne *EIGSI* issu de discussions et de colloques sur l'eau. Il a permis des réflexions sur la diversification de nos applications dans le domaine de l'eau. Nous avons débuté des collaborations, par exemples en chimie et en bio-technologie. Un projet européen a été construit et présenté lors du 6ème *PCRD*, dans le domaine du changement global et du développement durable. Ce projet n'a pas été retenu. Les principales raisons viennent de la complexité et de la rentabilité du dispositif vis à vis de l'existant. Les disciplines scientifiques intervenant dans le projet ont été nombreuses. Nous décrivons de façon succincte le projet pour montrer l'ampleur du travail nécessaire, pour la conception et la coordination d'un projet de recherche européen.

**Contexte et enjeux.** Les projets présentés *SIMBAR* et *BAR3D* concernent la protection côtière contre les pollutions marines accidentelles. Ces projets ont en commun la modélisation des barrages antipollution. En 2003, nous avons entrepris la conception d'un projet multidisciplinaire sur la gestion des ressources en eau, dans les zones côtières, arides.

L'idée du projet *WATERBALLOON* dérivait du transport maritime d'eau, dans de grands conteneurs souples, flottants, remorqués par un navire.

Le domaine de recherche sur les ressources alternatives en eau suit la Directive Européenne Cadre sur l'eau *DCE* – 2010, le plan d'action *ETAP*, et de nombreuses autres recommandations.

Le thème des régions côtières arides est programmé dans le 7ème *PCRD* pour 2010. Ce thème est l'objet du groupe de travail n°1 de la plate-forme technologique européenne sur l'eau *WSSTP*.

**Objectifs.** Le projet concernait le stockage temporaire d'une ressource en eau, dans un réservoir souple flottant. Ce réservoir d'eau est construit en matériau souple. La ressource en eau stockée peut être des eaux de récupération. Un système de traitement d'eau par photocatalyse a été envisagé, de même que l'utilisation d'une énergie renouvelable pour la circulation de l'eau. La durée du stockage correspond à l'écart entre des périodes sèche et humide, du type Méditerranéen par exemple.

Ce réservoir d'eau est formé d'un domaine  $\omega$ , formant une enveloppe fermée, contenant un fluide incompressible  $\Omega_1$  de densité 1. Le réservoir flotte sur un fluide incompressible  $\Omega_2$ , de densité plus élevée, l'eau de mer. Le domaine  $\Omega_2$  possède une surface libre. Ce réservoir est amarré sur le fond marin, ou le long d'un quai. En plus d'être soumise aux tensions des amarres et aux efforts de pression  $p$  et du courant  $V$ , du fluide porteur  $\Omega_2$ , la membrane  $\omega$  subit la pression  $p$  et la vitesse interne  $V$  du fluide stocké  $\Omega_1$ .

**Partenariat et montant financier.** Le consortium du projet a réuni jusqu'à 16 partenaires, universitaires et industriels.

L'*EIGSI* était coordinateur. Ses travaux de recherche concernaient l'énergie renouvelable utilisée, et le couplage mécanique structure-fluide du réservoir avec les deux fluides. La chimie de l'eau et son traitement par photocatalyse auraient été réalisés par l'Université de Poitiers, l'*ESIP* et le *CNRS*. La biologie de l'eau était traitée par l'Université Mohamed Premier d'Oujda au Maroc. L'Université Technique de Riga en Lettonie, a étudié le bio-film à l'interface entre l'eau et

la membrane. Les matériaux souples étaient définis par l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Textiles, *ENSITM* de Mulhouse. La géologie et la géophysique du site étaient étudiées par l'Université de Bucharest *UB-FGG*, et l'Institut National de Géologie Marine *GEOECOMAR* de Bucharest. La gestion intégrée de l'eau était traitée par l'Université Américaine du Liban. La gestion de l'eau dans les zones arides était le domaine d'activité de l'Université de Münster et de son centre de recherche *CER*, pilote du projet *MEDIS*. La physique des capteurs était abordé par l'Université de Cranfield.

Un point fort de notre projet est que les industriels réunis dans le consortium, sont tous des PME. *AQUARIUS*, *MATRIX Int.* et *Argyle Maritime Ltd* sont des industriels du transport maritime de l'eau. *HEYTEX* était le fournisseur du matériau textile du réservoir. *ECOIND* de Bucharest était le centre de recherche, analysant l'évolution de la qualité de l'eau stockée. *GESTE* aurait réalisé l'analyse des risques du système. *SC - ISPIF* aurait effectué l'analyse d'impact sur le littoral. *COLBAS* conçoit des capteurs liés au suivi de la qualité de l'eau, pendant son stockage. *MARWIK* fournit un système de pompage, ou de séparation de contaminants, basé sur un effet centrifuge.

Le budget du projet atteignait 2.5 m-euros.

**Résultats obtenus.** Nous avons effectué un premier travail sur le couplage structure-fluide et rédigé en 2004 une communication [14] publiée par l' "International Federation of Automatic Control" *IFAC*, lors de son workshop sur la gestion intégrée de l'eau.

La figure 7 suivante montre un essai de mesure de trainée, réalisé par des élèves-ingénieurs *EIGSI*. Le réservoir possède trois flotteurs pneumatiques, accroissant sa stabilité, et permettant de régler sa ligne de flottaison.

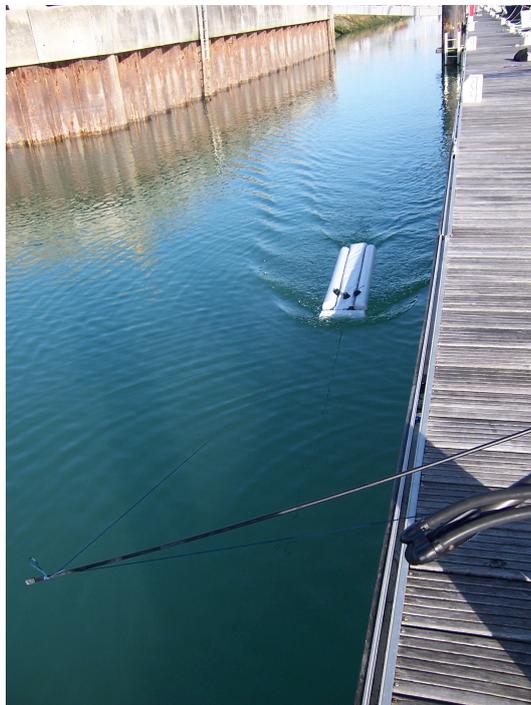


FIG. 7 – Le WATERBALLON à échelle réduite, en traction

Nous avons réalisé une étude sur la perte de charge de l'écoulement dans un système de traite-

ment d'eau par photocatalyse d'architecture tubulaire *CPCR*. L'écoulement passe dans des tubes transparents sur un réactif d'oxyde de titane. Nous avons élaboré une méthode expérimentale pour connaître la puissance nécessaire pour faire circuler l'eau. Lorsque le système a une surface importante, cette puissance pourrait être réduite en modifiant l'architecture du dispositif.

**Innovations.** L'avantage concurrentiel du projet est d'utiliser peu d'énergie et une occupation du sol négligeable. Il constitue une alternative au procédé de dessalement d'eau de mer.

Notre projet prend en compte la spécificité du littoral, dans la gestion de l'eau par bassin versant. Le projet a un impact sur l'environnement et la santé, en valorisant une ressource alternative en eau.

Le concept a été protégé par le dépôt de deux enveloppes *SOLEAU*, sur des principes technologiques propres au stockage d'eau dans une réserve souple flottante amarrée.

**Extension et transfert.** Le remorquage d'un réservoir de grande taille pose une importante difficulté sur le risque et le pilotage maritime.

La conception de ce projet nous a donné de la reconnaissance auprès de nombreux établissements européens, universitaires et industriels. Des rencontres a posteriori, auprès de différents interlocuteurs, nous ont fait apprécier l'intérêt suscité par l'idée du *WATERBALLOON*.

Notre intérêt sur les activités de recherche européenne, nous a conduit en 2004, d'être expert-évaluateur de projet de recherche, dans le programme "New Emerging Science and Technologies" *NEST* du 6ème PCRD. Ce programme "blanc" concerne la recherche interdisciplinaire, aux frontières de la connaissance.

Nous avons participé à l'organisation de deux forums internationaux sur l'eau et l'innovation, puis sur l'eau et la santé, en 2006 et 2008.

#### **4.6 Liste des brevets, workshops et contrats de recherche obtenus ou déposés**

Nous avons deux brevets internationaux *ALSTOM*, ayant suscités trois élargissements des revendications, deux enveloppes *SOLEAU*, et deux accords de consortium, précisant les droits de propriété intellectuelle des projets *RAPACE* et *BAR3D*.

– brevets

1. J.J. Laporte, E. Tassilly et F. Muttin, Dispositif A Eléments Gonflables Pour La Protection Des Véhicules Contre Les Chocs, Brevet français n° 9707769, Gec-Alsthom Transport, Juin 1997. 1. Extension : Inventors : Jean-Jacques Laporte, Eric Tassily, Frederic Muttin. Devices with inflatable members for protecting vehicles against impacts - Assignee. GEC Alsthom Transport SA. Application. No. 100960 filed on 1998-06-22, 1998 US-patent n°6,039,349, <http://www.uspto.gov>, March 21, 2000.
2. J.J. Laporte, E. Tassilly et F. Muttin, Procédé De Protection Contre Les Chocs Entre Deux Véhicules Au Moyen D'Au Moins Un Élément Gonflable Et Dispositif Pour Sa Mise En Oeuvre, Brevet français n° 9707770, Gec-Alsthom Transport, Juin 1997. 2. Extension : Inventors : Jean-Jacques Laporte, Eric Tassily, Frederic Muttin. Method of protection against impacts between two vehicles by at least on inflatable member and device for implementing it - Assignee. GEC Alsthom Transport SA. Application. No. 102004 filed on 1998-06-22, 1998 US-patent n° 6,031,449, <http://www.uspto.gov>, February 29, 2000.
3. Elargissement des revendications des brevets (1-2) aux trois brevets suivants : US Patents n°6,497,183 (24/12, 2002) ; US Patents n° 6,454,326 (24/09, 2002), US Patents n°6,443,510 (3/9, 2002)

4. F. Muttin, C. Deglaire, L. Chedeville, Enveloppes Soleau (2), Waterballoon, 10 Avril 2003
  5. Accord de consortium *RAPACE* Mr Bruno Maerten Directeur Général GEOCEAN, Mr Gilbert Le Lann Directeur Général CEDRE, Capitaine de Frégate Christian Nedelec CEPPOL, Mr Frédéric Muttin EIGSI, Mr Jean-Luc Laurent Directeur Général LNE, Mr Gilles Michel Président CYBERNETIX, Mr Thierry Thomazeau Directeur THOMSEA, Accord de Consortium projet RAPACE, Ref : ANR-05-ECOT-018, 19 Mai 2008.
  6. Accord de consortium *BAR3D* Mr Frédéric Muttin EIGSI, Mr Georges Peigné Adjoint au Directeur CEDRE, Mr Geoffroy Caude Directeur du CETMEF, Mr Laurent Perotin Chef du Département LNHE-EDF, Mr Jean-Michel Gires Directeur de la Direction Développement Durable et Environnement TOTAL SA, Accord de Consortium projet BAR3D, Référence : ANR-06-ECOT-003-01, Numéros ADEME 0694 C 0067 , 0068 et 0069, 7 Avril 2009.
- workshops internationaux organisés
- Nous avons co-organisé trois congrès internationaux :
1. NUMIFORM en 1992 à Sophia-Antipolis,
  2. le Forum Eau et Innovation à Montréal en 2006,
  3. le Forum Eau et Santé à Sup de Co La Rochelle en 2008.
- Nous avons organisé à l'*EIGSI* trois workshops internationaux, dans le domaine de l'antipollution marine.
1. First International Workshop Oil Spill Containment Boom, Real problems to motivate Industrial and Scientific approaches, *EIGSI* La Rochelle, college authorities : French Navy, CEDRE, French Transportation Administration CETMEF, TOTAL group, Industrial college : ZODIAC, Ro-CLEAN, Scientific college : Oxford University, University of Cambridge, EIGSI, LNHE EDF R-D, 2-3 Mars 2006.
  2. Second International Workshop, Oil spill containment boom and nets, Real Problems in Numerical Modelling and Dissemination of Best Practices, *EIGSI* La Rochelle, Participants : CEDRE Brest, LNHE EDF R-D Chatou, IFREMER Centre de Brest, Universités de Rennes et de Poitiers, CETMEF, CEPPOL, MUSTHANE, THOMSEA, GEOCEAN, 5-6 Octobre 2006.
  3. 3rd International Workshop, Oil spill containment boom, Numerical methods and softwares for coastal protection, Real Problems in Numerical Modelling and Dissemination of Best Practices, *EIGSI* La Rochelle, Participants : LNHE EDF R-D Chatou, IFREMER Centre de Brest, Universités de La Rochelle et de Rennes, University of Houston, CEDRE Brest, TOTAL SA, Conseil Régional Poitou-Charente , 11-12 Décembre 2008
- contrats de recherche obtenus, depuis 1994
1. AIRBAG 1, AIRBAG 2, AIRBAG 2bis
  2. BOUEE 1, BOUEE 2
  3. SIMBAR
  4. RAPACE
  5. BAR3D
- contrats de recherche déposés et non obtenus, depuis 2003
1. Projets Nationaux : DRAMERMA (ACI Nouvelles Interfaces des Mathématiques), TRAP, TAECCO, CHREC, PARABAR, TICTAC
  2. Projets régionaux Poitou-Charente : FILO, CABOU, SIMPLIFI
  3. Projets Européens :  
FP6 : WATERBALLOON 1, SEWCREW, OCAWAMBA, WATERBALLOON 2

ERA-NET AMPERA : BARADA

INTERREG SUDOE IVB : POLCLEAN

Nous avons monté deux expéditions scientifiques :

- Les deux séries de crash-tests d’une cabine de tramway *CITADIS* avec un *AIRBAG* à l’échelle 1 à l’Université de Valenciennes en 1998.
- L’exercice antipollution *BAR3D* au port autonome de La Rochelle en mai 2008. Il existe une expédition en préparation, avec un exercice antipollution en mai 2009, au nouvel appontement pétrolier du port de Lorient.

## 5 Direction des étudiants de 2ème et 3ème cycle

### 5.1 Etudiants de 2ème cycle, élèves-ingénieurs de l’*EIGSI*

De nombreux élèves-ingénieurs de l’*EIGSI* et de l’Ecole Centrale de Lille ont été motivés par le projet *RAPACE*. Le domaine des drones est très prisé par les élèves-ingénieurs. Ils ont été nombreux à mener un projet de R-D de 4ème et de 5ème année, ou un projet lors d’échange *SOCRATES*. Ils ont été plusieurs à effectuer leur stage ingénieur en recherche technologique dans une entreprise industrielle partenaire. Certains d’entre-eux pourront trouver avec cette entreprise partenaire leur premier emploi en tant qu’ingénieur R-D.

Un élève-ingénieur de l’*EIGSI* est très motivé par le projet *BAR3D*, et les méthodes numériques utilisées. Par le biais d’un stage volontaire de la part de l’élève, il a été possible de l’embaucher à temps partiel. Il a développé une activité de recherche à partir de la méthode utilisée par *FORBAR*, et sur le chaînage vers la méthode d’élément-fini de type câble. D’autres élèves-ingénieurs ont été très motivés pour réaliser leur projet de R-D de 5ème année. Ils ont participé à la définition de l’instrumentation des essais de barrage, et au développement du logiciel *BAR3D*.

Les travaux sur le *WATERBALLOON* ont mis à contribution deux élèves-ingénieurs de l’*EIGSI* en avril 2003. Deux groupes d’élèves-ingénieurs de l’*EIGSI* ont été très motivés sur ce projet en 2006. Un groupe de quatre élèves a étudié le dimensionnement du système de traitement d’eau par photocatalyse. Un autre groupe de quatre élèves a réalisé la construction d’une maquette à échelle réduite, puis à effectué des essais de trainée hydrodynamique.

Nous allons préciser notre activité d’encadrement d’étudiants de 2ème cycle, sur des activités de recherche, en donnant quelques exemples.

En 2002-2003, Cyrille Deglaire a effectué son projet de R-D de 5ème année au début de la conception du projet *WATERBALLOON*. Les résultats obtenus ont suggéré le dépôt de deux enveloppes *SOLEAU*. Cyrille Deglaire occupe aujourd’hui un emploi dans lequel il est responsable d’un réseau d’approvisionnement d’eau potable à une large population (4 millions).

En 2004, deux élèves-ingénieurs de l’Université de Valence ont contribué à nos recherches dans un contexte international. Leurs sujets de R-D étaient la protection des zones côtières contre l’érosion et les inondations, avec des dispositifs en matériau souple.

En 2007-2008, Olivier Pacoud a effectué son projet de R-D sur la problématique de la récupération et du remorquage de conteneurs tombés à la mer. Le dispositif élaboré permet de remorquer un conteneur avec une solution innovante, composée de boudins flottants, et d’un réseau de câbles entrecroisés.

Un tel travail permet à l’élève-ingénieur de situer la démarche de recherche par rapport à l’industrie. Il offre ainsi aux jeunes diplômés une vision et des opportunités.

La Commission du Titre Ingénieur (CTI) recommande l’implication des élèves-ingénieurs de l’*EIGSI* dans ses activités de recherche.

**Remarque.** La sensibilisation des jeunes aux sciences est une problématique importante. A l'initiative de Michel Théra, professeur à l'Université de Limoges, nous avons organisé une demi-journée de sensibilisation des jeunes aux sciences. Le sujet concernait les mathématiques et l'environnement. Les deux intervenants d'*EDF* et de *METEO – France* étaient spécialisés dans le calcul scientifique et des problématiques liés aux marées noires.

## 5.2 DRT

**Habilitation.** Le *DRT – GISI* a été le diplôme de recherche technologique en Génie Informatique et Systèmes Industriels de l'Université de La Rochelle. Il possédait une filière pour les élèves-ingénieurs. Nous avons piloté à l'*EIGSI* cette filière.

Le *DRT* de l'Université de La Rochelle était dirigé par le laboratoire d'informatique *L3I*, auquel l'*EIGSI* s'était associée. Il était accessible aux étudiants d'*IUP* de l'Université pour deux années, et aux élèves-ingénieurs *EIGSI* pour une année. Le *DRT* s'est appelé *GISI* " Génie Informatique et Systèmes Industriels " pour sa première période d'habilitation 1996-1999, puis *TISI* " Technologies de L'Informations et Systèmes Industriels " pour sa seconde habilitation 2000-2003, période durant laquelle l'*ISIL* de Liège s'était associée. Michel Mesnard était le responsable de la formation pour l'Université, et nous étions le responsable côté *EIGSI*. La formation des étudiants avait une partie adaptée à la recherche technologique. L'anglais scientifique donnait une formation à la rédaction. La protection industrielle permettait une sensibilisation aux brevets. La connaissance de l'entreprise industrielle était un module réservé aux ingénieurs-maîtres, donné par un enseignant de l'*EIGSI*. L'effectif du *DRT* était en moyenne de 10 à 12 ingénieurs-maîtres, plus 2 à 3 élèves-ingénieurs *EIGSI*.

**Rôle de l'EIGSI et notre rôle.** La valorisation principale pour un diplômé *DRT* était d'obtenir un emploi créé par ses recherches. Quatre exemples ont existé à *PSA* et à *ARGONNE* au "Department of Energy" *DOE*. Il s'agissait de recherches sur la simulation des véhicules hybrides. Ces recherches ont conduit à la création d'activités nouvelles, et donc d'emplois de haute qualification.

Une retombée indirecte de l'encadrement de *DRT* a été la reconnaissance par l'état du diplôme d'ingénieur *EIGSI*. Le diplômé *DRT* pouvait être travailleur comme chercheur aux USA, par exemple à *ARGONNE-DOE*, si son diplôme d'ingénieur était reconnu par l'état.

La coordination de la filière ingénieur-*DRT* nous a demandé d'organiser les soutenances avec un jury université/industrie, rédiger les PV de soutenance, de suivre le principal délivrable, qu'était le rapport de *DRT*, de sélectionner les candidats en organisant un jury d'admission spécifique avec un PV, de faire la promotion du diplôme auprès des élèves-ingénieurs, et de nous charger des relations industrielles avec les entreprises impliquées.

**Etudiants encadrés.** Le co-encadrement de deux étudiants par l'*EIGSI* et *ALSTOM*, a permis le développement du projet *AIRBAG*.

Pendant la période 1996-1999, nos deux étudiants-*DRT* ont développé des recherche en modélisation numérique, en simulation, et en essais, pour le projet *AIRBAG*.

Ils ont eu tous les deux une formation au logiciel *PAM – SAFE* de la plate-forme *PAM – CRASH* d'*ESI*. Cela a intégré à nos recherches les capacités d'un outil numérique performant pour la modélisation des systèmes airbags. Leurs travaux de recherche visaient le recalage d'un modèle numérique à partir d'essais.

Grâce au *DRT*, d'autres recherches technologiques ont avancé sur le véhicule hybride, le transport intelligent, chez d'importants industriels et centres de recherche, dont *PSA* et l'*INRIA*.

**Arrêt du DRT.** Le *DRT* de l'Université de La Rochelle - *EIGSI* a été en nombre de diplômés, un des tous premiers *DRT* Français.

La réforme du *LMD* a laissé de côté les formations positionnées entre le Master et le Doctorat, dont fait partie le *DRT*.

L'arrêt du *DRT* aurait pu conduire à le transformer en année probatoire du doctorat. Le *L3I* l'avait envisagé avant de le remplacer par la filière classique du doctorat. Pour l'*EIGSI* l'arrêt du *DRT* a eu un impact important en supprimant la possibilité d'un bac+6 pour ses étudiants. L'impact a aussi été important auprès des entreprises comme *PSA*, et pour nos activités propres de recherche.

Nous allons présenter notre co-encadrement de trois doctorants et d'un post-doctorant.

### 5.3 Doctorants

Les premiers doctorants, Alima Kamara et Michael Miles ont été co-encadrés à l'Ecole des Mines de Paris de 1989 à 1992. Le doctorant suivant, Mustapha Benaouicha a été co-encadré avec l'Université de La Rochelle en 2004-2005. Chaque doctorant a pu contribuer à la rédaction d'une publication ou d'une communication. A la suite de son doctorat, Alima Kamara a été recrutée dans une Université de Côte d'Ivoire. Michael Miles et Mustapha Benaouicha ont un emploi dans l'enseignement supérieur, aux Etats-Unis et en France.

#### Alima Kamara

**Contexte.** Le modèle développé a été appliqué aux écoulements du procédé de fonderie, dans le cadre d'un groupe de recherche du *CEMEF* de l'Ecole des Mines de Paris.

**Contenu de la thèse.** L'objet de la thèse d'Alima Kamara est la résolution numérique du modèle de turbulence  $k - \epsilon$  dans le cadre des équations de Navier-Stokes pour un domaine  $2D$  à surface libre. La formulation utilisée est Lagrangienne réactualisée. Le modèle numérique est basé sur la méthode des éléments-finis.

**Résultat et transfert.** La viscosité turbulente additionnelle est suffisante pour stabiliser le schéma d'intégration numérique temporel des équations de Navier-Stokes écrites en variables lagrangiennes réactualisées, et cela pour une viscosité du fluide proche de celle de l'eau. Le pas de temps du schéma d'intégration peut être identique à la fois pour réactualiser le maillage Lagrangien et pour résoudre les équations de transport de  $k$  et de  $\epsilon$ .

**Insertion des résultats.** Les travaux de thèse nous ont permis de mieux connaître le procédé de fonderie, et d'avoir une première expérience dans la simulation numérique de la turbulence par la méthode des éléments-finis. Cette expérience sera utile au projet *SIMBAR* pour des travaux sur la méthode *SPH* et la turbulence, que le *LNHE* utilise pour les barrages.

#### Mickael Miles

**Contexte.** Le modèle a été développé au *CEMEF*, dans le cadre du consortium national d'industriels de forgeage *Forge - An2000*.

**Contenu de la thèse.** La thèse de Mickael Miles est la résolution numérique du couplage entre un écoulement viscoplastique incompressible, et la déformation d'un solide élastique. Le modèle est  $2D$ . Il possède un algorithme de contact. Il impose à l'interface fluide-solide, la continuité des déplacements normaux, et la continuité de la composante normale du tenseur des contraintes.

**Résultat et transfert.** Il existe des similitudes entre les relations comportementales et les équations d'équilibre d'un solide élastique et d'un fluide Newtonien. Le tenseur des déformations d'un solide et le tenseur des vitesses de déformation d'un fluide font intervenir de la même façon l'opérateur gradient sur le déplacement du solide ou la vitesse du fluide.

Les maillages des domaines élastiques et du domaine viscoplastique ont été construits avec la même structure des données. Cela facilite la mise en données du calcul où plusieurs maillages interagissent. La fonctionnelle d'énergie de *Norton – Hoff* peut être adaptée à un milieu élastique. La construction d'un solveur commun est ainsi facilitée. Il permet d'adapter le même type de calcul pour un milieu viscoplastique ou un milieu élastique.

**Insertion des résultats.** Cette similitude entre fluides et solides est exploitée par le *LNHE* dans le cadre de *BAR3D* pour réfléchir à un modèle *SPH* complet de l'écoulement et du barrage. Les travaux de thèse ont concerné le procédé de forgeage.

## Mustapha Benaouicha

**Contexte.** Le démarrage de l'avant-projet du *WATERBALLOON* a permis à Mustapha Benaouicha, doctorant de l'*EIGSI* de démarrer son doctorat. Cette thèse a été financée par le département de la Charente-Maritime. Elle se situe dans le cadre du projet de recherche *WATERBALLOON* proposé au 6ème PCRD. La problématique originale est l'étude des modes propres des réservoirs flottants de grande dimension, pendant leur remorquage en mer. Dans un premier temps, il s'agit d'étudier le comportement d'un réservoir flottant, lors de son amarrage en mer côtière.

**Contenu de la thèse.** La thèse de Mustapha Benaouicha est la résolution numérique du couplage entre un fluide Newtonien incompressible à surface libre, et une membrane élastique en grands déplacements, contenant un autre fluide incompressible. Le second fluide est moins dense que le premier. Il est dépourvu de surface libre. Le comportement des domaines "fluide" est régi par les équations de Navier-Stokes  $2D$  et les contraintes d'interfaces avec la membrane et la surface libre. Le comportement du domaine de la membrane en  $2D$  est celui d'un câble élastique instationnaire, soumis aux efforts de pression des deux fluides.

**Résultat et transfert.** La formulation *ALE* " Arbitrary Lagrangian-Eulerian " permet de proposer une alternative par rapport à une formulation Lagrangienne réactualisée. Le principal avantage concerne le maillage du domaine fluide. Il dégénère moins vite lorsque la formulation devient Eulérienne et que le maillage tend à être fixe. L'inconvénient est l'introduction d'un champ de vitesse arbitraire propre au maillage. Une présentation des travaux de thèse a eu lieu lors de la semaine de la science en Octobre 2004.

**Insertion des résultats.** Les travaux de thèse ont donné des résultats numériques intéressants. La méthode *ALE* est adaptée aux interactions fluide-structure pour lesquelles le comportement de la structure suit les équations de Lagrange.

**Remarque.** Nous rappelons que la situation de l'*EIGSI* ne lui permettait pas de recevoir des doctorants avant 2004. Cela explique la discontinuité dans l'encadrement de nos doctorants, et l'encadrement d'un post-doctorant pour contribuer à nos recherches et réaliser un projet comme *SIMBAR*.

## 5.4 Encadrement PostDoc

La première année du projet *SIMBAR* a conduit Farid Boushaba, doctorant de l'Université d'Oujda, à effectuer une mission de chercheur en tant que salarié de l'*EIGSI*.

Le sujet du stage post-doctoral de Farid Boushaba concerne l'application du modèle numérique de membrane aux barrages anti-pollution. Ce stage s'est déroulé dans le cadre d'un CDD d'un an, en tant que chercheur *EIGSI*. Il a été financé par le projet *SIMBAR*.

Le travail de recherche a mis en évidence la nécessité d'utiliser un nombre assez important d'itérations, jusqu'à 500 ou plus, pour résoudre par la méthode de Newton-Raphson les équations de câble ou de membrane, pour calculer un barrage.

À la suite de son post-doc Farid Boushaba a été recruté au *LCH*, le laboratoire d'Hydraulique de l'*EPFL*.

## 5.5 Liste de projets de R-D de 4ème et 5ème années et des étudiants de 3ème cycle encadrés

Exemples de projets R-D d'élèves-ingénieurs

- Projet 1999  
Borderie, Sanda, Lahousse, Veslin, Pelissier, Flottabilités Additionnelles pour Navire de Commerce, Projet *CARGO*
- Projet 2003  
Xavier Maller, Recalage du Coefficient d'Ajutage d'un Event d'Airbag, Projet *AIRBAG*
- Projets 2004  
Beatrice Antony, Nicolas Dumant, Loïc Dupont, Faisabilité d'un Stockage Souple en Surface de Déchets TFA et FA à Vie Courte.  
Cyril Redien, Ludovic Mureau, Lionel Viault, Aide à la Rédaction d'un Projet de Recherche Européen sur le Stockage d'Eau Douce dans une Enveloppe Souple, Immergée en Zone Côtière.  
Lees Adrien, Delassus Xavier, Récupération en Mer de Déchets Flottants.
- Projets 2005-2006  
Coralie Mommée, Marie Gabrielle Ameil, Adrien Josse, Olivier Cupif, Etude du Système de Traitement d'Eau par  $TiO_2$  du Waterballoon.  
Vincent Bastien, Steven Blanchard, Vincent Le Ricousse, Alexis Turcaud, Conception d'une Maquette et Essais de Traction d'un Waterballoon.  
Jean Zurek, Alban Dilasser, Guillaume Louf, Ludovic Gérard, Analyse Mécanique d'un Filtre pour Contenir une Pollution Hydrocarbure dans un Chenal Ostréicole.
- Projets 2006-2007  
Guillaume Dezamy, Jean-Baptiste Derennes, Jeremy Dugor, Sylvain Bredon, Baptiste Balzeau, Modélisation Bidimensionnelle du Risque de Pollution dans le Pertuis Breton.

Chambon Frédéric, Garé Edouard, Occelli Renaud, Pacoud Laurent, Pitel Matthieu, Etude de la Récupération de Conteneurs Perdus en Mer.

Damien Causse, Laetitia Debos, Damien Destrez, Jérémie Gastaud, Florian Petit, Instrumentation d'un Barrage Flottant.

Cédric Bekaert, Maxence Fouré, Pierre-Yves Hureau, Julien Labranche, Geoffrey Morigny, Amélioration de la Conception du Barrage de Récupération des Déchets sur l'Adour.

*DRT* d'élèves-ingénieurs *EIGSI*

- GROLLIER S. 1996-1997, GEC ALSTHOM, modélisation - airbag Conception et Développement d'un Système Absorbeur d'Energie pour Tramway Auteur : Stéphane Grollier le 07/11/97
- PLOUZIN O. 1997-1998, ALSTOM, expérimentation - airbag Dimensionnement D'un Absorbeur D'Energie De Collision Auteur : Olivier Plouzin (non soutenu)
- AUDIOT N. 1999-2002, PSA Peugeot Citroën, modélisation - véhicule hybride Changements de rapport sur architecture hybride simple arbre : modélisation, simulation et validation sur prototype Auteur : Nicolas Audiot le 19/03/2002
- MONNET G. 2000-2001, ARGONNE National Laboratory , Center for Transportation Research, modélisation - véhicule hybride Réalisation d'outils logiciel pour l'étude et le contrôle des chaînes de tractions hybrides Auteur : Gilles Monnet le 1/09/2001
- DEVILLE E. 2001-2002, ARGONNE National Laboratory, Transportation Technology R-D Center, modélisation - véhicule hybride Développement de PSAT, Imogiciel de simulation de chaînes de tractions avancées Auteur : Eric Devillé, le 1/09/2002
- BESNIER F. 2002-2003, ARGONNE National Laboratory, Transportation Technology R-D Center modélisation - véhicule hybride Dual source energy storage potential for fuel cell vehicle applications Auteur : François Besnier, le 27/09/2003

Doctorants co-encadrés

- KAMARA A. 1989-1991, Ecole des Mines de Paris, mécanique numérique - fonderie Contribution à la modélisation par éléments finis des écoulements turbulents. Application au remplissage des moules Auteur : Alima KAMARA le 01/02/1994
- MILES M.-P. 1991-1992, Ecole des Mines de Paris, mécanique numérique - forgeage Couplage thermique et mécanique en forgeage à chaud Auteur : Michael Paul MILES le 01/05/1995
- BENAOUICHA M. 2004-2005 ,Université de La Rochelle, couplage fluide-structure des réservoirs souples Auteur : Mustapha BENAOUICHA, Décembre 2003-Septembre 2007
- BOUSHABA F. 2004, Université d'Oujda, stage post-doctoral sur la modélisation des barrages flottants Auteur : Farid BOUSHABA, Janvier 2004-Novembre 2004

Publication ou communication des doctorants co-encadrés

- KAMARA A.  
D. Elkaïm, Y. H.Kim, F. Muttin, M. Bellet, A. Kamara, J.L. Chenot, Turbulent Finite Element Lagrangian Computations of Metal Flow in Moulds with a Two-Equation Model, International Journal for Numerical Methods in Fluids, (accepté si modifications, 1992)
- MILES M.-P.  
M. P. Miles, F. Muttin, L. Fourment et J.L. Chenot, Modélisation de la déformation élastique d'un outil de forge, Colloque National en Calcul de Structure, Giens, 1993.
- BENAOUICHA M.  
M. Benaouicha, A. Hamdouni, et F. Muttin, Modelling of a Mitigation Water Balloon Technique for Scarcity in Coastal Sea Region, International Federation of Automatic Control, IFAC Workshop on Modelling and Control for Participatory Planning and Managing Water Systems, Venice, 29 september-1 october 2004.

– BOUSHABA F.

Boushaba, F., Nouchi, S., Benelmostafa, Y. et Muttin, F., Structural Modelling of Oil Spill Containment Booms by the Finite Element Method, Proc. international Oil Spill Conference IOSC 2005, Index by year - title pp. 424, International Oil spill conference 2005.

## 6 Projets de recherche futurs

Le contexte est à la fois Européen, Inter-régional, National et Régional.

La communication du 3 septembre 2008 de la Commission Européenne sur une stratégie de recherche marine et maritime mentionne la complexité de ces systèmes. Les interactions dans les domaines marines et maritimes conduisent à mener des recherches inter et multidisciplinaires.

Dans le domaine des technologies marines, il est important de progresser d'avantage dans l'évaluation de risques, l'incidence d'une pollution, les énergies renouvelables.

Nous avons été expert-évaluateur en 2004 dans le programme *NEST*-Adventure. Le programme *NEST* (FP6), et l'*ERC* (FP7), s'adressent aux idées de recherche émergentes, transdisciplinaires. Il s'agit de recherche aux frontières de la connaissance, de recherche fondamentale, sur des phénomènes à la frontière des capacités de la modélisation mathématique, par exemple ceux du projet *NETIAM*, présidé par le professeur John Ockendon de l'Université d'Oxford.

Le programme blanc de l'*ANR* est un tremplin vers l'*ERC*. Pour 2009, l'*ANR* met en place de nombreux programmes intéressants pour notre recherche : Blanc, Syscomm (complexité-optimisation), Cosinus (calcul intensif), Ecotech (éco-technologies), Risknat (risques naturels-inondations), CSOSG (sécurité globale-maritime).

Il s'agira de dépasser les frontières traditionnelles entre chercheurs, décideurs et administrations publiques, science et technologie, disciplines scientifiques (mathématiques appliquées, géographie, ...) et secteurs industriels (marine, maritime, énergie, ...).

Par exemple, la géographie physique permet d'étudier les courants marins, la morphologie et la bathymétrie côtières, à l'échelle d'un plan de protection par barrage flottant. La géographie économique permet d'étudier la fonction coût associée à l'optimisation d'un plan de lutte par barrage, en intégrant des cartes de sensibilité du littoral. Nos recherches et nos innovations devront être multidisciplinaires et multisectorielles (transport maritime, ostréiculture, pêche).

Des nouvelles formes de partenariat de recherche (nationaux, interrégionaux, européens) privilégieront toutes les parties prenantes, pour créer un dialogue continu entre les chercheurs (*ERANET AMPERA*, *SHF*, *ATMA*), les responsables politiques (élus régionaux Poitou-Charente), les industriels (marine, maritime, transport) et les représentants de la société civile, l'association du Grand Littoral Atlantique *AGLIA*, ostréiculteurs, pêcheurs, l'association des armateurs espagnols *IVEAEMPA*.

L'agence des Aires Marines Protégées *AMP* a été créée en 2008. Un parc marin est en cours d'élaboration entre l'estuaire de La Gironde et les Pertuis Charentais. La mise en place d'un plan de protection par barrage pour un parc marin peut être envisagé dans un projet *LIFE+*.

Le Syndicat Conchylicole de Marennes-Oléron *SCMO*, l'Association Nationale des Elus du Littoral *ANEL*, les ports, les pôles de compétitivité Mer Bretagne et PACA, le réseau de recherche sur les pollutions marines *RITMER*, le réseau national de recherche côtière *RFRC*, sont des acteurs ou des parties prenantes potentielles des projets envisagés.

L'optimisation tactique du plan de pose d'un barrage et la mise en place d'exercice anti-pollution sont destinées aux décideurs. Ces exercices mettent en évidence une hiérarchie des

responsabilités. Un exercice associé à une modélisation valorise une recherche de façon importante.

## 6.1 Prolongement, exemples ETIER et PARABAR

Un dispositif peut retenir un polluant par la génération d'un tourbillon. La mise en place d'un tel dispositif dans un étier nécessite une recherche multidisciplinaire en environnement (faune et flore), géomorphologie, courantologie. Une étude d'impact socio-économique peut-être envisagée. Le projet *ETIER* relie géographie, environnement et mécanique des fluides, qui sont des thèmes de recherche de centres de recherches (*IFREMER*) et d'Universités (La Rochelle, Poitiers) de la région Poitou-Charente. Des partenaires potentiels se trouvent dans des régions voisines, écoles d'ingénieurs de Nantes, Université de Limoges, pôle de compétitivité *EMC2*. Le projet pourrait être dans l'axe 1 "Innovation et Développement Durable" sur la mesure 2 "Transfert des Résultats de Recherche" du programme opérationnel *FEDER* 2007-2013 de la région Poitou-Charente.

Un réponse technologique aux embâcles lors des phénomènes d'inondations peut être obtenue par la modélisation de débris flottants en présence d'un dispositif de membrane flottante, agissant comme déviateur. L'objectif de la recherche est d'assembler le comportement du domaine des débris flottants rigides  $D$ , du domaine élastique de la membrane  $\omega$ , et du domaine du fluide  $\Omega$ . Le partenariat de ce projet (RiskNat-ANR) serait le *CETMEF* de Compiègne et l'*UTC*.

L'utilisation d'un ordinateur massivement parallèle, nous permettrait de résoudre de façon couplée, le modèle *SPH* pour l'écoulement d'eau et de pétrole, avec le modèle de membrane élastique pour le barrage. Le projet *PARABAR* pourrait répondre au programme *COSINUS*. Il s'agit d'assembler les domaines de membrane  $\omega$  et de fluide  $\Omega$ , avec les inconnues en déplacement  $u$ , en vitesse  $V$  et en pression  $p$ . Le calcul massivement parallèle peut nous permettre de collaborer avec des Universités partenaires de l'*EIGSI*, par exemple avec le professeur Mikhail Bouniaev, doyen de l'Université de l'Utah.

Depuis 2008, nous proposons un sujet de thèse sur la construction d'un modèle numérique *SPH*, de membranes élastiques en grands déplacements. Cette méthode constituerait une alternative à la méthode des éléments-finis.

Le site web de *SIMBAR* dépasse les 35000 visites cumulées, à la fin 2008. Le plan de dissémination restant de *SIMBAR* comprend quatre communications. Destiné à un large public, pour contribuer au lien entre science et société, un article est en cours de rédaction pour "La Recherche". Vers les institutions internationales en charge des réglementations maritimes, nous devons diffuser les bonnes pratiques en matière de barrage, *ie* vers l'Agence Européenne de Sécurité Maritime *EMSA* et les Accords de Boon. Une formation est à prévoir sur la modélisation des barrages dans le Master Offshore de Brest.

Nous envisageons trois publications sur les projets écoulés.

Dans *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, nous décrivons les expérimentations de barrage réalisées dans deux ports différents de l'Atlantique (La Pallice, Lorient).

Dans *Marine Structures*, nous décrivons la modélisation et la simulation de l'ombilical d'un engin volant captif, y compris les travaux sur le banc aéro-électrique de l'*EIGSI*, pour simuler la chaîne de propulsion composée d'un moteur et d'une hélice.

Dans *Mathematics and Computer in Simulation*, nous reprendrions la dissémination des travaux sur l'airbag pour tramway, commencée par notre communication au congrès *IMACS* de 2000.

Notre workshop international "Oil Spill Boom" voit sa troisième édition en décembre 2008. Il permet d'identifier des voies de recherche futures, sur des questions émergentes en mathématiques

appliquées aux pollutions marines. Il permet aussi l'identification de sujet de thèse et de son encadrement, avec l'*IFREMER* par exemple.

La diversification de notre recherche serait multidisciplinaire avec des thèmes en biologie ou en sociologie.

## 6.2 Diversification multidisciplinaire, exemple POLCLEAN

Le projet *INTERREG IV – B POLCLEAN* est dirigé par la Région d'Andalousie. Il réunit un partenariat des milieux de la recherche en toxicologie, l'industrie des pêcheurs et des armateurs espagnols, des institutions environnementales et l'*EIGSI*. Ce projet s'inscrit dans le thème 2 "Protection et Conservation Durable de l'Environnement et du Milieu Naturel" de l'espace *INTERREG IV – B* du Sud-Ouest Européen. Il permet d'améliorer les mécanismes de mise en oeuvre d'une réponse à la fois rapide et efficace aux accidents de pollution, principalement les déversements d'hydrocarbures, en prenant garde à tout ce qui permet de réduire les risques pour la santé humaine, la protection des ressources naturelles, et la protection des écosystèmes. Nos thèmes de recherche sont l'interopérabilité des systèmes organisationnels dans la gestion de crise, et l'analyse de données, appliquée à l'évaluation des techniques de protection, des dommages environnementaux et des indicateurs de projet. Ce projet valoriserait nos recherches aux niveaux inter-régional et européen.

**Remarque.** L'action éducative internationale *LITMED21* est pilotée à l'*UMR*-Espace par Jacques Morelli, professeur à l'Université de Nice. Elle concerne la gestion intégrée des zones côtières de Méditerranée (*GIZC*). Elle est financée par l'*UNESCO*. Au cours d'une conférence invitée, nous avons sensibilisé les participants aux techniques de protection lors des pollutions accidentelles. Les participants sont des décideurs et des gestionnaires publics, dont le maire-adjoint de la ville de Saïda, des scientifiques et des étudiants.

## 6.3 Futur des travaux de recherche

### 6.4 Liste de Projets futurs

- ETIER "Dispositif antipollution appliqué à un étier lors de forts courants"
- EMBACLE "Dispositif flottant déviateur de déchets flottants lors de crues ou d'inondations"
- PARABAR "Calcul parallèle 3D fluide/structure EF/SPH (Eléments-finis/ Smoothed Particles Hydrodynamics) sur le confinement d'hydrocarbures par barrage antipollution"
- SPH-Membrane "Elasticité 3D et méthode numérique sans maillage, application aux membranes non-linéaires et à la lutte contre les pollutions marines"
- POLCLEAN "Amélioration de la réponse des groupes d'intervention et des bénévoles lors des pollutions par hydrocarbures"
- DISSEMINATION - voir texte

## 7 Conclusion

Cette synthèse est organisée en suivant de façon rigoureuse l'extrait de la circulaire 92-336 du 16 novembre 1992. Cependant, nous pensons utile d'énumérer d'autres activités, liées à celles qui ont été décrites, et qui font partie intégrante de la fonction d'enseignant-chercheur à l'*EIGSI* qui est un établissement privé :

- 
- L’encadrement d’enseignants-chercheurs de l’*EIGSI* dans leur mission de recherche (mathématiques appliquées, mécanique, physique, ...). Dans le cadre du projet *RAPACE*, nous avons coordonné l’activité de recherche de trois enseignants-chercheurs de l’*EIGSI* en aérodynamique, en simulation numérique et en génie électrique.
  - L’enseignement en 2ème cycle et en master (école d’ingénieurs, master en mécanique)
  - La coordination d’enseignements en mathématiques pour l’ingénieur, et la création à l’*EIGSI* d’enseignements nouveaux en mathématiques appliquées pour l’ingénieur (Traitement du signal, Optimisation, Fiabilité des systèmes)
  - La fonction de chef de groupe, et l’encadrement d’enseignants-chercheurs de l’*EIGSI* dans leur mission d’enseignement en mathématiques
  - Le recrutement à l’*EIGSI* d’enseignant-chercheur permanent en mathématiques appliquées
  - La relation avec les chercheurs et les enseignants-chercheurs des établissements et des entreprises partenaires dans leurs missions sur les projets de recherche collaboratif.

Notre vision de l’avenir fait apparaître la poursuite :

- de la démarche d’entrepreneuriat nécessaire à un projet de recherche
- de nouveaux liens des mathématiques appliquées avec l’industrie
- de l’insertion dans les réseaux de recherche, tel que le *RITMER*, de la candidature à un comité de programme, de l’implication dans un pôle de compétitivité (expertise et évaluation)
- des thèmes liés à l’environnement (maritime, littoral, port), de la participation aux sociétés savantes
- de l’insertion dans l’espace régional et national de la recherche
- des échanges internationaux et européens
- de l’organisation de workshops et de congrès

Nous apporterons notre expérience pour encadrer des thésards dans une Ecole Doctorale. Nous pourrions être chef de groupe de recherche. Nous poursuivrons en 2009 la coordination nationale du projet *BAR3D* de l’*ANR*. Nous souhaitons poursuivre la coordination de projet de recherche.

Les thèmes de recherche que nous souhaiterions aborder concernent le calcul scientifique avec les méthodes avec ou sans maillage, sur les domaines réguliers ou non lisses, comme ceux des surfaces libres ou des membranes. L’identification d’au moins une tactique admissible pour un barrage flottant passe avant l’optimisation de toutes les tactiques possibles. Cela requiert la prise en compte d’un milieu naturel, comme un estuaire, dans toute sa généralité et toute sa complexité.



# Bibliographie

- [1] F. Muttin, Structural Analysis of Sails, *European Journal of Mechanics A/ Solids*, Vol 10 No 5 (1991) 517–534.
- [2] F. Muttin, Chapitre "Mécanique des Voiles de Navire", dans le livre collectif *Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux : Comportement mécanique des tissés*, coordonné par P. Trompette, Hermès Science, Lavoisier, Paris, chapitre 2, 71–122,(2006).
- [3] Gilabert,A., P. Sibillot, D. Sornette, C. Vanneste, D. Maugis et F. Muttin, Buckling Instability and Patterns around Holes or Cracks in Thin Plates under a Tensile Load, *European Journal of Mechanics A/ Solids*, Vol 11 No 1 (1992) 65–89.
- [4] F. Muttin, A finite-element for wrinkled curved elastic membranes, and its application to sails, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol 12 No 11 (1996) 775–786.
- [5] F. Muttin, T. Coupez, M. Bellet et J.L. Chenot, Lagrangian finite element analysis of time-dependent viscous free-surface flow using an automatic remeshing technique. Application to metal casting flow, *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol 36 (1993) 2001–2015.
- [6] F. Muttin et J. L. Chenot, On a conjuguate-gradient two-grid method for three-dimensional elasticity, *Engineering Computation*, Vol 12 No 1 (1995) 3–20.
- [7] F. Muttin, Structural Analysis of Oil-Spill Containment Booms in Coastal and Estuary Waters, *Applied Ocean Research*, Vol 30 No 2 (2008) 107–112, doi :10.1016/j.apor.2008.07.001 .
- [8] F. Muttin, Oil spill boom modelling, numerical approximation and contingency plan optimization, *Pacific Journal of Optimization*, special issue of the conference NVA2007 dedicated to Michel Théra for his sixtieth anniversary, Vol 5 No 1 (2009) 111–126.
- [9] F.Muttin, Inflated membrane system simulation used for load ejection, *Proc. 16th IMACS World congress on scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation*, Lausanne Switzerland, EPFL ed., C.P. Code 712 p. 508, 21–25 aout 2000.
- [10] F. Muttin, Shock Absorption Properties of Tramway Airbag-Bumpers, *European Journal of Mechanics A/ Solids* (ressoumission possible si modification de grande ampleur, novembre 2004).
- [11] F. Muttin, A One-dimensional Model for an Inflated Membrane with Opening during an Impact, Application to an Airbag-Bumper for a Tramway, *European Journal of Mechanics A/ Solids* (article rejeté, 3 août 2007).
- [12] D. Violeau, C. Buvat, K. Abed-Meraim, E. de Nanteuil, Numerical modelling of boom and oil spill with SPH, *Coastal Engineering*, Vol 54 (2007) 895-913.
- [13] F. Boushaba, S. Nouchi, Y. Benelmostafa, F. Muttin, Structural Modelling of Oil Spill Containment Booms by the Finite Element Method, *Proc. international Oil Spill Conference IOSC 2005*, Index by year and title pp. 424, International Oil spill conference 2005.

- [14] M. Benaouicha, A. Hamdouni, F. Muttin, Modelling of a Mitigation Water Balloon Technique for Scarcity in Coastal Sea Region, *Proc. IFAC Workshop on Modelling and Control for Participatory Planning and Managing Water Systems*, International Federation of Automatic Control, Venice, 29 september-1 october 2004.

## 8 Chronologie

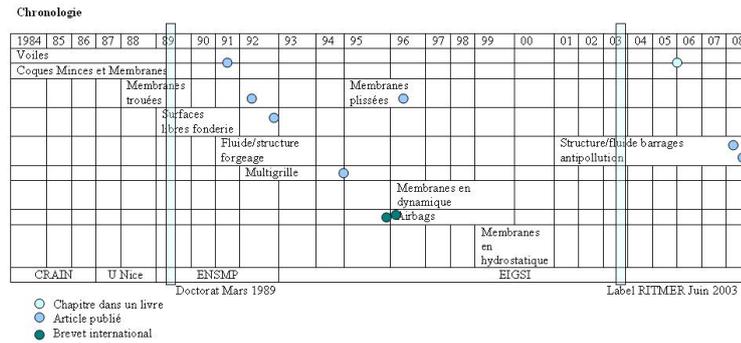


FIG. 8 – Chronologie

N	Principal	Complementaire
Articles —————	—————7	—————
Chapitre —————	—————1	—————
Conferences invitees —	—————5	—————
Communications publiees	—————16	—————2
Brevets —————	—————2	—————4
Seminaires —————	—————9	—————
Autres communications -	—————19	—————
Medias depuis six ans -	—————17	—————8
Sites web —————	—————3	—————
Expeditions —————	—————3	—————
Congres organises ———	—————4	—————4
Membre ISAC —————	—————4	—————
Prix scientifiques ———	—————2	—————

# Compléments

## CV

### Frédéric Muttin

---

#### **Né le 5 novembre 1959 à Nice**

Coordonnées personnelles : 41 rue Saint Jean du Perot, 17000 La Rochelle, France

Situation Professionnelle Actuelle : Enseignant-chercheur Mathématiques Appliquées

Ecole d'Ingénieurs, EIGSI La Rochelle, 26, rue de Vaux de Foletier 17041 La Rochelle, France

Téléphone +33 (0)5 46 45 80 19 Portable +33 (0)6 86 95 70 38 Fax +33 (0)5 46 45 80 10 [muttin@eigsi.fr](mailto:muttin@eigsi.fr)

#### **Diplômes universitaires**

1978 Baccalauréat, série E, Lycée des Eucalyptus, Nice

1981 DEUG A, MP Mathématiques et Physique, Université de Nice

1982 Licence de Mathématiques de l'Université de Nice

1983 Maîtrise de Mathématiques et Applications Fondamentales de l'Université de Nice

1984 DESS Informatique et Sciences de l'Ingénieur, Université de Nice Sophia-Antipolis

1989 Doctorat de Mathématiques, Université de Nice Sophia-Antipolis

#### **Fonctions occupées**

1984-1987 Doctorant-Ingénieur, Centre de Recherche pour l'Architecture et l'Industrie Nautiques, CRAIN La Rochelle

1987-1989 Doctorant en Mathématiques, Université de Nice Sophia-Antipolis, Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné, UMR CNRS 6621

1989-1993 Chercheur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre d'Etude de Mise en Forme des Matériaux, CEMEF Sophia-Antipolis

1993- ... Enseignant-Chercheur en Mathématiques Appliquées, Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels, EIGSI La Rochelle

#### **Responsabilités collectives, passées et actuelles :**

1991-1992 Chef de groupe adjoint, Calcul de Structure, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, CEMEF, Sophia Antipolis

1994-1997 Chef de groupe, Mathématiques, EIGSI La Rochelle

1994-1997 Responsable de la promotion d'élèves-ingénieurs de 3<sup>ème</sup> année, EIGSI La Rochelle

1996-1999 Chef de projet de recherche AIRBAG sur un airbag extérieur pour tramway, EIGSI La Rochelle, ALSTOM

1996-2003 Co-Responsable du Diplôme de Recherche Technologique, DRT, Génie Informatique appliqué aux Systèmes Industriels, GISI, 1996-1999, puis Technologies de l'Information et Systèmes Industriels, TISI, 2000-2003, Université La Rochelle Laboratoire L3I et EIGSI.

2003-2006 Coordinateur, Responsable Scientifique, projet de recherche national SIMBAR sur les barrages antipollution, Réseau de Recherche et d'Innovations Technologiques RRIT, Pollutions Marines Accidentelles et leurs Conséquences Ecologiques RITMER, Ministère de L'Environnement et du Développement Durable.

2005-2008 Partenaire, Coordinateur EIGSI, projet de recherche national RAPACE sur un drone captif d'observation maritime des pollutions accidentelles, programme Eco-technologies et Développement Durable PRECODD, Agence Nationale de La Recherche ANR.

2006-2010 Coordinateur, Responsable Scientifique, projet de recherche national BAR3D sur un logiciel de calcul 3D pour barrages antipollution, programme Eco-technologies et Développement Durable PRECODD, Agence Nationale de La Recherche ANR.

2009-... Coordinateur du département S.F.I. Sciences Fondamentales pour l'Ingénieur, Ecoles d'Ingénieurs EIGSI La Rochelle et EIGSICA Casablanca

### **Participation à l'encadrement de recherche d'étudiants de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> cycles**

#### ***Thèses co-encadrées :***

1989-1991, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, mécanique numérique - fonderie  
*Contribution à la modélisation par éléments finis des écoulements turbulents. Application au remplissage des moules*

Auteur : Alima KAMARA le 01/02/1994

1991-1992, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, mécanique numérique - forgeage  
*Couplage thermique et mécanique en forgeage à chaud*

Auteur : Michael Paul MILES le 01/05/1995

2004-2005, Université de La Rochelle, couplage fluide-structure des réservoirs souples

Auteur : Mustapha BENAOUICHA

2004, Université d'Oujda, stage doctoral sur la modélisation des barrages flottants

Auteur : Farid BOUSHABA

#### ***DRT encadrés :***

1996-1997, GEC ALSTHOM, modélisation - airbag

*Conception et développement d'un système absorbeur d'énergie pour tramway*

Auteur : Stéphane Grollier le 07/11/97

1997-1999, ALSTOM, expérimentation - airbag  
*Dimensionnement D'un Absorbeur D'énergie De Collision*  
Auteur : Olivier Plouzin (non soutenu)

1999-2002, PSA Peugeot Citroën, modélisation – véhicule hybride  
*Changements de rapport sur architecture hybride simple arbre : modélisation, simulation et validation sur prototype*  
Auteur : Nicolas Audiot le 19/03/2002

2000-2001, ARGONNE National Laboratory , Center for Transportation Research, modélisation – véhicule hybride  
*Réalisation d'outils logiciel pour l'étude et le contrôle des chaînes de tractions hybrides*  
Auteur : Gilles Monnet le 1/09/2001

2001-2002, ARGONNE National Laboratory, Transportation Technology R&D Center, modélisation – véhicule hybride  
*Développement de PSAT, Imogiciel de simulation de chaînes de tractions avancées*  
Auteur : Eric Devillé, le 1/09/2002

2002-2003, ARGONNE National Laboratory, Transportation Technology R&D Center modélisation – véhicule hybride  
*Dual source energy storage potential for fuel cell vehicle applications*  
Auteur : François Besnier, le 27/09/2003

***Etudiants sélectionnés de prolonger leur apprentissage par la Recherche, de façon complémentaire à leur cursus***

2007-2009, Sisouvanh Sonethavy, deux stages de 2 puis 3 mois suivis d'un CDD de 5 mois en Intérim, au cours des 3ème et 4ème années du cursus EIGSI, contribution au projet de recherche BAR3D de l'ANR

### Problèmes Industriels et projets soumis

1. America Cup 1987 : Calcul de structures des voiles, Rapport « Etudes mécaniques », Ministère de la Recherche et de la Technologie, CRAIN 1984-1987
2. Ateliers et Chantiers du Havre ACH : Calcul de structures tendues pour paquebots à voiles, CRAIN 1985
3. Groupe des voileries nationales, rapport de calcul des génois et grand-voiles, CRAIN 1986
4. Formulation numérique Lagrangienne pour des écoulements à surfaces libres, INRIA Sophia-Antipolis, 1990.
5. Creusot-Loire Industrie CLI : Modélisation des écoulements de fonderie, logiciel de simulation R2, Ecole des Mines de Paris, CEMEF, 1989-1991
6. Groupement Forge an2000, CETIM : Modélisation de l'élasticité des outils de forge, Ecole des Mines de Paris, CEMEF, 1992-1993
7. Modélisation numérique de surfaces libres, INRIA Lorraine, Nancy, 1992.
8. Interaction de la turbulence entre l'océan et l'atmosphère, CNRS section 12, IMST Marseille, 1993
9. Airbag extérieur pour tramway, chef de projet, coordination du consortium : SNPE, Aérazur-Zodiac, Pyrolliance, Université de Valenciennes Valutec, ALSTOM , ERRI17, EIGSI, 1996-1999
10. Aérazur-ZODIAC, STE-Singapour Technology : Flottabilités pour engin blindé, EIGSI 1999-2001
11. Co-ordinateur SIMBAR, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable MEDD: Modélisation des barrages flottants anti-hydrocarbure, réseau RITMER, responsable scientifique, coordination du consortium : LNHE EDF, Université de La Rochelle, CEDRE, CETMEF, EIGSI, 2000-2007
12. Co-ordinateur DRAMERMA, Droit de la Responsabilité Adapté aux Missions d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques Appliquées, Ministère de la Recherche, ACI nouvelles interfaces des mathématiques
13. Co-ordinateur, 6<sup>ème</sup> PCRD, Développement Durable, Waterballoon, stockage et traitement d'eaux douces/usées en zone côtière, montage de 4 propositions de projets de type STREP, 2002-2006
14. Co-ordinateur TRAP, Toile de rétention de polluant hydrocarbure, ANR-PRECODD Programme Ecotechnologies et Développement Durable PRECODD 2005
15. Partenaire Simulation aéro-mécanique d'un petit engin volant captif, partenaire du projet RAPACE, programme PRECODD 2005, Agence Nationale de la Recherche, 2005-2008
16. Co-ordinateur Logiciel de Calcul 3D de Barrages Flottants, projet BAR3D , responsable scientifique, coordination du consortium : LNHE EDF, TOTAL, CEDRE, CETMEF,

- programme PRECODD Programme Ecotechnologies et Développement Durable 2006, Agence Nationale de la Recherche, 2006-2010
17. Co-ordinateur de FILO (protection des chenaux des ostréiculteurs) et CABOU (senne de capture de boulette sen mer), APR Excellence environnementale et développement des éco-industries, Région Poitou-Charente, 2006
  18. Co-ordinateur TAECCO, Tourbillon Antipollution Appliqué à un Etier un Chenal une Culture Ostréicole, ANR-PRECODD Programme Ecotechnologies et Développement Durable 2007
  19. Partenaire CHREC, CHaluts de REcupération de Cargaison tombées en mer, ANR-PRECODD Programme Ecotechnologies et Développement Durable 2007, labélisé par les pôles Mer PACA et Bretagne
  20. Co-ordinateur SIMPLIFI, Simplification de modèles hydrodynamiques pour élaborer un logiciel de dérive de polluant en mer côtière ou estuarienne, APR Excellence environnementale et développement des éco-industries Région Poitou Charente 2007
  21. Co-ordinateur BARADA (barrage adaptation), Adaptability of a computation tool to enhance a general and common approach in oil spill protection using floating boom: ERA-NET AMPERA, Funding Initiative Transnational Call For Proposals 2007, pré-proposition de recherche, Juin 2007
  22. Co-ordinateur PARABAR, Approche 3D fluide/structure EF/SPH (éléments-finis/ Smoothed Particles Hydrodynamics) sur le confinement d'hydrocarbures par barrage antipollution, soumis ANR-COSINUS-2008, LNHE, CETMEF, TOTAL SA, 26 Mars 2008, labélisé par le pôle Mer Bretagne
  23. Co-ordinateur TICTAC, Tourbillon Antipollution Appliqué aux déchets ou polluants flottants ou immergés, soumis ANR-PRECODD-2008, LNHE, Institution Adour, 27 Mars 2008, labélisé par le pôle Mer Bretagne
  24. Partenaire et co-ordinateur du Work-Package 4 «Interopérabilité des parties prenantes et mise en place d'un réseau de collaboration et de transfert des résultats, projet POLCLEAN « Amélioration du nettoyage et de la réponse des groupes d'intervention et des bénévoles lors des pollutions par hydrocarbures» INTERREG IV-B, SUDOE, Juin 2008
  25. Co-ordinateur projet BAR IERE « Confinement et Récupération des Pollutions Hydrocarbures en Morphologies Côtières Complexes appliqués aux Estuaires et aux Epaves », en préparation pour l'AAP ECOTECH (ANR), Février 2010.
  26. Co-ordinateur projet BAR AGE « Barrage flottant, outil d'Aide Géographique en Environnement » , en préparation pour l'AAP ECO-INDUSTRIE, Février 2010.

### Participations aux comités d'experts

1. Peer review European Journal of Mechanics A/Solids, Communications in Numerical Methods in Engineering.
2. 2004- Membre du Conseil Scientifique de l'EIGSI
3. Expert évaluateur de projet de recherche européen, 6<sup>ème</sup> Programme Cadre de Recherche et Développement, PCRD, New Emerging Science and Technologies NEST (recherche fondamentale en mécanique des matériaux intelligents), Mai 2004
4. Expert évaluateur de projet de recherche américain National Ocean and Atmospheric Administration, NOAA, Coastal Response Research Center, CRRC (mathématiques appliquées à la dérive des pollutions marines), Université du New-Hampshire, Octobre 2005
5. Frédéric Muttin, participation au groupe de travail n°1 :services de base, opération de prospective Technologies-Clés 2010, Direction Générale des Entreprises DGE, Ministère de l'Industrie, 2005 [http://www.industrie.gouv.fr/liste\\_index/technocles2010.html](http://www.industrie.gouv.fr/liste_index/technocles2010.html)
6. Expertise pour le CEPPOL-Brest, Marine Nationale, Décembre 2006
7. 2008-... Membre du comité de recherche du RITMER « pollutions marines accidentelles », anciennement RRIT du Ministère de la recherche, et nouvellement intégré au pôle Mer Bretagne, Avril 2008.
8. Rapporteur de la HDR de Daniel Priour IFREMER, Modélisation Numérique des Engins de Pêches et des Structures d'Élevage Aquacoles, Université de Bretagne Occidentale Institut Universitaire Européen de la Mer, IUEM Plouzané, 9 Décembre 2009
9. 2010- Membre du groupe de travail sur le thème de l'Oil Spill Modelling, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), Juillet 2010

### Organisations de congrès et de workshops, participations aux comités scientifiques

1. Membre Comité scientifique international et Comité Local d'Organisation, Chairman d'une session, Congrès international NUMIFORM' 92, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, CEMEF, Sophia Antipolis, Septembre 1992.
2. Organisateur, 1st International Workshop Oil Spill Containment Boom, college authorities: French Navy, CEDRE, French Transportation Administration, TOTAL group, Industrial college: ZODIAC, Ro-CLEAN, Scientific college: Oxford University, University of Cambridge, EIGSI, LNHE EDF R&D, "Oil spill containment boom. Real problems to motivate Industrial and Scientific approaches", EIGSI La Rochelle, 2-3 Mars 2006.
3. Organisateur, 2nd International Workshop, « Oil spill containment boom and nets, Real Problems in Numerical Modelling and Dissemination of Best Practices », Location: EIGSI La Rochelle France, Participants: CEDRE Brest, LNHE EDF R&D Chatou, IFREMER

Centre de Brest, Universités de Rennes et de Poitiers, CETMEF, CEPPOL, MUSTHANE, THOMSEA, GEOCEAN, 5 and 6 October 2006.

4. Membre du Comité d'organisation et animateur d'une table ronde, ICI Environnement Quebec, Aquacentrum Montréal, HEC Montréal, Sup de Co La Rochelle, EIGSI, 4<sup>e</sup> Colloque Environnement « Samuel de Champlain », Projets Innovants de L'Entreprise dans le Domaine de l'eau: Motifs et Impacts sur l'entreprise, Quebec, 1-3 Novembre 2006.
5. Organisateur, Michel Théra et Frédéric Muttin, « Rencontre Mathématiques et Environnement », thème : « Eau, modélisation de la ressource et des pollutions : un témoignage prioritaire des entreprises pour les étudiants et les lycéens », fête de la science, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, Ecole d'Ingénieurs La Rochelle, IREM , 24 Octobre 2007.
6. Membre International Scientific Advisory Committee, International conference Water Pollution 2008, Wessex Institute of Technology et Université d'Alicante, 9-11 Juin 2008.
7. Comité d'organisation, comité scientifique, chairman d'une session, Forum Eau et Santé 2008, La Rochelle, organisateurs : Sup de Co La Rochelle, EISGI, ICI Environnement, HEC Montréal, « L'Eau et la Santé, une priorité nationale et internationale », 24-25 Avril 2008.
8. Organisateur, 3rd International Workshop, « Oil spill containment boom, Numerical methods and softwares for coastal protection, Real Problems in Numerical Modelling and Dissemination of Best Practices », EIGSI La Rochelle, Participants: LNHE EDF R-D Chatou, IFREMER Centre de Brest, Universités de La Rochelle de Rennes et de Houston, CEDRE Brest, TOTAL SA, Conseil Régional Poitou-Charente, 11-12 Décembre 2008
9. Membre International Scientific Advisory Committee, Chairman of session "Agricultural Contamination", International conference Water Pollution 2010, Wessex Institute of Technology, UK, University Politehnica of Bucharest, Romania, Bucharest Romania 9-11 Juin 2010.

### **Organisations d'expéditions, missions scientifiques et techniques**

1. Université de Valenciennes, essais d'un airbag extérieur pour une cabine de tramway, deux campagnes d'essais à l'échelle 1, et démonstration devant une commission, Janvier et Mars 1998
2. Port de Commerce de La Rochelle, expérimentation d'un barrage anti-pollution de 100m durant 9 jours dans la Anse Saint Marc du Port Autonome de La Rochelle-Pallice, 12 hommes\*mois, 145k€, Mai2008
3. Commune du Relecq-Kerhuon, expérimentation d'un barrage anti-pollution de 210m durant 8 jours dans l'estuaire de l'Elorn sur la commune du Relecq-Kerhuon, 9 hommes\*mois, 140k€, Novembre 2009

### **Membre de sociétés savantes**

1989, Société de Mathématiques Appliquées et Industrielles, SMAI

1997, European Math Society, EMS

2005, Société Française de Statistiques, SFdS

2006, Association Technique Maritime et Aéronautique, ATMA

2006, Société Hydraulique de France, SHF

2007, Pôle de Compétitivité Mer Bretagne, Brest

### **Prix scientifiques, distinctions**

2007, La Médaille Richelieu, prix spécial du jury ATMA, Association Technique Maritime et Aéronautique, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées ENSTA Paris, Juin 2007

2008, The Rhomadka Award 2008, Wessex Institute of Technology, Université d'Alicante, Prof. C.A. Brebbia, Juin 2008

### **Sites web de projets de recherche**

2004, <http://simbar.eigsi.fr>

2004, <http://waterballoon.eigsi.fr>

2007, <http://bar3d.eigsi.fr>

## ANNEXE

### Elèves-ingénieurs EIGSI en 4 et 5<sup>ème</sup> années encadrés en R&D sur un projet qui leur a été proposé

#### Années scolaires les plus récentes

#### 2007-2008

Projets (EIGSI, Promotion 2008)

- ADOUR, Barrage anti-déchets flottants
- BAR3D, Instrumentation et logiciel de représentation d'un barrage
- CONTENEUR, Remorquage en mer de conteneur flottant
- PERTUIS-BRETON, Modèle hydrodynamique du pertuis pollué

(voir document de synthèse HDR)

#### 2008-2009

Anne Charlotte Guillemot, Sophie Guermond, Léa Metay, Valentin Hersen, Interopérabilité en situation de crise (application aux pollutions marines), EIGSI Promotion 2009 (co-encadrement)

#### 2009-2010

Chambosse Florent, Metaut Pierre-Alexandre, Vieira Lobo Daniel Augusto (Brésil), Werst Marlène, Protection contre les crues fluviales par un déviateur souple, EIGSI Promotion 2010.

#### 2010-2011

Claire Chevalier, Julian Nemery, Yoane Pannetier, Coralie Reboud, Arctique et Pollutions Hydrocarbures, EIGSI Promotion 2011

Constance Dhellemmes, Maxime Eveillard, Nicolas Fines, Interopérabilité et Pollutions Hydrocarbures, EIGSI Promotion 2011 (co-encadrement)



## Liste Des Publications

Frédéric Muttin

---

### Publications dans des revues internationales avec comité de lecture;

1. F. Muttin, Structural Analysis of Sails, *European Journal of Mechanics A/ Solids*, 10, n°5, 517-534, 1991.
2. A. Gilabert, P. Sibillot, D. Sornette, C. Vanneste, D. Maugis et F. Muttin, Buckling Instability and Patterns around Holes or Cracks in Thin Plates under a Tensile Load, *European Journal of Mechanics A/ Solids*, 11, n°1, 65-89, 1992.
3. F. Muttin, T. Coupez, M. Bellet et J.L. Chenot, Lagrangian finite element analysis of time-dependent viscous free-surface flow using an automatic remeshing technique. Application to metal casting flow, *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 36, 2001-2015, 1993.
4. F. Muttin et J. L. Chenot, On a conjuguate-gradient two-grid method for three-dimensional elasticity, *Engineering Computation*, 12, n°1, 3-20, 1995.
5. F. Muttin, A finite-element for wrinkled curved elastic membranes, and its application to sails, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 12, n°11, 775-786, 1996.
6. F. Muttin, Structural Analysis of Oil-Spill Containment Booms in Coastal and Estuary Waters, *Applied Ocean Research*, 30, n°2, 107-112, 2008.
7. F. Muttin, Oil spill boom modelling, numerical approximation and contingency plan optimization, *Pacific Journal of Optimization*, 5, n° 1, 111-126, 2009.

### Chapitre d'un livre;

1. F. Muttin, Mécanique des Voiles de Navire, chapitre n°2, 71-122, de l'ouvrage collectif coordonné par P. Trompette, *Traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux: Comportement Mécanique des Tissés*, Hermès Science, Lavoisier, Paris, 2006.

### Conférences invitées;

1. Université de Nice-Sophia Antipolis et Association des professeurs de mathématiques de l'enseignement public, APMEP, F. Muttin et D. Chenais, Les Mathématiques et les Voiles de bateaux, Conférences aux journées APMEP, 29 Octobre 2000.
2. Université de Nice-Sophia Antipolis et UNESCO, F. Muttin, Vue d'ensemble sur les techniques et recherche en cours pour lutter contre la pollution au large des côtes et sur le littoral, Action éducative internationale sur la GIZC, LITMED 21, de l'UMR 6012 du CNRS, 26-30 Juin 2006.

3. Groupement Interuniversitaire Québécois ICI et Ecole Supérieure de Commerce de La Rochelle, F. Muttin, Synthèse et réflexions, Forum Franco-Québécois " Samuel-de-Champlain" sur l'Eau et l'Innovation dans les entreprises, Biosphère de Montréal, 3 Novembre 2006.
4. Université d'Alicante et Wessex Institute of Technology, F. Muttin, Oil spill boom modelling by the finite-element method, International conference Water Pollution IX, Juin 2008.
5. University Politehnica of Bucharest et Wessex Institute of Technology, F. Muttin, On experiments on oil-spill booms in three Atlantic coastal zones La Rochelle Lorient and Brest, International conference Water Pollution X , 9 Juin 2010.

### **Communications à des conférences internationales;**

1. F. Muttin, Membrane modelling and sail simulations, 21<sup>ème</sup> Congrès National d'Analyse Numérique CANUM, Autrans, 1989.
2. F. Muttin, Anisotropic membrane in large displacements and small strains. Application to sail simulation, Proc. of Symposium FITAT'90, Lyon, Pluralis, Textile Composite in Building Construction, vol. 2, 99-108, 1990.
3. F. Muttin, T. Coupez, M. Bellet et J.L. Chenot, Newtonian fluid computations in Lagrangian variables with a remeshing technique. Application to the filling stage of the die-casting process, Proc. of Computational Modelling of Free Surface and Moving Boundary Problems, Southampton, Comp. Mech. Pub., vol. 2, 207-221, 1991.
4. F. Muttin, M. Bellet et J.L. Chenot, Numerical simulation of inertial effects in viscoplastic flows. Application to the filling stage of the die-casting process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 31, 65-74, 1992.
5. F. Muttin, Y. H. Kim, M. Bellet et J.L. Chenot, Lagrangian finite-element analysis of low-viscous and inviscid free surface fluid flow. Application to metal casting flow using a remeshing technique, Proc. of Computational Fluid Dynamics'92 , Bruxelles, Elsevier, vol. 1, 429-434, 1992.
6. M. P. Miles, F. Muttin, L. Fourment et J.L. Chenot, Modélisation de la déformation élastique d'un outil de forge, Colloque National en Calcul de Structure, Giens, 1993.
7. F. Muttin, C. Adès, P. Cousin et P. Pallu de la Barrière, Non-linear membrane finite-element analysis for lightweight structure envelope design, Proc. AERALL, Colloque International Aeostat 2000, Toulouse France, ONERA ed., p. 395-404, 19-21 Octobre 1994.
8. F. Muttin, Inflated membrane system simulation used for load ejection, Proc. 16th IMACS World congress on scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Lausanne Switzerland, EPFL ed., C.P. Code 712, p. 508, 21-25 Août 2000.

9. F. Muttin , F. Guyot, S. Nouchi, et B. Variot, Un modèle simplifié pour le couplage structure/fluide-pollution adapté à un barrage flottant anti-hydrocarbure, Proc. 9<sup>èmes</sup> Journées Hydrodynamiques, ISSN 1161-1847, Poitiers-Futuroscope, p. 267-280, 10-12 Mars 2003.
10. F. Muttin, F. Guyot, S. Nouchi et B. Variot, Experimental Numerical and Optimisation Study of Oil Spill Containment Boom, Proc. Coastal Environment V incorporating Oil Spill Studies, 4<sup>th</sup> International Seminar on Hydrocarbon Spills Modelling, OIL SPILL 2004, Alicante, C.A. Brebbia, J.M. Saval Perez & L. Garcia Andion (Editors) WIT Press, ISBN 1-85312-710-8, Wessex Institute of Technology, p. 421-430, 28-30 April 2004.
11. M. Benaouicha, A. Hamdouni, et F. Muttin, Modelling of a Mitigation Water Balloon Technique for Scarcity in Coastal Sea Region, International Federation of Automatic Control, Proc. IFAC Workshop on Modelling and Control for Participatory Planning and Managing Water Systems, Venice, 29 September-1 October 2004.
12. F. Boushaba, S. Nouchi, Y. Benelmostafa et F. Muttin, Structural Modelling of Oil Spill Containment Booms by the Finite Element Method, Proc. International Oil Spill Conference IOSC 2005, Index by year & title pp. 424, International Oil spill conference 2005.
13. F. Muttin et S. Nouchi, Numerical Study of Oil Spill Containment Boom by the Finite-Element Method, Conference Proceedings of Eighth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Water Pollution, Bologne, Water Pollution VIII, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 95, 245-254, Wessex Institute of Technology and University of Coimbra, WIT Press ISSN 1743-3541 (on-line), doi:10.2495/WP060251, 2006.
14. F. Muttin, Oil spill boom modelling by the finite-element method, Conference Proceedings of Ninth International Conference on Water Pollution: Modelling, Monitoring and Management, Alicante, Water Pollution IX, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol 111, 383-392, Wessex Institute of Technology and Alicante University, WIT Press ISSN 1743-3541 (on-line), doi:10.2495/WP080371, 2008.
15. F. Muttin, Improvements of oil spill boom contingency plan by a numerical modelling and an exercise in the La Rochelle harbour, session n°1, poster n°7, INTERSPILL 2009 and International Maritime Organisation IMO R&D Conference, topic: Shoreline response: Tools and techniques performance, 12-14 May 2009, Marseille.
16. F. Muttin, On experiments on oil-spill booms in three Atlantic coastal zones La Rochelle Lorient and Brest, Proceedings of Tenth International Conference on Water Pollution: Modelling, Monitoring and Management, Water Pollution X, WIT Transactions on Ecology and the Environment, p. 49-60, Wessex Institute of Technology and University Politehnica of Bucharest, Bucharest, 9-11 June 2010, WIT Press, 2010.

### Publications nationales avec comité de lecture;

1. F. Muttin, Présentation du programme de recherche national SIMBAR Modélisation des barrages antihydrocarbure, Colloque Société Hydraulique de France « Qualité des eaux marines », Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, 22-23 Janvier 2007, *La Houille Blanche*, n° 05-2007, numéro spécial Qualité des eaux marines ; hydrocarbure et barrages flottants, p 1-6, 2007.
2. F. Muttin et S. Nouchi, Analyse structurale d'un barrage flottant anti-hydrocarbure par éléments-finis, *Bulletin de l'Association Technique Maritime et Aéronautique ATMA*, Bulletin ATMA n°106, année 2007, p 123-137.

### Brevets et Accords;

1. J.J. Laporte, E. Tassily et F. Muttin, Dispositif A Eléments Gonflables Pour La Protection Des Véhicules Contre Les Chocs, Brevet Français n° 9707769, Gec-Alsthom Transport, Juin 1997.
    - ⇒ Extension: Inventors : Jean-Jacques Laporte, Eric Tassily, Frederic Muttin. Devices with inflatable members for protecting vehicles against impacts -Assignee. GEC Alsthom Transport SA. Application. No. 100960 filed on 1998-06-22, 1998 US-patent n°6,039,349, <http://www.uspto.gov>, March 21, 2000
  2. J.J. Laporte, E. Tassily et F. Muttin, Procédé De Protection Contre Les Chocs Entre Deux Véhicules Au Moyen D'Au Moins Un Elément Gonflable Et Dispositif Pour Sa Mise En Oeuvre, Brevet Français n° 9707770, Gec-Alsthom Transport, Juin 1997.
    - ⇒ Extension: Inventors : Jean-Jacques Laporte, Eric Tassily, Frederic Muttin. Method of protection against impacts between two vehicles by at least on inflatable member and device for implementing it - Assignee. GEC Alsthom Transport SA. Application. No. 102004 filed on 1998-06-22, 1998 US-patent n° 6,031,449, <http://www.uspto.gov>, February 29, 2000
- ⇒ Elargissement des revendications des brevets (1-2) ci-dessus, aux trois brevets suivants: US Patents n°6,497,183 (24/12, 2002); n° 6,454,326 (24/09, 2002), n°6,443,510 (3/9, 2002)
3. F. Muttin, C. Deglaire, L. Chedeville, Enveloppes Soleau (2), Waterballoon Principes et Mise en Oeuvre, Avril 2003
  4. Mr Bruno Maerten Directeur Général GEOCEAN, Mr Gilbert Le Lann Directeur Général CEDRE, Capitaine de Frégate Christian Nedelec CEPPOL, Mr Frédéric Muttin EIGSI, Mr Jean-Luc Laurent Directeur Général LNE, Mr Gilles Michel Président CYBERNETIX, Mr Thierry Thomazeau Directeur THOMSEA, Accord de Consortium du projet RAPACE, Ref: ANR-05-ECOT-018, 19 Mai 2008.
  5. Mr Frédéric Muttin EIGSI, Mr Georges Peigné Adjoint au Directeur CEDRE, Mr Geoffroy Caude Directeur du CETMEF, Mr Laurent Perotin Chef du Département LNHE-EDF, Mr Jean-Michel Gires Directeur de la Direction Développement Durable et

Environnement TOTAL SA, Accord de Consortium projet BAR3D, Référence: ANR-06-ECOT-003-01, Numéros ADEME 0694 C 0067 , 0068 et 0069, 7 Avril 2009.

6. M. Frédéric Muttin, Enseignant chercheur EIGSI, M. Geoffroy CAUDE, Directeur du CETMEF, M. Laurent PEROTIN, Chef du Département LNHE, Convention de mise à disposition à l'EIGSI du logiciel FORBAR version 2003 par EDF R&D LNHE et le CETMEF, Dimensionnement d'un système de déviation de crues non-torrentielle du type fluviale, 16 Avril 2009.

## Communications diverses;

### *Séminaires*

1. F. Muttin, Séminaire du laboratoire de mathématiques de l'Université de Nice, Modélisation de membrane et applications aux voiles de bateaux, 1988
2. F. Muttin, Séminaire du laboratoire de mathématiques de l'Université de Nice, Une méthode d'éléments-finis pour décrire des écoulements instationnaires à surface libre, 1993
3. F. Muttin, Séminaire de l'Institut de mécanique statistique et de la turbulence, IMST Marseille, Une méthode d'éléments-finis pour décrire des écoulements instationnaires à surface libre, 1993
4. F. Muttin, Séminaire du laboratoire de mathématiques de l'Université de La Rochelle, Un modèle numérique pour les membranes élastiques plissées, 24 Janvier 1996
5. F. Muttin, Séminaire du laboratoire de mathématiques de l'Université de La Rochelle, Calcul et simulation en ingénierie d'un système à membrane gonflable pulseur de charge, 15 Novembre 2001
6. F. Muttin, Modèles non linéaires de membrane et de câble pour la protection du milieu marin lors de pollutions accidentelles par hydrocarbures, Colloquium mathématiques du LACO, Université de Limoges, 8 Février 2006
7. F. Muttin, Investigation par le modèle de membrane non-linéaire en grands déplacements des barrages flottants antipollution. Présentation des projets SIMBAR et BAR3D, groupe de travail « mécanique des fluides réels », ENS Cachan, CMLA, 12 Mars 2007
8. F. Muttin, Drone captif de surveillance antipollution, conception de la liaison bateau/drone, Séminaire Recherche Ingé France, Ecole d'Ingénieurs EPF, Sceaux, 12 Novembre 2009
9. Habib Al Jed, André Mize, Schérazade Benhabib, Frédéric Muttin, Modèles de regression pour le vieillissement des cellules electrochimiques, MODE-SMAI 2010 Limoges, 24-26 Mars 2010 (poster)

*Scientifiques et techniques*

1. F. Muttin, Airbag extérieur pour le tramway CITADIS, Présentation au Siège social d'ALSTOM-Transport St Ouen, 23 Septembre 1999.
2. F. Muttin, C. Adés, Revue industrielle sur La Réduction des coûts des dommages aux automobiles par l'utilisation d'un airbag extérieur, SNPE (Société Nationale des Poudres et Explosifs) & FAURECIA, Présentation au Siège Social de la SNPE Paris, 17 Mai 2000
3. F. Muttin, Mathématiques et voiles de bateaux (deuxième partie), *Bulletin de l'APMEP*, n° 437, p. 795-800, Association des Professeurs de Mathématiques de l'Enseignement Public (APMEP) Paris, 2001
4. F. Muttin, Voiles de bateaux: matériaux et dimensionnement, TUT n°44, *Revue Internationale des Textiles à Usage Technique*, p. 20-22, 2<sup>ème</sup> trimestre 2002
5. F. Muttin, Water Management in Coastal area with floating balloons, Information day Water-technologies, 4<sup>th</sup> call of proposal Global change and ecosystems thematic priority, DG Research, Flash Presentation, Commission Européenne, Bruxelles, 11 Juillet 2005
6. F. Muttin, Oil spill boom and flexible container, *JEC-Composites n°21*, Special Marine, User's Platform, p. 56-57, Décembre 2005
7. F. Muttin, Technologies environnementales pour la protection du milieu marin contre les pollutions par hydrocarbures (rétention d'un petit engin volant captif, toile composite de rétention de polluant), JEC 2006 COMPOSITES, Présentation Conférence « utilisateurs », matinée « environnement et recyclage», 30 Mars 2006
8. F. Muttin, Barrages flottants, programme de recherche sur les écotecnologies, DG Environnement groupe TOTAL, Présentation au Siège Social de TOTAL SA Paris-La Défense, 16 Janvier 2006
9. F. Muttin, rencontre député-chercheur avec Monsieur le député J.-L. Léonard, Chatellaillon, 11 Février 2006
10. Simon Anheim, Frédéric Muttin, Pollution marine : vers des barrages flottants anti-hydrocarbures plus performants, *Environnement Magazine*, n°1648, Juin 2006
11. Martha Hyder, Frédéric Muttin, Research Aims to Improve Boom Design and Efficiency, *Oil Spill Intelligence Report*, vol. 30, n°17, p.3, 19 April 2007
12. John McMurtrie, Frédéric Muttin Oil Spill Boom and Contingency Planning Modelling – SIMBAR Project, *International Spill Control Organisation Newsletter (ISCO)*, Issue 69, p. 1, 5th March 2007
13. F. Muttin, Y.M Ben El Mostafa, poster BAR3D sur la modélisation des barrages anti-pollution, journées nord-sud de Physique, Université d'Oujda, 9-13 Avril 2007
14. F. Muttin, Scientific platform for pollution response and exchange fostering, Maritime Economy Conference, Presentation Green Atlantic GASD, INTERREG IVB, Porto, 15 December 2007

15. F Muttin, Le couplage Structure-Fluide; Application à la protection côtière, Présentation 1ère Journée Recherche INGE-France, RIF08, HEI Lille, 21 Mai 2008
16. F Muttin, Structures Souples et Confinement des Polluants, Présentation réseau RITMER-Pôle Mer Bretagne, Brest, 27 Mai 2008
17. F Muttin, Steering Committee POLCLEAN, projet POLCLEAN « Amélioration du nettoyage et de la réponse des groupes d'intervention et des bénévoles lors des pollutions par hydrocarbures », INTERREG IV-B SUDOE, Présentation EGMASA Gouvernement Régional d'Andalousie, 2 Juin 2008
18. F Muttin, Logiciel de calcul 3D de barrages flottants, Présentation BAR3D Séminaire PRECODD2008, Agence Nationale de la Recherche, Montpellier, 9 Octobre 2008
19. F. Muttin, Interopérabilité et Pollutions Marines, Présentation réseau RITMER-Pôle Mer Bretagne, CCI Saint-Malo, 30 Septembre 2009

### *Média*

1. Sud-Ouest, Admis à distance, DRT TISI, Conseil Général de la Charente-Maritime, Juillet 2002
2. FR3 Atlantique édition de La Rochelle, visioconférence entre Chicago et le Conseil Général pour le jury de DRT de Gilles Monnet, 1'10'', Juillet 2002.
3. Sud-Ouest, Les mathématiques pour bloquer le pétrole, 1<sup>ère</sup> page de l'édition locale de La Rochelle, 1<sup>ère</sup> page locale, page intérieure, Mai 2004
4. France Bleue La Rochelle, reportage d'actualité sur le lancement du projet Simbar, interviews de Georges Peigné puis de F. Muttin, Mai 2004.
5. Sud-Ouest, Frédéric Muttin travaille au stockage d'eau douce en mer, 1<sup>ère</sup> page de l'édition de La Rochelle, 1<sup>ère</sup> page locale, page intérieure, Octobre 2004
6. FR3 Atlantique édition de La Rochelle, le projet water balloon dans la fête de la Science, 1'30'', Octobre 2004.
7. Sud-Ouest, Frédéric Muttin, Pollution en miniature, projet Simbar, Janvier 2005
8. FR3 Atlantique éditions de La Rochelle et inter-régionale, Simbar-barrages anti-hydrocarbure, essais à L'IUT LEPTAB, Janvier 2005.
9. France INFO et Radio Bleue, Simbar-barrages anti-hydrocarbure, essais à L'IUT LEPTAB, Janvier 2005.
10. TF1 Journal Télévisé, Simbar-barrages anti-hydrocarbure, dossier de presse, Marie-Catherine Leblanc, 28 Janvier 2005
11. Sud Ouest, Jouer à Apprendre, une approche ludique de la science, 5 Avril 2005

12. Sud-Ouest, Frédéric Muttin, Jouer à apprendre une découverte ludique des sciences, Association des petits débrouillards, Marsilly, Mai 2005
13. Hebdomadaire Le Marin, Frédéric Muttin, projet Simbar, Mai 2005
14. France Bleue La Rochelle, reportage d'actualité sur le workshop international sur les barrages flottants , interviews de la Marine Nationale, du groupe TOTAL puis de F. Muttin, 2 Mars 2006.
15. F. Muttin, Expérimentation d'un Barrage Flottant Antipollution dans l'Estuaire de l'Elorn, communiqué de presse du projet BAR3D, 22 Janvier 2010
16. F. Muttin, Lutte contre les marées noires, un logiciel de calcul et des expérimentations échelle 1 : Résultats d'un projet de recherche sur les Barrages Flottants Antipollutions, communiqué de presse du projet BAR3D, 29 Janvier 2010
17. Radio Suisse Romande, Stéphane Délétroz - interviews de Georges Peigné (CEDRE), F. Muttin (EIGSI), Azin Amini (EPFL), Emission Bio-Sphère : Marée noire, et après ? épisode 3 : les barrages flottants, Chronique consacrée aux barrages flottants, 4 Juin 2010. <http://blogs.rsr.ch/biosphere/maree-noire-et-apres-episode-3-les-barrages-flottants/>

### *Grand public*

1. Le Journal du CNRS, Voiles du Trimaran Géronymo O. de Kersauson, issues de calculs réalisés, CRAIN, 1<sup>ère</sup> page de couverture, 1987
2. F. Muttin, Exposition et poster, projet Waterballoon fêtes de la Sciences, Université de La Rochelle-EIGSI, 11-15 Octobre 2004
3. F. Muttin, Conférence grand-public, SIMBAR: lutter contre les marées noires, Ecole de la Mer, Aquarium de La Rochelle, Fête de la Science 2005, 11 Octobre 2005
4. F. Muttin, Conférence grand-public, Le « Waterballoon », Ecole de la Mer, Aquarium de La Rochelle, 12 Décembre 2005
5. F. Muttin, Animation « Water balloon » Exposition H2O, école de la mer, Janvier 2005 à Mai 2006
6. F. Muttin, borne inter-active d'information scientifique pour le grand-public, « Simbar, barrages anti-pollution », école de la mer, Aquarium de La Rochelle, 2006
7. F Muttin, borne inter-active d'information scientifique pour le grand public, « Le water balloon , stockage et traitement d'eau douce en zone côtière» école de la mer, Aquarium de La Rochelle, 2006
8. Groupe Manche Atlantique de Plongée, GMAP Brest, Indicateur des Marées du Port de Brest 2010, Photo de verso de couverture : exercice de pose d'un barrage antipollution sur l'Elorn, Projet BAR3D, Direction Départementale de l'Equipement du Finistère, Novembre 2009

*Sites web de projets de recherche*

2004, <http://simbar.eigsi.fr>

2004, <http://waterballoon.eigsi.fr>

2007, <http://bar3d.eigsi.fr>

## ANNEXE Rapports d'étude les plus récents

---

### 2007-2008

1. F. Muttin, Logiciel de calcul 3D de barrage antipollution, Rapport semestriel n°1 contrat BAR3D, Agence Nationale de la Recherche, programme PRECODD, Juillet 2007
2. F. Muttin, Rapport Annuel n°1 BAR3D, contrat n° ANR-06-ECOT-003-01, convention n°0694C0067\_68\_69, ADEME-ANR, 35 p., 8 Février 2008
3. F. Muttin, Logiciel de calcul 3D de barrage antipollution BAR3D, Rapport semestriel n°2 contrat BAR3D, Agence Nationale de la Recherche, programme PRECODD, 8 p., 29 Février 2008
4. F. Muttin Rapport d'opérations, exercice barrage anti-pollution PALR, 16 p., 17 références, 11 Juillet 2008
5. F. Muttin, Logiciel de calcul 3D de barrage antipollution BAR3D, Rapport semestriel n°3 contrat BAR3D, Agence Nationale de la Recherche, programme PRECODD, 7 p., 11 Juillet 2008

### 2008-2009

6. F. Muttin PRECODD 2006: Rapport Justificatif de la Demande de Prolongation BAR3D, 9 p., 8 Septembre 2008
7. F. Muttin, B. Variot, S. Nouchi, Rapport Final Projet RAPACE, Partie 1 Simularions drone captif maritime, auteur :B. Variot, Partie 2 Banc d'essais GMP aéro-électrique moteur-hélices auteur : S. Nouchi, 21 Octobre 2008
8. F. Muttin, Logiciel de calcul 3D de barrage antipollution BAR3D, Rapport semestriel n°4 contrat BAR3D, Agence Nationale de la Recherche, programme PRECODD, 8 p., 5 Janvier 2009
9. F. Muttin PRECODD 2006: Rapport intermédiaire du projet BAR3D après 2 ans, Agence Nationale de la Recherche, programme PRECODD, 16 p., 3 Février 2009
10. F. Muttin, Logiciel de calcul 3D de barrage antipollution BAR3D, Rapport semestriel n°5 contrat BAR3D, Agence Nationale de la Recherche, programme PRECODD, 11 p., 27 Mai 2009

### 2009-2010

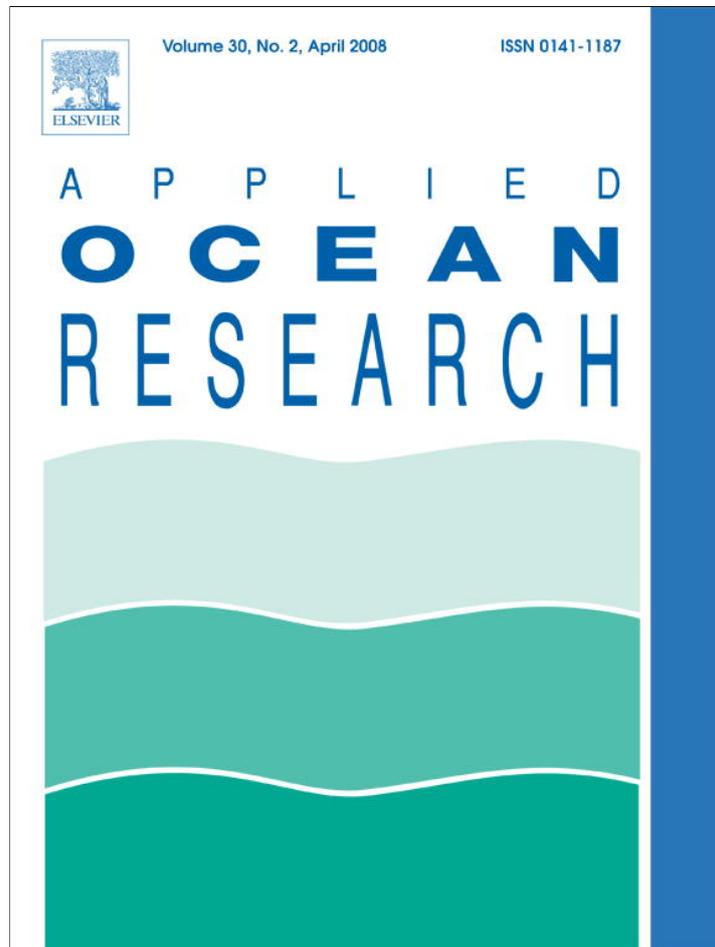
11. F. Muttin, Trois Expérimentations à Quasi Echelle 1, Projet BAR3D, Rapports Budgétaires Post-exercices, La Rochelle, Le 16 Décembre 2009, Lorient, Le 5 Janvier 2010, Elorn-Brest, Le 9 Décembre 2009.

12. F. Muttin, Compte-rendu final du projet BAR3D, synthèse, résumés Français et Anglais, suivi des livrables, indicateurs d'impacts et bilans, 14 pages, programme PRECODD 2006, Agence Nationale de La Recherche (ANR), 24 Juin 2010.
13. F. Muttin, Rapport final du projet BAR3D, synthèse, résumés Français et Anglais, et mémoire scientifique, 44 pages, programme PRECODD 2006, Agence Nationale de La Recherche (ANR), 24 Juin 2010.





# Exemplaires des publications



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Ocean Research

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/apor](http://www.elsevier.com/locate/apor)

# Structural analysis of oil-spill containment booms in coastal and estuary waters

Frédéric Muttin\*

Engineering School EIGSI La Rochelle, 26 rue de Vaux-de-Foletier F17041 La Rochelle Cedex 1, France

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 18 July 2007

Received in revised form

17 May 2008

Accepted 1 July 2008

Available online 15 August 2008

### Keywords:

Oil pollution

Floating pollution

Mechanical modelling

Current velocity

Safety coefficient

Membrane finite-element

## ABSTRACT

In this paper, the oil-boom concept is studied using a numerical model based on a non-linear membrane finite-element method. Several parameters are identified as having significant influence on the boom section geometry, on its mechanical stress and on its efficiency. The principal parameter acting on the boom efficiency is the normal sea current velocity. The main observed variable for the boom efficiency is the vertical angle of its skirt. A proposed numerical method is applied to the computation of a boom contingency plan. It is tested in the real environmental conditions of an estuary and a full tide cycle. The Elorn River Contingency Plan in France's Brittany Region was carried out to study oil containment efficiency. It is analysed during tide periods of a reference day. The role of the anchorage system on dead-masses and buoyancy coffers is emphasized. The tensions on the dead-masses, the mooring lines and the buoyancy coffers are considered in the computation. The result of the analysis in the boom stress limit suggests safety coefficients should be included in a boom contingency plan.

© 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Oil spill is a tragic anthropic pollution occurring in coastal and estuary waters. A main technological response used during oil-spill crisis is floating barriers called booms. They confine or deviate the floating oil pollution. They are positioned on the surface of the sea in estuaries, rias and coastal waters. Depending on the sea current, oil booms can confine oil at low current velocity. It can also deviate oil at high current velocity. It is important to emphasize that booms can only contain, concentrate, or deviate pollutants. The recovery of pollution is accomplished by using a pump or a skimmer. A boom can also be used at high sea. It can be tugged by an oil recovery vessel and used as a kind of sweeping arm on the surface of the sea.

Booms are made of a floating tube, an immersed skirt, a longitudinal leach and a longitudinal chain. The chain contributes both weight and tension. The leach is generally located on the skirt top. The chain is located on the skirt bottom. Booms are moored on the seabed near the shore, a port or an oil terminal.

The intrinsic limitation of the boom efficiency is the presence of sea current. The boom efficiency is limited by the normal component of the current velocity with respect to a boom's direction. Our case study analysis of boom inefficiency is shown in Fig. 1. It shows an environmental condition where a strong current is present. We observe that the boom skirt becomes quasi horizontal. This skirt angle can result in the leakage of some floating oil pollution. The empirical value of 0.35 m/s is commonly

admitted for the maximal current velocity. When the current velocity is under this limit the boom can be placed normally in the current. If the boom has a quasi-vertical skirt then it can confine the oil. When the current exceeds this limit, to reduce the hydrodynamic pressure, the boom is placed in such a way that its normal direction is at an angle with the current direction. Empiric rules exist to define this angle and in that case, the boom skirt must remain in a quasi-vertical position to guarantee oil deviation. In order of importance, two other physical effects have less influence on the boom efficiency: (1) the waves force and (2) the wind pressure.

Choices made about efficient boom devices and their installation plan are the main critical issues when organizing counter-pollution actions. Due to the complexity of the coastal environment to be protected, many kinds of booms and many different boom applications are available. An overview of the existing boom equipment indicates the existence of more than a thousand boom references and a hundred manufacturers [1]. In a given pollution crisis, the crisis team has to make a choice about the best kind of boom and the best installation plan. Note that a boom moored on shore has intrinsic limitation. It is also important to note the natural coastal sea conditions vary in space and time. Consequently, a boom installation problem is complex to formulate and to solve. Most of the tools available for decision-making are empirical. Therefore limits of booms suggest the use of mechanical modelling.

The aim of this paper is to propose a numerical modelling for the structural analysis of oil booms. For that purpose we will do two complementary studies. The first study concerns the modelling of a boom section and the second study concerns the modelling of a complete boom plan.

\* Tel.: +33 5 46 45 80 19; fax: +33 5 46 45 80 10.

E-mail address: [muttin@eigsi.fr](mailto:muttin@eigsi.fr).



Fig. 1. Boom behaviour under a strong current.

Published scientific research about booms focuses mainly on the hydrodynamic aspect [2–4]. The oil boom structural behaviour is less studied. The first structural analysis on booms was published in 1993 by a USA team. They used a finite-element method based on a beam element [5]. A one dimensional simplified method exists where a Catenary Curve is proposed for the boom geometry on the surface of the sea [6], and a first-order differential equation is proposed for the boom tension vector [7]. Here, we propose to use a three dimensional model based on a non-linear membrane finite-element. In addition, we notice a similar approach for the modelling of fishing nets when using a non-linear cable finite-element [8]. When it comes to technological innovations of booms very little research has been published: studies focus on hydrodynamic of booms having multiple skirts [9] and mechanical behaviour of booms adapted to rivers [10].

## 2. Mechanical modelling

The French Administration of Ecology and Sustainable Development funded the national research project, SIMBAR, about “Oil Spill Boom and Contingency Plan Modelling”. It was launched in March 2004 under the label of the research and innovative technologies network, RITMER, on accidental maritime pollutions. The main objective of SIMBAR was the knowledge improvement of oil booms under operational constraints. To this end, the project provides a modelling of booms by coupling a hydrodynamic study with structural analysis [11]. This paper focuses solely on the structural analysis of booms. The computations were done by using a non-linear membrane finite-element method because the boom device and the boom plan mechanical models needed to be well defined.

### 2.1. Boom device section

According to the large transversal displacement of a boom, the structural computations are based on a non-linear membrane finite-element. The geometry of each element is a quadrilateral bilinear surface [12]. The finite-element mesh uses a boom section composed of four different parts. The boom section mesh is shown in Fig. 2. The description of these four parts follows:

- (1) The cross-section of the float is decomposed into an even number of elements to maintain a symmetrical motion. The first possibilities for the float cross-section decomposition are four, six, eight or ten equal parts. The sixth and tenth part decompositions are incompatible with both vertical and horizontal internal membrane partitions of the float (double chamber float). Thus the total number  $n$  of finite-elements must be reduced hence the computational time is limited. Considering that the computational time is proportional

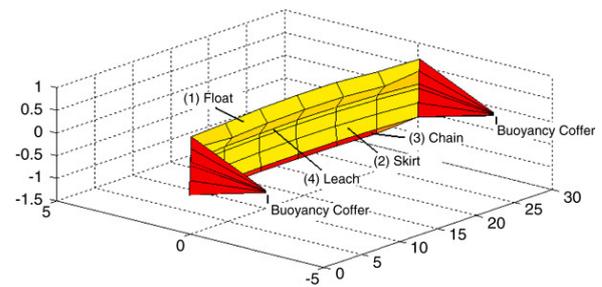


Fig. 2. Mesh of a boom section with its triangular fixations.

with  $n^3$ , we chose to decompose the cross-section of the float into four equal parts. The decomposition with eight parts has been eliminated because it exceeded a moderate computational time. If the float is a circular tube it means the finite-element mesh of its cross-section is a square. Note that the float extremities are closed like a toothpaste tube bottom (Fig. 1). It is important to note the float mesh must also be compatible with supplementary vertical closings. The study of these supplementary vertical closings is not presented here.

- (2) The skirt cross-section is decomposed with a minimum number of elements. A two element decomposition was chosen so that a three node parabolic interpolation can give the skirt vertical curvature.
- (3) The finite-elements of the chain are attached to the skirt bottom elements. The chain elements at the boom section extremities have a reduced width. These two width reductions favour the chain elements rotation around their axis.
- (4) The finite-elements of the leach join the skirt top elements with the float bottom elements. The material thickness of the leach is a multiple of the fabric thickness of the skirt.

The main dimensions of the boom taken as a reference are: 50 cm for the float diameter, 75 cm for the skirt height, including 10 cm height for the chain and 10 cm height for the leach (Fig. 2). In this figure, the two triangular parts placed perpendicularly at the boom section extremities are the stabilizing devices of the boom section on two buoyancy coffers. These coffers are not represented in Fig. 2. From each coffer starts a mooring line attached to a dead-mass on the seabed of coastal or estuary water. A mooring line is composed of lengthened membrane finite-elements. The horizontal projection length of a mooring line is equal to the depth of the sea multiplied by three. The current direction is assumed to be normal for the boom section in the analysis carried out (Section 3.1).

### 2.2. Elorn boom plan

The Elorn River Estuary is located east of the French city, Brest. The Elorn River Boom Contingency Plan is shown in Fig. 3. In Fig. 3 the west direction is on the left. The letters A to G indicate the locations of the boom section extremities. The Elorn Boom Plan is rectilinear. It is composed of six boom sections. The boom sections are each 171.2 m long. The total boom plan length exceeds 1 km. The  $2m^3$  buoyancy coffers are placed at several locations from points B to F. The boom is attached to a rigid coastal structure at points A and G on the shore. The buoyancy coffers are moored on dead-masses weighing 6 T. At point E, the coastal water depth reaches 12 m at high tide.

As a consequence of the current inversion due to the tide effect, two stabilizing devices and mooring systems (buoyancy coffers, mooring lines, and dead-masses) exist upstream and downstream. The boom plan mesh is shown in Fig. 4. Doubling the stability permits reducing boom displacement amplitude when the tide reverses.

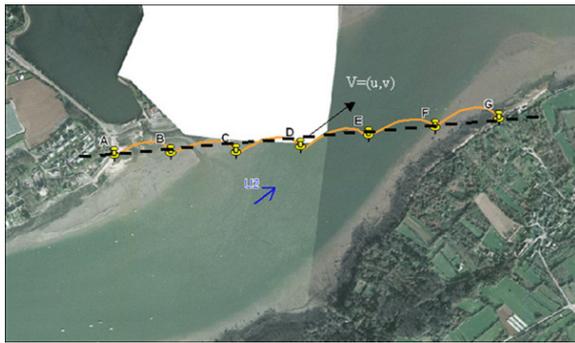


Fig. 3. Elorn River Boom Contingency Plan.

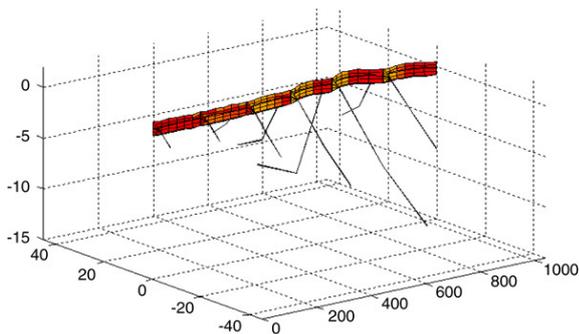


Fig. 4. Elorn River Boom Plan at the time period #7.

A normal to the boom's direction forms a specific angle in relation to the main current direction  $U_2$ . This permits reducing the normal current velocity and hence provides less boom stress and less oil leakage. The normal current is the source of the main hydrodynamic force favouring oil leakage under the boom. The Elorn Boom Plan is installed so that it deviates oil coming from the ocean towards point G. The current velocity field around the Elorn River Boom Plan has been computed using the TELEMAC-2D numerical model. The current considered along the boom is a non-uniform field in space and time. The angle between the sea current and the Elorn Boom Plan varies in the analysis cited later in this paper (Section 3.2).

### 2.3. Parameters and variables

To define a boom section and a boom contingency plan, it is to be noted the number of parameters number exceeds seventy. These parameters concern the boom section (geometrical and mechanical properties), its environment (seabed and shoreline) and the oil–water flow properties.

In the SIMBAR Project, twelve parameters (geometrical, mechanical) of a reference boom section were considered. It uses a finite-element mesh of a 30 m long boom section. A scaling operation, applied to the vector of the mesh coordinates, can generate a given boom section length (150 m is the length considered in Section 3.1). A recursive operation, applied to the mesh connections, can generate a rectilinear boom plan mesh for a given number of sections [13]. This will be considered in Section 3.2.

The principal hydrodynamic force on a boom section is the pressure force coming from the normal current velocity. In the SIMBAR Project, the drag coefficient defining the boom pressure force has been measured during tests in a hydrodynamic channel. The Froude Scale Factor to be used is 1/15. Different values of the skirt angles have been considered for the drag coefficient measurement. The wave and wind actions are considered respectively as second and third order external forces in comparison to the current. Here,

wave and wind actions are not considered in the boom structural analysis.

In the SIMBAR Project, the oil leakage flow around a two dimensional vertical boom cross-section, has been computed using the numerical model SPARTACUS-2D. It uses the "Smoothed Particle Hydrodynamics" SPH-method [14,15]. This permits obtaining a table for the reference boom cross-section efficiency of oil containment. This table gives the containment efficiency knowing the boom skirt angle, the oil density and the normal current velocity. For example, this table indicates the containment of light oil for a sea current of 0.3 m/s and a skirt angle of  $\pm 10^\circ$ . The main observed results of boom section computation are the skirt angle  $\theta$ , the chain tension  $\sigma_{ch}$  and the leach tension  $\sigma_{sa}$ . In a boom plan computation the principal results added are the vertical forces on the buoyancy coffers and the horizontal forces on the dead-masses moored on the sea-bed.

## 3. Results

### 3.1. Boom section

In this section we will analyse the influence of the following three parameters to illustrate the accuracy of the proposed method. The choice of these parameters will have an effect on different aspects, the geometry, the constitutive material and the maritime environment of a boom. The analyzed parameters are: (a) the boom section length (30 m, 150 m), (b) the chain and leach elastic stiffness ( $\pm 20\%$  for the chain stiffness,  $\pm 50\%$  for the leach stiffness), (c) the sea current velocity (from 0.2 m/s to 1 m/s). In Table 1(a)–(c), the boom section variables are the skirt angle, the chain stress and the leach stress.

- We compare the boom model results of a 30 m long section with a 150 m long one. As stabilizing boundary conditions, we chose the boom points attached on the buoyancy coffers at the height of the leach. It is the height of the float bottom (Fig. 2). In each case (30 m or 150 m), the Archimedes Force on the float is adjusted so that it gives a minimum vertical displacement of the boom from the sea surface level. The variables results of the 30 m and 150 m long sections are given in the Table 1(a). The 150 m section skirt appears less vertical than the 30 m one. For the 150 m section, the maximum horizontal displacement is multiplied by a factor around 7 compared to the 30 m long section. This means the chain tension increases as the section length increases with a multiplication factor around 4. The leach tension is very much the same in both cases.
- Table 1(b) gives the influences of the chain and the leach stiffness on a boom section of 150 m long (float extremities with vertical closings). The variable  $\theta$  equals  $-13.5^\circ$  for the chain and leach mid stiffness values. When the chain is more stiff ( $+20\%$ ), the skirt angle increases and the skirt radius of curvature decreases. When the leach is more stiff ( $+50\%$ ), the skirt angle  $\theta$  decreases and the skirt radius of curvature increases. Hence the skirt cross-section is straighter. Thus chain stiffness appears as a parameter linked to the amplitude of both boom horizontal displacement and chain tension. From an operational point of view, we notice the boom reinforcement by a chain placed at the leach location (skirt top) increases the boom brittleness.

**Remark.** The vertical displacement of the skirt bottom is higher when the leach is stiffer. The interpretation is the conjunction of two effects: the radius of curvature is higher (2.83 m instead of 1.95 m) and the skirt vertical angle remains negative ( $-12.8^\circ$  for  $-13.5^\circ$ ). The radius of curvature augmentation renders the skirt straighter. Consequently the hydrodynamic force is higher and

**Table 1**  
Parameters influences on boom variables

(a)						
Boom section length (m)	Skirt top vertical displacement (cm)	Skirt top horizontal displacement (cm)	Skirt angle $\theta$ ( $^\circ$ )	Chain tension (N)	Leach tension (N)	
30	19.7	27.2	-3.96	2930	319	
150	10.6	188	-11.7	11500	331	
(b)						
Leach stiffness ratio	1	$\frac{1}{1}$	1	0.5	$\frac{1}{1}$	1.5
Chain stiffness ratio	0.8	$\frac{1}{1}$	1.2	1	$\frac{1}{1}$	1
SKIRT						
Angle $\theta$ ( $^\circ$ )	-13.3	-13.5	-13.7	-13.6	-13.5	-12.8
Curvature	-0.505	-0.513	-0.515	-0.507	-0.513	-0.353
Radius of curvature (m)	1.980	1.949	1.942	1.972	1.949	2.833
SKIRT TOP						
Horizontal displacement (m)	2.11	1.98	1.88	1.98	1.98	1.98
Vertical displacement (cm)	-4.71	-4.73	-4.67	-4.83	-4.73	-7
SKIRT BOTTOM						
Horizontal displacement (m)	1.94	1.81	1.7	1.81	1.81	1.81
Vertical displacement (cm)	-1.84	-1.76	-1.63	-1.86	-1.76	-4.57
CHAIN tension (N)	10700	11600	12400	11600	11600	11550
LEACH tension (N)	353	344	338	344	344	339
(c)						
Current velocity (m/s)	0.3		0.7			
SKIRT						
Angle $\theta$ ( $^\circ$ )			-13.1			-43.5
Curvature			0.512			0.875
Radius of curvature (m)			1.95			1.14
SKIRT TOP						
Horizontal displacement (m)			1.97			3.70
Vertical displacement (cm)			-4.75			-28.1
CHAIN stress (N/m)			8.17e + 5			26.6e + 5
LEACH stress (N/m)			870			2630

remains oriented to the bottom. This results in the boom dropping down a bit.

(c) Table 1(c) gives the sea current velocity influence on the geometry and on the stress of a 150 m long boom section (0.3 m/s, 0.7 m/s). The current velocity augmentation results in the fact that the skirt horizontal and vertical displacements increase. The current velocity level changes significantly the boom geometry. We observe a  $\theta$  angle range  $[-13^\circ, -43^\circ]$  and a significant variation of the skirt curvature. The chain and the leach stress increase when the current velocity increases.

**Remark.** The relationship between the skirt angle and the current velocity is showed in the Fig. 5. Here we find the computations correspond to the current velocities: 0.2 0.3 0.35 0.4 0.5 0.7 and 1 m/s. A null skirt angle is associated to a null current velocity. The resulting computations focus on the critical velocity empirical value for the boom containment efficiency. Remarking an “S” curve for the graph obtained, we represent the interpolation curve obtained with a 3rd degree polynomial. The inflexion of the curve is observed at 0.45 m/s. It is higher than the empiric critical value at 0.35 m/s. Note that the skirt angle  $-10^\circ$  defining a hydrodynamic efficiency threshold in SIMBAR Project, more or less, corresponds to the current velocity 0.26 m/s. The hydrodynamic force depends on the square of the current velocity. The third order indicated here shows the non-linear behaviour of the boom structure. The resulting interpretation is the skirt angle increases with less induction of membrane stress before the critical velocity than after.

3.2. Elorn boom plan

The boom plan on the Elorn Estuary in France's Brittany, is computed several times using a reference day; the 13th of

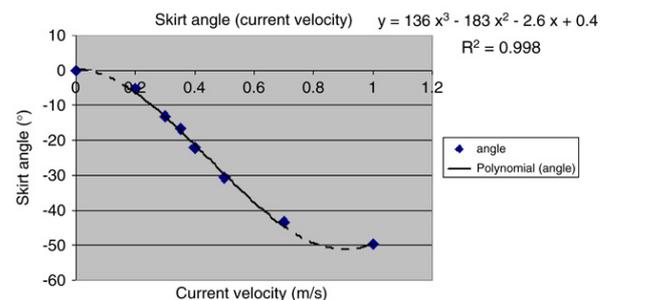


Fig. 5. Skirt angle vs current velocity.

December 2005. The current conditions taken into account around the boom correspond to a tide coefficient of 73 and a mean water depth in the Elorn River. The sea level variation rises to 3.44 m during this tide cycle. At 1h 08' (TU) of the reference day the tide is high. The duration of a tide cycle is a little more than twelve hours. Consequently, we choose six times every two hours for the different boom computations and these six times are numbered from #2 to #7. These computations lead to a boom position evolution during a full tide cycle.

As previously seen, the current velocity variations can have a significant influence on both boom skirt geometry and chain tension. It is also true for the resulting forces on the dead-masses and the buoyancy coffer. Table 2 gives the results of the boom plan section #5 (section [E, F], Fig. 3). The centre of the boom section #5 presents the maximum skirt angle of the boom plan. It gives the most critical location of the boom plan for an eventual oil leakage.

**Table 2**

Boom section #5 vs time periods of the reference day

Boom section #5 time period #	Skirt angle $\theta$ at section centre ( $^{\circ}$ )	Chain tension at section centre ( $10^4$ N)	Maximal vertical force on the buoyancy coffer (10 N)	Maximal horizontal force on the dead-masses ( $10^4$ N)
2	-6.43	3.67	393.2	0.4801
3	4.79	3.23	385.4	0.3987
4	15.4	6.85	568.5	1.0340
5	8.04	3.93	366.4	0.5298
6	-0.0592	0.343	176.3	0.0296
7	-10.9	5.31	451.0	0.8189

**Table 3**

Elorn Boom variables at the time period #7

Time period #7 Boom section #	Skirt angle $\theta$ at section centre ( $^{\circ}$ )	Chain tension at section centre ( $10^4$ N)
1	-0.0576	5.33
2	-0.115	5.34
3	-2.01	5.33
4	-7.68	5.33
5	-10.9	5.31
6	-7.58	5.33

The maximum current velocity during high tide period of the reference day occurs 30 min after the two hour time period #7. It is near point *F*, with a velocity difference near 0.01 m/s. For this quasi-maximum of the high tide current (two hour time period #7 of the reference day), the boom sections results are given in Table 3. The boom plan geometry is shown in Fig. 4. The mooring lines connected to the upstream dead-masses are mainly stressed by the current while the mooring lines connected to the downstream dead-masses benefit from their own weight.

At a specific time, the chain tension is quasi-constant along the boom contingency plan. The chain tension is near  $5.3 \cdot 10^4$  N during the two hour time period #7. We observe the Elorn Boom skirt and a float turn the chain around in the downstream direction. As a consequence, the angle  $\theta$  is negative. During high tide the maximum skirt angle is  $-10.9^{\circ}$  at the centre of the boom section #5 during the two hour time period #7. At this time, the current velocity is 0.39 m/s at point *F*. The velocity components are (0.25, 0.3) m/s. According to the efficiency table for oil pollutant containment (SPARTACUS-2D computations of the SIMBAR Project), suggests that the leakage of a "heavy oil" is possible. In contrast, for "light oil" pollution, the Elorn Boom Plan appears accurate in regards to the containment.

A hand made simple calculus permits a control of the order of the chain tension. It was successfully used for the boom section #5 during the two hour time period #7. This simple calculus uses a triangle of forces built with the boom tension, the hydrodynamic force, and the boom horizontal displacement.

The maximum vertical force acting on the buoyancy coffer is indicated in Table 2. This force results from the mooring line tension and the boom attachment force. The maximum is obtained during low tide. It equals 5685 N at a coffer located near point *E*, during the two hour time period #4. The safety coefficient on the volume of a  $2 \text{ m}^3$  buoyancy coffer equals  $2000/568 = 3.52$ . During the high tide, the maximum vertical force on a buoyancy coffer equals 4510 N at a coffer near point *E* during the two hour time period #7. Here, we observe the vertical force on a coffer depends on its location in the Elorn Boom Plan.

During the two hour time period #4 at low tide, we obtain the maximum horizontal force on the dead-masses. Its value is 10340 N at the upstream dead-mass moored near point *F* (Table 2). At high tide we obtain the maximum value 8189 N, during the two hour time period #7, for downstream dead-mass moored near point *F*. At high tide, this force is less than at low tide. The safety coefficient for a dead-mass (6 T) depends on its volume, on its

**Table 4**

Elorn Boom variables at the next tide down

Time period #8 Boom section #	Skirt angle $\theta$ at section centre ( $^{\circ}$ )	Chain tension at section center ( $10^4$ N)
1	0.0688	7.37
2	0.232	7.37
3	2.05	7.37
4	11.2	7.36
5	16.6	7.36
6	8.47	7.38

maximum horizontal traction and on its friction coefficient on the seabed. The horizontal force on a dead-mass depends on its location in the Elorn Boom Plan.

Table 4 gives the boom plan results for a supplementary two hour time period #8. It corresponds to the next low tide of the reference day (nearly 18 h after the two hour time period #2). The sea current velocity is higher compared to the first low tide taken during the two hour time period #4. These last results show the variability of the boom behaviour (skirt angle, chain tension) in terms of time. The effects of high tide current velocity are a very strong influence.

#### 4. Discussion and conclusion

This boom analysis was first carried out using a three dimensional approach with a membrane finite-element. From a numerical point of view, we recommend constraining the model for the vertical nodal displacement of the float bottom line. It permits saving computational time improving the stability of the method being used. As a consequence, the Archimedes Force on the float is only a part of the reaction force appearing on the float bottom line. In future, we have to make progress with the method for coupling the current hydrodynamic force and the vertical boom displacement.

From an operational point of view, the results on the Elorn River Boom show the pertinence of the proposed method. The structural boom model can integrate the real-life natural conditions of an estuary. The computations indicate a quasi-constant tension of the chain along a straight boom contingency plan. The main boom variable indicating the containment efficiency is the angle  $\theta$  between the cross-section of the skirt and the vertical axis. Hence the crisis team organisations use a three dimensional boom model to enhance a plan definition and achieve an *in-situ* control of the boom position after its installation.

Moreover, the Elorn Boom results suggest introducing two kinds of safety coefficients. The first coefficient is a safety factor and concerns the highest supportable current conditions before boom material breaking. A second coefficient concerns the sea current limit guaranteeing the boom plan containment efficiency.

From Tables 2 and 4, we can extract the following ratio  $7.36 \cdot 10^4 \text{ N} / 6.85 \cdot 10^4 \text{ N}$  corresponding to the maximum chain tension at section #5 during the two low tide periods of the reference day. This ratio 1.07 indicates that the boom plan tension is variable from one low tide to another. To keep the boom from

breaking, we recommend a computation using the maximum hydrodynamic force (tide coefficient) of an installation period (a month or more) taking into consideration both high and low tides. The maximum current at low tide may depend on an eventual flood event for the river flowing into the estuary. The maximum chain tension multiplied by this safety factor must be equal to the tension of the breaking point. For sailing race structures, we notice the practice of the empirical factor of 1.8 to deduce the dynamic load value from a static load computation. Another approach uses Gaussian Curves for both tension and breaking point distributions. A safety factor between the maximums of these curves corresponds to the break/tension method [16]. Finally, we noticed for some innovative maritime structures, when empiric force evaluations are given, a safety factor value of 5 on the applied load. In our case study analysis, the chain tension break is  $32 \cdot 10^4$  N. It is divided by the maximum chain tension, here  $7.36 \cdot 10^4$  N for the two tide cycles considered. It gives a safety factor of 4.34.

From Table 2, let us extract the skirt angle value  $-10.9^\circ$  at the centre of the boom section #5, during the two hour time period #7 of the reference day (high tide maximum current). Using the table for oil pollutant containment of the SIMBAR Project, it is possible to understand the boom containment performance at a specific time for a given oil pollutant. Nevertheless, the current conditions and the boom geometry change during an installation period. Even though the kind of pollutant is known, the time period for pollutants to arrive on the boom contains uncertainties [17]. As a consequence, we propose the construction of a partition. The first level of the partition is composed of the  $N_1$  time period numbers for high tide when the current velocity and the boom skirt angle suggest boom efficiency for a given pollutant. The other level is composed of the complementary  $N_2$  time period numbers of high tides suggesting boom inefficiency. The probability  $N_1/(N_1 + N_2)$  gives a reliability factor for the boom efficiency. We take again Table 2 as an example. We consider that the installation period is the first tide cycle of the reference day. The time #2, #6 and #7 are high tide numbers. Considering the skirt angle obtained for these time period numbers, the normal current velocity, and the table for oil pollutant containment, we can estimate for a “light oil” pollutant that the reliability factor of the boom is equal to  $3/3 = 100\%$ . For a “heavy oil” pollutant the reliability factor is equal to  $2/3 = 66\%$ .

**Remark.** For the above reliability factor evaluation, we suppose that the oil pollutant touches the total length of the boom during the duration of all high tides. Consequently, we neglect a non-uniform oil arrival probability. This probability is space-dependant (along the boom plan) and time-dependant (during the tide up period). Depending on the estuary current conditions, each point of a boom plan has a specific probability to be touched by pollutants. Depending on the tide current, the probability of the oil arrival during a high tide may be non-uniform when the sea current rises.

## Acknowledgments

This study was carried out in the project SIMBAR which was financially supported by the French Administration of Ecology and Sustainable Development (MEDD), contract n° CV 13 2003/CV 03000142. We gratefully acknowledge the collaborations of the CETMEF, the CEDRE, the Laboratory LNHE of EDF and the University of La Rochelle, as well as the contributions and exchanges provided by the research network RITMER.

## References

- [1] Centre de Documentation de Recherche et d'Expérimentations sur les Pollutions Accidentelles des eaux (CEDRE) Les barrages flottants dans la lutte contre les pollutions en zone côtière. Etat de l'art sur les matériels commercialisés. Report CEDRE n° R.95.14.C, 1995.
- [2] Lepetit JP, Darras M. Barrages flottants anti-hydrocarbures – étude bibliographique du comportement de la nappe d'huile. Industrial Report EDF n° HE042/78-27, Direction des Etudes et Recherches, EDF, 1978.
- [3] Fang F, Johnston AJ. Oil containment by boom in waves and wind. I: Numerical model. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean. Engineering 2001; 127(4):222–7.
- [4] Amini A, Mahzari M, Bollaert E, Schleiss A. Fluid-structure interaction analysis applied to oil containment booms. In: International oil spill conference 2005. Proc. international oil spill conference IOSC 2005. Index by year & title. 2005. p. 405.
- [5] Badesha SS, Hunt J, Wenck E. Structural analysis of oil containment booms. In: International oil spill conference 1993. Proc. International oil spill conference IOSC 2005. Index by year & title. p. 199.
- [6] Delagdo L, Kumzerova E, Martynov M, Mirny K, Shepelev P. Dynamic simulation of marine oil spills and response operations, 4th International conference on hydrocarbon spills, modelling, analysis and control, oil-spill 2004. Alicante: Wessex Institute of Technology, Universidad de Alicante; 2004.
- [7] Darras M. 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. 1984.
- [8] Priour D. Calculation of net shapes by the finite element method with triangular elements. Communications in Numerical Methods in Engineering 1999;15(10):755–63.
- [9] Wong K-FV, Barin E. Oil spill containment by a flexible boom system. Spill Science and Technology Bulletin 2003;8(5–6):509–20.
- [10] Triskel Marine Ltd (TRISKEL). MJ information 'V' booms victorious pollution trial. Maritime Journal 2005;41.
- [11] Muttin F, Guyot F, Nouchi S, Variot B. Experimental numerical and optimisation study of oil spill containment boom. In: Brebbia CA, Perez JMSaval, Andion LGarcia, editors. Coastal environment v incorporating oil spill studies: 4th International seminar on hydrocarbon spills modelling, oil spill 2004. WIT Press; 2004. p. 421–30.
- [12] Haug E, Powell GH. Finite element analysis of non linear membrane structures. IASS Pacific symposium part II on tension structures and space frames. Paper n° 2–3, Architectural Institute of Japan, Conference Proceedings; 1972.
- [13] Muttin F, Nouchi S. Numerical study of oil spill containment boom by the finite-element method. In: Brebbia CA, do Carmo JSAntunes, editors. Water pollution VIII: 8th International conference on modelling. Monitoring and management of water pollution. WIT Press; 2006. p. 245–54.
- [14] Buvat C, Violeau D. Lagrangian numerical modelling of boom and oil spill motion for the management of coastal pollution risk. In: Proc. VIth hydroinformatics conference (AIRH); 2006.
- [15] Violeau D, Buvat C, De Nanteuil E, Abed-Meraim K. Numerical modelling of boom and oil spill with SPH. Coastal Engineering 2007;54:895–913.
- [16] Marovici C, Ligeron JC. Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique. Techniques et Documentation éditeur; 1974.
- [17] Sebastião P, Guedes Soares C. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in open sea. Ocean Engineering 2007;34(3–4):576–84.

# OIL SPILL BOOM MODELING, NUMERICAL APPROXIMATION AND CONTINGENCY PLAN OPTIMIZATION\*

F. MUTTIN

**Abstract:** Using a non-linear membrane theory we establish a mechanical model for oil spill floating boom. The model is based on the minimization of the internal strain energy minus the external energy of the applied forces. The discretisation of the boom uses a four-nodes quadrilateral finite-element. The non-linear variational problem is solved using the Newton-Raphson method. The vertical angle of the boom skirt is computed and is used to evaluate the oil containment efficiency. A boom plan tactical optimization problem is formulated. Several real-life operational constraints are given for the boom plan definition. Numerical examples illustrate the capability of the numerical model.

**Key words:** *membrane theory, finite-element method, fluid-solid interaction, tactical optimization*

**Mathematics Subject Classification:** *74K15, 74G05, 74-02, 76B75*

---

## 1 Introduction

Oil pollution is a major problem within maritime and coastal environments. For a survey of the Asian-Pacific region, a *CEDRE* bulletin [2] during 1997, mentions the ship wreck of the tanker *Nakhodka*, in the West of the Honshu island Japan 6, 240T spilled, forty accidents in the Hong-Kong harbor during the years 1995-1996 from 20L to 50T, and six hundreds sabotages of Colombia's pipe-lines during the decay 1986-1996 up to 140,000T.

Before any optimization of response technologies, the most adapted one must be found first, in accordance with the pollution location, the oil properties and the operational conditions. In this paper, we study the floating oil barriers, named booms. Near the shoreline, the objective of the technology is to contain the oil on the sea surface, or to deviate the oil to a coastal point.

In this paper, we are interested in the mechanical modeling of oil spill boom. The proposed model is based on the minimization of the total mechanical energy of the boom structure. We describe the continuous problem and the pressure term involved. A discrete solution is obtained using the finite-element method.

A boom plan tactical optimization problem is given so that minimizing oil leakage under the boom. We give the operational point of view which must be included in any boom plan optimization procedure. Note that many others optimization problems are not treated here, such as oil skimming, waste treatment, oil slick survey, waste storage, total response time for clean up operations [20], work force strategy [18](200,000 voluntary persons during the *Nakhodka* clean up operation).

---

\*This research is supported by the French Research Agency *ANR*, and *ADEME*, under grant  $N^0$  *BAR3D/0694C0067*,  $N^0$  *ANR - 06 - ECOT - 003 - 01*.

This work is motivated by some recent numerical results [12] and by recent numerical and experimental study of the oil boom hydrodynamic [4]. Indeed, in the historical reference [6], the authors have provided the membrane finite-element considered in this paper. The established existence and regularity of the solution of the mechanical membrane problem is not treated here.

Mathematical studies concerning oil spill problems are numerous, and focus on different aspects such as stochastic approach in harbor [7], probabilistic approach of boom containment [3], and oil boom hydrodynamic [23]. Boom hydrodynamic studies [5] [22] are most numerous than boom structural studies [1].

External loads on boom come from three sources, the sea current, the waves [9], and the wind, given in decreasing order of importance. In this paper, we will study the first loading factor, the sea current. It is studied as an inefficiency factor for an oil volume contained by booms [3] [17].

The paper is organized as follows. Boom theory is given in section 2 using membrane theory. Numerical and mechanical approximations are described in section 3. Optimization problems are set in section 4. Numerical examples and a real-life boom are considered in section 5.

## 2 Boom Theory

Let us first give the boom domain definition.

**Definition 2.1.** A boom domain imbedded in the three dimensional euclidian space  $\mathbb{R}^3$  is defined as a set  $\omega$  of  $N$  boom sections including each four devices

$$\omega = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \omega_{i,j}$$

where  $\omega_{i,1}$  is the boom section numbered  $i$  composed of a float, a skirt, including at its bottom a chain and at its top a leach,  $\omega_{i,2}$  is a mini skirt  $i = 1 \dots N - 1$  linking adjacent boom sections,  $\omega_{i,3}$  is a mooring device between a boom section end and a buoyancy coffer,  $\omega_{i,4}$  is a mooring line device between a buoyancy coffer and an anchor or a dead mass moored on the sea bed. The superscript  $RL$  added to  $\omega_{i,3-4}^{RL}$  means the right or the left end of a boom section. The superscript  $+ -$  added to  $\omega_{i,3-4}^{RL,+ -}$  means the end far away (+) or closed (-) to a boom section.

The sea level at a given time is denoted  $l$ , the water depth is  $h$ , the immersed boom height is  $Z$ , the common line between the float and the skirt of a boom section is denoted  $l_{i,1}$ , the floating line of a boom section is denoted  $f_{i,1}$ . We have

$$\omega_{i,1}|_{z=l} = f_{i,1}$$

We show the boom domain on the figure 1. Note that the buoyancy coffer positions will respect

$$\omega_{i,3}^{RL,+} = \omega_{i,4}^{RL,-}, \forall RL, \forall i$$

It means that the head of the mooring line (coffer-anchor) closed to the boom coincides with the end away from the boom of the mooring device (boom-coffer). It corresponds to the buoyancy coffer position.

The boom domain is placed in the euclidian space with the following convention. The first axis  $x$  follows the boom domain. It is given by  $l_{i,1}$  for straight boom plan before boom

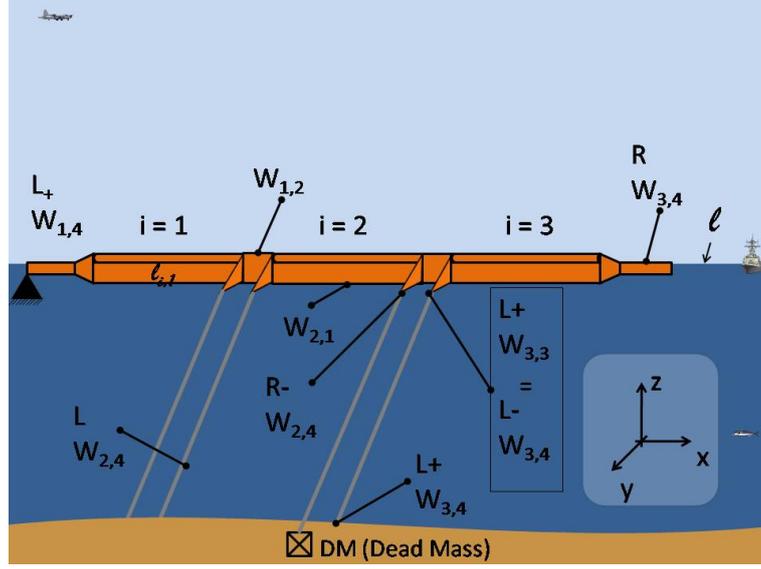


Figure 1: Boom domain decomposition

deformation. The second axis  $y$  follows the sea current to the downstream direction, when the current is normal to the boom. The third axis  $z$  follows the sea water depth from the sea bed.

**Definition 2.2.** The set of the boom admissible displacements  $V_a$  is defined by

$$V_a = \left\{ u : \omega \rightarrow \mathbb{R}^3, u|_{\omega_{i,4}^{RL,+}} = 0(x, y, z), u|_{\omega_{i,4}^{RL,-}} = 0_z \right\}$$

where, the first condition corresponds to a fixed anchor, a dead mass or a point on the shore, and the second condition corresponds to the null vertical displacement of a buoyancy coffer on the sea surface.

For the boom mooring on a mast, a tanker hull magnet, or a vertical stressed line along a quay, we use the following condition instead of the first one.

$$u|_{\omega_{i,4}^{RL,+}} = 0(x, y)$$

We will define the functional to be minimized in the boom mechanical problem. The boom domain after displacement is denoted  $\omega + u$  and  $u$  is the boom displacement.

**Definition 2.3.** The total mechanical energy related to an admissible displacement  $u$  of a boom is given by the functional  $e : V_a \rightarrow \mathbb{R}$  defined by

$$e(u) = e_i(u) - e_e(u)$$

The internal mechanical stress energy  $e_i$  is given by

$$e_i(u) = \frac{1}{2} \int_{\omega} \text{tr}(\sigma(u)x(u))d\omega$$

where  $\text{tr}$  indicates the trace operator,  $\sigma$  the Piola-Kirchhoff stress tensor of second kind,  $x$  the Green strain tensor.

The external load potential energy is given by

$$e_e(u) = \int_{\omega+u} (-p\vec{n} \cdot \vec{u} + \vec{d} \cdot \vec{u}) d(\omega + u) - \int_{\omega+u} \rho g \vec{z} \cdot \vec{u} d(\omega + u)$$

where  $\vec{d}$  indicates the tangential drag friction force,  $p$  the normal current drag pressure and the normal inflating pressure,  $\vec{n}$  the unit external normal to  $\omega + u$ ,  $\rho$  the membrane surface density,  $g$  the gravity acceleration, and  $\vec{z}$  the vertical unit vector oriented from the sea bed to the sea surface.

The external energy functional  $e_e$  is composed of two summations. The first one comes from the three fluids (oil, water, air) actions on the boom (pressure and drag), while the second one comes from the gravity forces (body force). We consider no projected load, no temperature change, and no electric or magnetic body force on the boom. Note that the summation defining  $e_e$  is performed on the deformed boom geometry, after displacement. The material surface density  $\rho$  is the local summation of the material density through the membrane thickness. It is considered within the deformed configuration of the boom.

Note that a deformed boom section is generally composed of a totally immersed skirt, and an inflated float which is partially immersed and partially in contact with air. Consequently the pressure term taken into account in the model is composed of two parts. It will be described in the section 3.

We show the vertical cross-section of a boom on the figure 2. Note that the sea level differs up-stream and down-stream on both sides of the boom (head loss). It is a consequence of the hydrodynamic action of the sea current. The sea current velocity is denoted  $V$ . Figure 2 shows the skirt vertical angulation  $\theta$  of a boom cross-section. The vertical angle  $\theta$  will play an important role in the sequel. The angle  $\theta = 0$  indicates a vertical skirt, normal to the sea surface. The horizontal angle between the sea current  $V$  and the boom normal is denoted  $\alpha$ . It indicates with  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  a boom parallel with the sea current.

The following proposition gives the equation to be solved in the membrane displacement problem.

**Proposition 2.4.** *Neglecting tangential hydrodynamic external force  $\vec{d}$  and inertial effect of the boom, at a given time  $t$  (sea level and sea current given), the displacement  $u$  of the boom is solution of the following problem*

$$\text{Find } u \in V_a \quad \text{such that} \quad \frac{d e(u)}{du} \cdot v = 0 \quad \forall v \in V_a$$

*Proof.* We use the virtual work principle written in Lagrangian formulation with the hypothesis of a membrane structure having large displacements. We neglect the inertial effect of the boom (dynamic effect) and the friction of the sea water on the boom.  $\square$

Two remarks introduce now two important operational boom plan concepts.

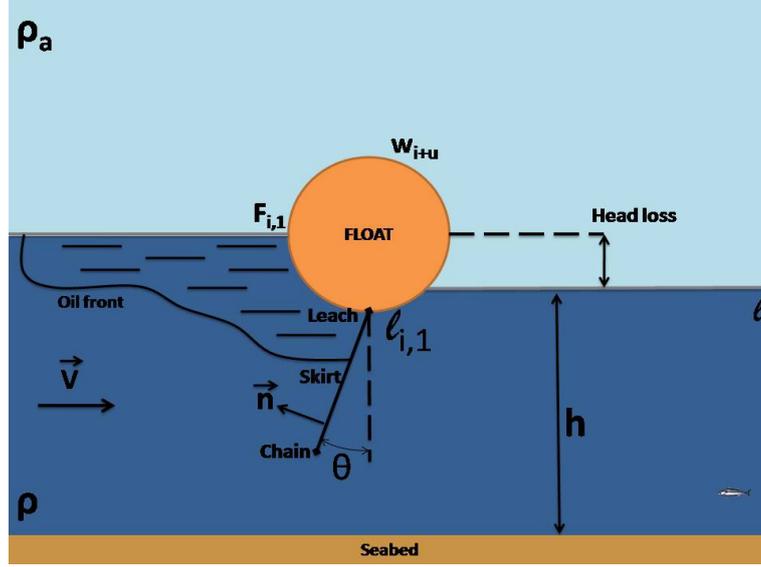


Figure 2: Boom vertical cross-section

**Remark 2.5.** The vertical coordinate of a mooring line is such that

$$z|_{\omega+u} \geq l - h$$

meaning that a mooring line must remain in the sea domain without intrusion in the sea bed. The sleeping part of a mooring line  $\omega_{i,4}$  is the subset of  $\omega_{i,4}$  defined by

$$S = \{m \in \omega_{i,4}, z|_{\omega+u} = l - h\}$$

The sleeping length  $S_l$  is the length of  $S$ . At any time  $t$ ,  $S_l$  must be sufficient so that the friction force between the mooring line and the sea bed guarantees that

$$\vec{u}|_{\omega_{i,4}^{RL,+}} = 0$$

The constraint  $z|_{\omega+u} \geq l - h$  concerns potentially any parts  $\omega_{i,j}$  of a boom. It is a consequence of an eventual tide. Any part of a boom can potentially ground at down tide (the sea surface level  $l$  changes during time).

**Remark 2.6.** The avoiding part, during time  $t$ , of the head  $\omega_{i,4}^{RL,-}$  of a mooring line is its locations set in the  $(x, y)$  dimensions (buoyancy coffer positions on the sea surface). This set is given by

$$A = \{m_t = \omega_{i,4}^{RL,-}, t \geq 0\}$$

for the buoyancy coffer  $i$ . The avoiding radius  $A_r$  is the size of  $A$ .

We show the sleeping length and the avoiding radius of a boom mooring line on the figure 3.

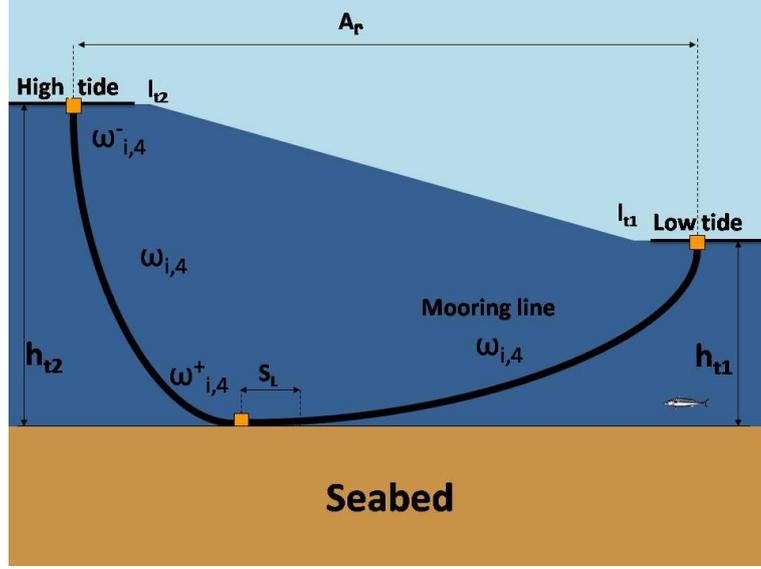


Figure 3: Sleeping length and avoiding radius of a mooring line

During time  $t$ ,  $A_r$  must be minimized. It guarantees short boom displacements. It permits to avoid an eventual local boom grounding on emerged rocks, or a limitation on the maritime circulation in the vicinity of the boom.

Note that during time  $\omega_{i,4}^{RL,-}$  has also a vertical displacement component. It is a consequence of the sea level change during tide.

### 3 Mechanical and Numerical Approximations

#### 3.1 Mechanical Approximations

We recall that  $\omega$  is the boom domain,  $u$  is the boom displacement,  $\omega + u$  is the boom domain after displacement, and  $l_{i,1}$  is the intersection line  $i$  between the float and the skirt.

The pressure force on a boom can be described by the following relation. It considers approximations made during experimental tests on a rigid boom in an hydrodynamic channel. The following relation results after simplifications and calculations.

$$\int_{\omega+u} p \vec{n} \, d(\omega + u) =$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2}\rho C_{\theta_0} (V_m f(\alpha))^2 \int_{\omega+u} \vec{n} \, d(\omega+u) \\
& + p_t \int_{\omega+u} \vec{n} \, d(\omega+u) \\
& + \sum_{i=1}^N \int_{l_{i,1}} P_1 \vec{z} \, d(l_{i,1})
\end{aligned}$$

The first hypothesis defines a drag hydrodynamic coefficient  $C$  on the skirt and the float by using a dimensional approach. This coefficient is defined experimentally on the basis of an a priori vertical skirt angulation  $\theta_0$  and a partially immersed float. More precisely, the order of the immersed height of the float is  $10^{-1}m$ , while the immersed height order of the skirt is  $1m$ .

The second hypothesis contains two approximations: the normal sea current along a boom section is assumed to take an averaged value  $V_m$ ; on the other hand, along a boom section the sea current angle  $\alpha$  with respect to the boom normal is taken into account by using a weighting function  $f(\alpha)$ .

Along a boom section, the function  $f(\alpha)$  will be asymmetric. The function  $f(\alpha)$  is defined by supposing that a boom section at the level of the sea surface  $f_{i,1}$  (boom floating line) is a parabolic curve  $P_\beta$ , where the depth  $\beta$  of the parabolic curve is proportional to  $V_m^2$  the square of the current velocity. The depth  $\beta$  is given a priori and depends on the boom deformation. By denoting  $\vec{n}_{P_\beta}$  the normal to the parabolic curve  $P_\beta$ , the function  $f(\alpha)$  is defined by

$$f(\alpha) = \cos\langle \vec{n}_{P_\beta}, V_m \rangle \quad (3.1)$$

The third hypothesis concerns the internal pneumatic pressure (float inflation)  $p_t$ . It is considered constant along a boom section and remains independent of the float deformation. The displacement of the boom introduces a bending of the float. We neglect with this hypothesis the float volume variation and consequently the float internal pressure change.

The hypothesis 4 concerns the immersed part of the boom. The hydrostatic curvilinear force  $P_1$  corresponds to the local vertical Archimedes force. Note that, this vertical force is applied on the intersection between the float and the skirt  $l_{i,1}$ . This reaction curvilinear force on  $l_{i,1}$  balances the boom body force. However, this Archimedes force  $P_1$  will be defined on the boom geometry before displacement. The value of  $P_1$  will remain independent of the deformed boom geometry. The force  $P_1$  is computed on the basis of the initial geometry of the float.

### 3.2 Numerical Approximations

The discrete boom displacement problem is given in the following lemma.

**Lemma 3.1.** *Considering the continuous membrane displacement  $u$  and virtual displacement  $v$*

$$\begin{aligned}
u &= u_h \in V_{a,h} \\
v &= v_h \in V_{a,h}
\end{aligned}$$

where  $V_{a,h}$  is the finite dimensional space of the bilinear functions defined on a finite-element mesh  $\omega_h$  of a boom (quadrilateral element), the membrane equilibrium problem written in a finite dimensional space takes the following form.

$$\frac{d e(u_h)}{du_h} \cdot v_h = \langle F_h, V_h \rangle \quad (3.2)$$

*Proof.* The derivative operation  $\frac{d}{du}e(u).v$  defines a linear continuous form with respect to  $v$ . The displacement  $v_h$  belongs to a finite dimensional space  $V_{a,h}$ . Consequently, it exists vectors  $F_h \in \mathbb{R}^n$  and  $V_h \in \mathbb{R}^n$  such that the result holds.  $F_h$  and  $V_h$  are the nodal mesh vectors representing the nodal out-of-balance forces and the nodal virtual displacements. The total number of nodal degree of freedom is  $n$ , three times the number of nodes.  $\square$

The discrete displacement space  $V_{a,h}$  is a set of functions with some part imposed to be 0 (fixed degrees of freedom). This null displacement part concerns subsets of  $\omega_{i,4}$ . As a consequence, the corresponding components of the vector  $V_h$  are null. Let us denote by  $V_{h,BC}$  these fixed components of  $V_h$ . We have by denoting  $V_{h,F}$  the free components of  $V_h$

$$\langle F_h, V_h \rangle = \left\langle \begin{Bmatrix} F_{h,F} \\ F_{h,BC} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} V_{h,F} \\ V_{h,BC} = 0 \end{Bmatrix} \right\rangle$$

where  $F_{h,BC}$  can be interpreted as the reaction forces on the fixed part of the boom.

The solution of the discrete displacement problem is presented in the following lemma.

**Lemma 3.2.** *The solution of the boom equilibrium equation*

$$F_{h,F} = 0 \tag{3.3}$$

by the Newton-Raphson method uses the Hessian matrix  $K_h$  associated to the functional  $e(u_h)$ . It is defined by

$$\frac{d^2}{du^2}(e(u_h).v_h, w_h) = \langle K_h.V_h, W_h \rangle \tag{3.4}$$

where  $V_h$  and  $W_h$  are the displacement vectors of the finite element displacement functions  $v_h$  and  $w_h$ .

*Proof.* The Newton-Raphson method applied to  $F_{h,F} = 0$  uses the tangent matrix  $[\frac{\partial}{\partial U_h} F_{h,F}]$ . Derivative of equation 3.2. along  $w_h$  gives

$$\frac{d^2}{du^2}(e(u_h).v_h, w_h) = \langle [\frac{\partial F_h}{\partial U_h}].V_h, W_h \rangle$$

where the tangent matrix  $[\frac{\partial F_h}{\partial U_h}]$  is denoted  $K_h$ .  $\square$

**Remark 3.3.** To improve the convergence of the Newton-Raphson method, we must use at each iteration an upper limitation on the norm of the nodal displacement correction. When the displacement correction has a large component with respect to the spatial dimension, a scaling is applied to the displacement correction. Using *SI* units we used generally a maximal correction of a nodal displacement component  $U_{lim} = 5cm$ . Depending of the avoiding radius  $A_r$  of the mooring line heads of a boom plan, the iteration number is at least  $A_r/U_{lim}$ .

## 4 Boom Optimization

### 4.1 Tactical Optimization

The tactical optimization of a boom plan is a complex problem. Consequently, in this section, we give the beginning of a formulation of an optimization problem. It takes the operational point of view used for boom contingency plans. The solution method of the proposed optimization problem is not treated here.

The strategic optimization of an emergency plan including oil boom is also not treated here. In that field, we can cite the strategic optimization of a global oil-spill emergency plan [16] (*Exxon – Valdez*), and the optimal policy measure in harbor [7].

First, we define the cost function associated to a boom plan. Two approaches, focussing on oil contingency efficiency are proposed. The first one is based on the normal sea current velocity  $\langle \vec{V}, \vec{n} \rangle$  in the vicinity of the boom. It is used in the FORBAR project. The second approach is based on the skirt vertical angulation  $\theta$ . It is used in the SIMBAR project.

**Definition 4.1.** The oil contingency local inefficiency at a boom position can be given by the indicator function  $f_{pol}$  based on the Lee's Criteria [10]

$$f_{pol} = 1_{|\langle \vec{V}, \vec{n} \rangle| \geq V_s} \quad (4.1)$$

where,  $V_s$  is a critical sea current velocity depending of the oil density, sea water density and oil surface tension. The indicator function  $f_{pol}$  can also be based on the Simbar's criteria [11]

$$f_{pol} = 1_{|\theta| \geq \theta_s} \quad (4.2)$$

where  $\theta_s$  is a critical value of the skirt angulation. It is defined by experimental observations, and numerical computations [21]. The arguments of  $\theta_s$  are the sea current velocity and the oil properties (density, viscosity).

From the operational point of view, the empirical values used in the emergency contingency plans (*in-situ* observations) are  $0.35m/s$  for  $V_s$  and  $10^{deg}$  for  $\theta_s$ .

The leakage criteria given by 4.1 using the velocity of the fluid suggests the construction of an oil leakage debt law. The construction of this debt law is not treated here. The leakage criteria given by 4.2 takes into account the deformed geometry of the boom. That suggests to construct a leakage model based on a fluid/structure approach.

Using the local cost function defined by 4.1 or by 4.2 we give the formulation of a boom plan tactical optimization problem. This problem concerns the geometry of the contingency plan, in an estuary or an harbor for examples. The problem of the boom design optimization, for example the boom geometry (boom skirt height) or the boom constitutive materials are not treated here. This strategic optimization problem is more complex to formulate because an optimal boom design must be a compromise between different kinds of coastal sites.

For a given boom design, and a given site to be protected, we define a tactical optimization problem in the following way.

$$Min \sum_{i=1}^N \int_{\omega_{i,1} + u_h} f_{pol} d(\omega + u_h) \quad (4.3)$$

$$||\sigma(u_h)|| \leq \sigma_{max} \quad (4.4)$$

$$||F_{h,BC}|| \leq F_{max} \quad (4.5)$$

where  $\sigma_{max}$  is the maximal stress supported by the boom plan materials (fabric, chain, mooring line), and  $F_{max}$  is the maximal force supported by the boom plan boundaries (friction of a dead-mass on the sea floor, tension on a fixed boundary).

From the operational point of view, the standard values used in coastal emergency contingency plans are listed. The dead masses weight  $6T$ . It permits to define  $F_{max}$  using the Archimedes force of a dead-mass, and its friction coefficient on the sea-bed. The fabric

stress limit is  $650daN/5cm$  and the chain stress limit is  $32T$ . It permits to define  $\sigma_{max}$  on each parts of the boom plan.

The enumeration of the decision variables of the tactical optimization problem is given bellow.

- angle between the sea current and the boom normal  $\alpha$
- number of boom sections of the plan  $N$
- length of the boom sections  $||\omega_{i,1}||$
- length of the mooring lines  $||\omega_{i,4}||$
- position of the dead-masses on the sea bed  $\omega_{i,4}^{RL,+}$

The enumeration of the parameters to be taken into account is given bellow. A parameter should be given, or its influence analyzed case-by-case.

- time  $t$
- boom design (boom kind)
- boom stress limit  $\sigma_{max}$ , boundary force limit  $F_{max}$
- sea current  $V$
- water depth  $h$
- morphology of the site (sea bed and coastal geophysical data)
- boom-coffer device design  $\omega_{i,3}$

In particular, the time  $t$  should be considered to handle the presence of tide. During the SIMBAR project, the Elorn estuary protection (Brittany, France), is computed at six different times, every two hours of a reference day. It permits to analyze a full tide cycle [13].

The operational supplementary constraints to be considered for a coastal boom plan are listed bellow.

- $\alpha$  such that  $\cos(\alpha) \leq \frac{0.35}{||V||}$
- $6Z \leq h$
- $3h \leq ||\omega_{i,4}||$
- $||\omega_{i,3}^{R,+} - \omega_{i,3}^{L,+}|| \leq \frac{||\omega_{i,1}||}{1.07}$

The first constraint permits to tackle the critical current velocity  $V_s$  normal to the boom. Note that  $||V|| \rightarrow +\infty$  gives  $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$ . In this case the boom and the current directions coincide. The boom is feathered within a flag behavior. The second constraint permits to limit the velocity variation of the fluid flowing under the boom in presence of small water depth. The third constraint permits to create the sleeping length  $S_l$  of a mooring line. The constraint 4 is a negative pre-stress of the cord of the boom section  $\omega_{i,1}$ . It permits to decrease the boom stress  $\sigma$  [14], which is balanced by a higher radius of curvature of  $l_{i,1} + u$ .

**Remark 4.2.** In the case of boom plan in harbor, the cost function 4.3 must be considered either tide up, or tide down of the installation period. It depends on the oil pollution location in the harbor. In any case of boom plan, the constraints 4.4 and 4.5 may be active during the maximal current velocity  $\|V\|$  of the installation period. It can be attained for either tide kind.

**Remark 4.3.** The velocity current amplitude  $\|V\|$  can be spatially non-uniform in the vicinity of the boom plan. Consequently, the decision variable  $\alpha$  can be non-uniform along the boom plan. The angle between the boom normal and the current is higher when the current amplitude is higher. In the case of a boom plan in a river, the current amplitude can be lower in the vicinity of the river shore. Consequently the boom plan is installed so that the oil is deviated from the high current with a high angle  $\alpha$ . The oil is also concentrated in the low current with a low angle  $\alpha$ , where the skimming system can be installed.

**Remark 4.4.** Other optimization problems can be set by using the operational point of view. Here is a non exhaustive enumeration of cost functions.

- boom installation time (useful for oil terminal located in river)
- number, volume and strategic location of equipment points [8]
- computational time of the boom numerical model
- time delay for boom stock renovation
- number of boom installation exercises per year
- coordination of counter pollution means (strategic oil spill response problem)[18]
- number of emergency plans up to date
- life cycle duration of a boom material, washing efficiency

#### **4.2** Comments

The optimization problem set here is a complex problem as a consequence of handling a coastal natural environment. The great number of variables leads to choice as method a flexible simplex method (flexible polyhedra), or a genetic algorithm for problem solution. Note that a general integer program [20] has been used to formulate a tactical decision problem for clean up operations.

Note that several data of the problem such as sea current, water depth and coastal morphology, can be approximative. It makes difficult the interpretation of the results. Note that sea current action modeling can use a stochastic approach [19].

Note equally that supplementary mooring lines  $\omega_{i,4}$  can be added to limit locally the avoiding radius  $A_r$  of a boom plan. Generally it is used in presence of tide and small water depth, for avoiding boom grounding on rocks by low tide.

The volume of the buoyancy coffers is not taken into account in our numerical model. Note that this volume is  $2m^3$  in coastal boom plan.

We end this section by underlining an influence having the decision variables of the proposed optimization problem. The tactical optimization problem concerns a boom plan having a variable number  $N$  of sections. This number must be increased when the variable  $\alpha$  increases. It represents the angle between the boom section normal and the sea current. The concept of a minimal coastal length to be protected is not taken into account here.

The figure 4 shows four graphs for a boom plan adapted to estuaries and rivers. On the figure 4, the  $N$  edges represent the boom sections. The graph nodes include  $DM$  mooring devices, and  $SZ$  sacrificed zones (oil recuperation zones).

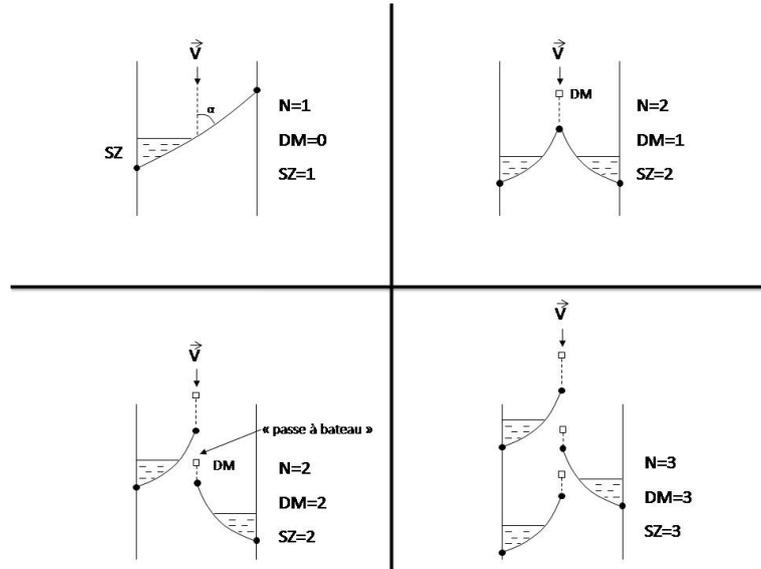


Figure 4: Graphs of boom plans in estuaries or rivers

The figure 4 shows two non-connected boom graphs. It generalizes the definition given in section 1 for connected boom graph. A non-connected boom graph permits to maintain a maritime traffic in estuary or river.

The figure 4 shows that the boom efficiency can be fitted by using the number of boom sections, the number of dead-masses, and the sacrifice of coastal zones.

## 5 Numerical Results

In this section we present a numerical comparison between two kinds of boundary conditions, applied to a  $30m$  long boom section. It shows a first step for the identification of a boom anchorage optimal design. After, we present the computation of a straight boom plan having  $N = 5$  sections of  $150m$  long each.

### 5.1 Boom Section 30 m Long

Two computations of a boom section of  $30m$  long are presented. The objective is to show the influence of the geometry of the boom-coffer fixation device  $\omega_{i,3}$  on the deformed boom geometry and stress. Two geometries of this fixation device are presented. The first geometry

is a rectangle. In this case, the boundaries away from the boom  $\omega_{i,3}^+$  are fixed on two rigid vertical masts. The second geometry is a triangle. In this case the boundary points away from the boom  $\omega_{i,3}^+$  are fixed to two points. The height with respect to the sea surface of these points is a parameter. In the case presented, this height corresponds to the middle of the boom float. The boom design considered in these two computations are, the skirt height  $0.75m$ , the float diameter  $0.55m$ , the sea current velocity  $0.3m/s$  (normal to the initial boom geometry), the inflated float pressure  $p_t$   $150mbar$ . The boom float is pinched at its ends to allow their free rotations along a vertical axis. The boom self weight is  $12kg/m$  corresponding solely to the chain mass. The mass  $1kg/m$  of the fabric (float and skirt parts) is here neglected. The hydrodynamic pressure of the sea current acts solely on the skirt. The Archimedes force  $P_1$  on the intersection line between the float and skirt is uniform along the boom section.

The figure 5 shows the two deformed mesh geometries, with the two kinds of boom-coffer fixation devices.

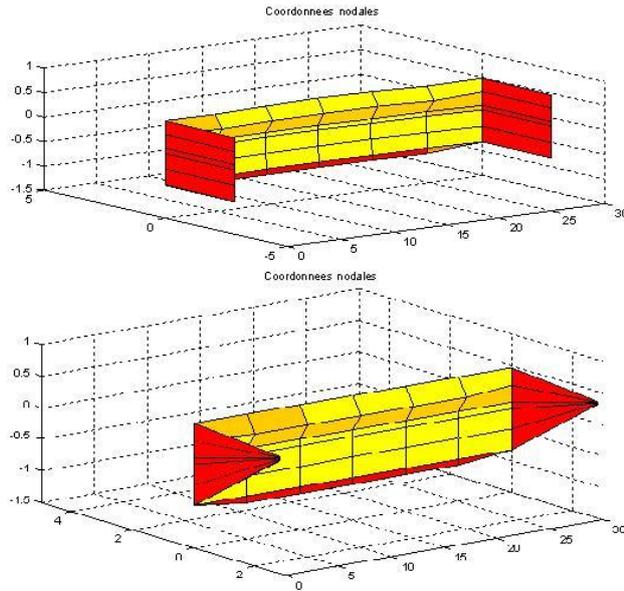


Figure 5: Rectangular and triangular fixation devices

The rectangular fixation on a mast gives for the membrane stress in the middle of the skirt bottom  $576N/m$ , the vertical skirt angle  $-5.35^{deg}$  and the chain stress  $3.13 \cdot 10^3N$ . The triangular fixation on a point gives for the skirt bottom stress  $584N/m$ , the skirt angle  $-3.71^{deg}$  and the chain stress  $2.88 \cdot 10^3N$ . The triangular fixation design minimizes the skirt angle, and the boom stress.

## 5.2 Straight Boom Plan 758 m Long

We present the computation of a straight boom plan normal to an  $0.3m/s$  uniform sea current. The water depth is  $10m$ . The boom plan contains  $N = 5$  boom sections. Each boom section has the design of the boom section of  $30m$  long presented previously. The boom plan is  $758m$  long. The weight of the mooring lines is taken into account. The hydrodynamic pressure on the mooring lines is neglected. The mooring lines displacements on the boom plan ends belong to the vertical plane  $(y, z)$  normal to the boom plan direction. The mooring line bottoms  $\omega_{i,4}^+$  are fixed on the sea bed. The mooring line tops  $\omega_{i,4}^-$  have a null vertical displacement along  $z$ , indicating that the buoyancy coffers stay at the level of the sea surface  $l$ . A chain is considered at the bottom of each mini-skirt of  $2m$  long  $\omega_{i,2}$ . Consequently, the chain stress can circulate continuously between adjacent boom sections  $\omega_{i,1}$  and  $\omega_{i+1,1}$ . The Archimedes force  $P_1$  on the intersection line between the float and skirt is uniform along the boom. The CPU time is  $258mn$ . The Newton-Raphson method needs 280 iterations to converge. The figure 6 shows the three views of the deformed finite-element mesh.

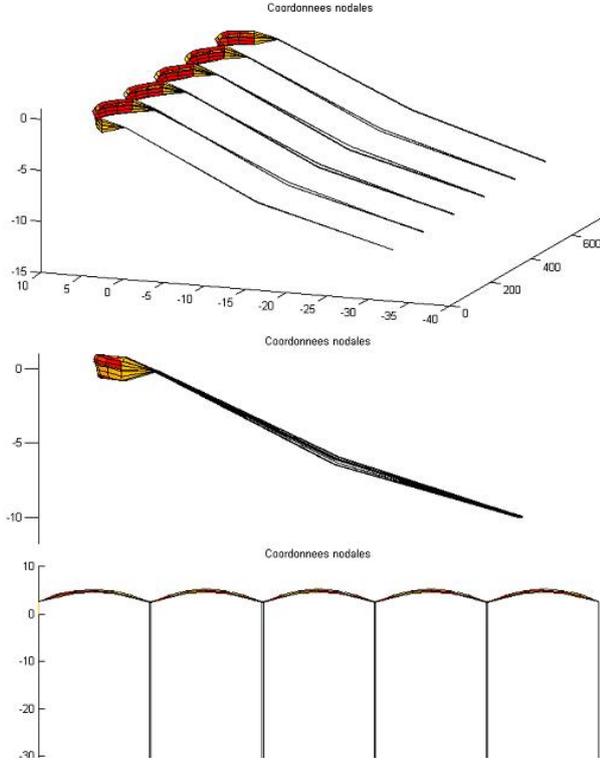


Figure 6: Straight boom plan with 5 sections

The vertical skirt angles  $\theta$  at the middle of each section are respectively using  $deg$  as unit  $-9.38 -9.83 -9.82 -9.85 -9.4$ . These angles are less than the empiric threshold value  $\theta_s$  [15]. Considering a light oil pollutant the cost function  $\int_{\omega+u_h} f_{pol}$  is null for this boom plan under these conditions. Considering a Heavy Fuel Oil pollutant (HFO) the cost function associated to this boom plan may be higher [21].

The stress  $\sigma$  in the chain at the middle of each section are respectively using  $10^5 N/m$  as unit 6.61 6.63 6.63 6.63 6.63. These stress values are less than the standard boom stress limit  $\sigma_{max}$ .

## Acknowledgement

The author acknowledge the French framework *PRECODD* dedicated to the Environmental Technologies and Sustainable Development. The network “Réseau de Recherche et d’Innovations Technologiques” *RITMER* on “Pollutions Marines Accidentelles et leurs Conséquences Ecologiques” is gratefully acknowledged.

## References

- [1] S.S. Badesha, J. Hunt, E. Wenck, Structural analysis of oil containment booms, in *Proc. International Oil Spill Conference IOSC 2005*, 1993, p 199.
- [2] Cedre, *La lettre du CEDRE*, No 24, may 1997, p 2.
- [3] M.H. Fallah and R.M. Stark, A probabilistic model for dispersive oil losses beneath oil booms, *Ocean Engineering* 3 (1976) 383–390.
- [4] F. Fang and A. J. Johnston, Oil containment by boom in waves and wind. I: numerical model, *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.* 127 (2001) 222–227.
- [5] J. Fang and K.-F. V. Wong, An advanced VOF algorithm for oil boom design, *Int. J. Model. Simul.* 26 (2006) 36–44.
- [6] E. Haug and G. H. Powell, Finite element analysis of non linear membrane structures, in *Conference Proceedings IASS Pacific Symposium Part II on tension Structures and Space Frames*, Tokyo and Kyoto, paper No 2-3, Architectural Institute of Japan, 1972.
- [7] H.W. Gottinger, Monitoring pollution accidents, *Eur. J. Oper. Res.* 104 (1998) 18–30.
- [8] E. Iakovou, C. Ip, C. Douligeris and A. Korde, Optimal location and capacity of emergency cleanup equipment for oil spill response, *Eur. J. Oper. Res.* 96 (1997) 72–80.
- [9] M.H. Kim, S.T. Kee, Flexible-membrane wave barrier, I: Analytic and numerical solutions, *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.* 122 (1996) 46–53.
- [10] C M. Lee and K.H. Kang, Prediction of oil boom performance in currents and waves, *Spill Science and Technology Bulletin* 4 (1997) 257–266.
- [11] F. Muttin, F. Guyot, S. Nouchi and B. Variot, Un modèle simplifié pour le couplage structure/fluide-pollution adapté à un barrage flottant anti-hydrocarbure, in *Conference Proceedings 9<sup>èmes</sup> Journées Hydrodynamiques*, Poitiers-Futuroscope, 2003, pp. 267–280.
- [12] F. Muttin and S. Nouchi, Numerical study of oil spill containment boom by the finite-element method, in *Conference Proceedings Wessex Institute of Technology of Eighth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Water Pollution*, Bologna, 2006, pp. 245–254.
- [13] F. Muttin and S. Nouchi, Analyse structurale d’un barrage flottant anti-hydrocarbure par éléments-finis, in *Conference Proceedings Association Technique Maritime et Aéronautique ATMA*, ENSTA Paris, 2007, (under press).

- [14] F. Muttin, Oil spill boom modelling by the finite-element method, *Conference Proceedings Wessex Institute of Technology of Ninth International Conference on Water Pollution: Modelling, Monitoring and Management*, doi:10.2495/WP080371, Alicante, 2008, pp. 383–392.
- [15] F. Muttin, Structural analysis of oil-spill containment booms in coastal and estuary waters, *Applied Ocean Research*, doi:10.1016/j.apor.2008.07.001, (under press).
- [16] P.C. Olsen, Some crude mathematics: modelling the work required to clean up after the Exxon-Valdez, Visiting lecture, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [17] N.D. Pietro and R.G. Cox, The containment of an oil slick by a boom placed across a uniform stream, *J. Fluid Mech.* 96 (1980) 613–640.
- [18] H.N. Psaraftis, G.G. Tharakan and A. Ceder, Optimal response to oil spills: the strategic decision case, *Oper. Res.* 34 (1986) 203–217.
- [19] P. Sebastiao and C.G. Soares, Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in open sea, *Ocean Engineering* 34 (2007) 576–584.
- [20] A.V. Srinivasa and W.E. Wilhelm, A procedure for optimizing tactical response in oil spill clean up operations, *Eur. J. Oper. Res.* 102 (1997) 554–574.
- [21] D. Violeau, C. Buvat, K. Abed-Meraim and E. de Nanteuil, Numerical modelling of boom and oil spill with SPH, *Coastal Engineering* 54 (2007) 895–913.
- [22] K.-F.V. Wong and E. Barin, Oil spill containment by a flexible boom system, *Spill Science and Technology Bulletin* 8 (2003) 509–520.
- [23] S.-P. Zhu and D. Strunin, Modelling the confinement of spilled oil with floating boom, *Applied Mathematical Modelling* 25 (2001) 713–729.

---

*Manuscript received*  
*revised*  
*accepted for publication*

F. MUTTIN  
Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels, 26  
rue de Vaux-de-Foletier - F-17041 La Rochelle cedex 1, France,  
E-mail address: [muttin@eigsi.fr](mailto:muttin@eigsi.fr)





## Résumé

Nos travaux sont motivés par la difficulté de connaître les contraintes internes d'une surface tendue de grande taille. Le thème principal est issu de la théorie non-linéaire des membranes élastiques en grands déplacements, plissées, ou trouées, en statique ou en dynamique. Notre contribution considère l'interaction de la membrane avec un autre milieu, ou plusieurs, l'écoulement d'un fluide : incompressible ou compressible, monophasique ou diphasique, avec ou sans surface libre, ou interface, celles-ci pouvant être régulières, ou non-régulières. Comme la membrane peut être un domaine singulier, possédant un trou, un modèle non-linéaire a permis d'étudier les concentrations de contraintes. Le modèle numérique de membrane utilise la méthode des éléments-finis. Un écoulement newtonien est considéré en 2D à partir du modèle viscoplastique de Norton-Hoff. Le fluide est soumis à une tension de surface, constante, sur sa surface libre. Notre formulation lagrangienne réactualisée utilise un remaillage du domaine discrétisé par éléments-finis. L'élasticité 3D est abordée numériquement par une méthode multi-grille (2-grilles), à éléments-finis quadratiques. Ces travaux sont appliqués à la mise en forme des matériaux, fonderie ou forgeage. Notre modèle de membrane plissée généralise le modèle plan en coordonnées cartésiennes de Rodemann, au cas des surfaces courbes en coordonnées curvilignes. L'élément-fini bilinéaire à quatre nœuds peut traiter le cas d'une membrane plissée (voile de navire). Un écoulement compressible interne peut interagir avec une membrane élastique et l'impact de solides rigides (airbag). Nous avons réalisé des essais expérimentaux en grandeur réelle, d'un airbag extérieur pour tramway. Ils ont permis de recalibrer le coefficient d'ajutage. Un écoulement diphasique d'eau et d'hydrocarbure possède une interface non-régulière entre les fluides, et une surface libre. Cet écoulement peut interagir avec une membrane ayant une jupe et des flotteurs rigides, ou gonflés (barrage flottant antipollution). Cette interaction traite d'hydroélasticité. Nous avons réalisé des essais expérimentaux de barrages flottants en zones côtière, portuaire, et estuarienne de l'Atlantique. Ils permettent de valider les résultats numériques sur l'angle de la jupe et la tension d'amarrage. Un réservoir souple (waterballoon) flottant et amarré est soumis à l'action de la mer et du fluide qu'il contient. L'interaction porte ici entre deux surfaces, l'une déformable, l'autre libre, le fluide porteur, le fluide stocké et l'amarrage. Enfin, nous avons traité d'un milieu curviligne en dynamique (ombilical) liant un navire à un drone de petite taille. Ce sujet d'aéroélasticité considère l'enveloppe de 150 m au dessus de la mer.

**Keywords :** Théorie des Membranes 74K15, Couplage Structure-Fluide 74F10, Eléments-Finis 74S05 76M10, Pollutions Marines, Flow control and optimization 76B75, Hydrology, hydrography, oceanography 86A05.

