

9<sup>èmes</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

**UN MODELE SIMPLIFIE POUR LE COUPLAGE  
STRUCTURE/FLUIDE-POLLUTION ADAPTE A UN BARRAGE  
FLOTTANT ANTI-HYDROCARBURE**

***NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF OIL SPILL  
CONTAINEMENT BOOM***

**F. MUTTIN<sup>\*</sup>, F. GUYOT<sup>\*</sup>, B. VARIOT<sup>\*</sup>, S. NOUCHI<sup>\*</sup>.**

<sup>\*</sup> Pôle de recherche en Conception Eco-Conception,

Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels, 26 rue de Vaux de Foletier, 17021 LA ROCHELLE  
Cedex1

**Résumé**

La catastrophe écologique liée à la marée noire de l'Erika a montré les limites des barrages flottants anti-hydrocarbure pour protéger les côtes du littoral. Il est admis que les barrages sont inefficaces lorsque la vitesse du courant marin dépasse 1 nœud. Nous présentons une démarche technique qui doit aboutir à l'optimisation de certains paramètres de conception et de pose des barrages de type flottant. Cette démarche intègre de manière progressive l'expérimentation faite en bassin des carènes, à une modélisation mécanique du comportement du barrage.

**Summary**

The ecological catastrophe linked to the oil slick of the Erika has shown them limit of floating barrage against hydrocarbure to protect the coast. It is admitted that barrages are ineffective when the speed of the current velocity exceeds 1 node. We present a technical methodology that has to end to the optimization of some parameters of design as well as of pose of type barrages floating. This methodology integrates with a progressive manner, the suitable experimentation in basin of careen into a mechanic simulation of the behavior of the barrage.

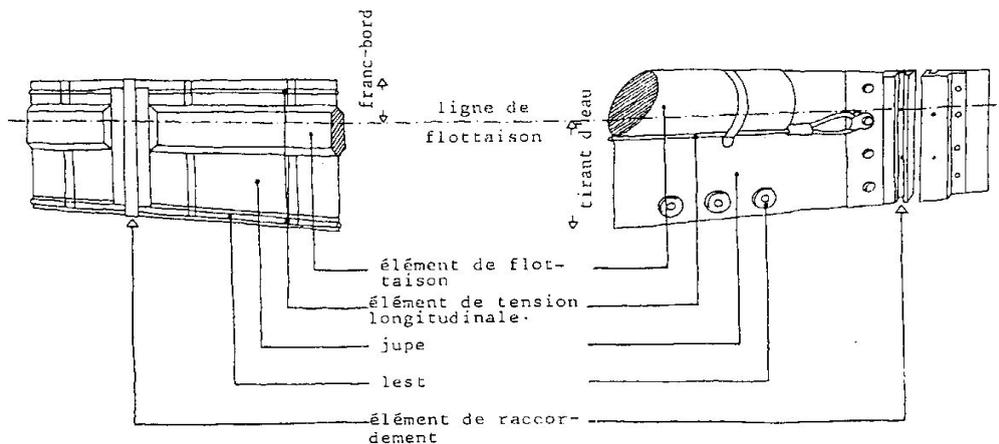
## **L'INTRODUCTION**

### **1) Contexte de l'étude**

Pour améliorer le fonctionnement des barrages un groupe de recherche est né dans le cadre d'un RRIT : le réseau Ritmer [\[RIT 02\]](#). Ce groupe comprend EDF, L'Université de La Rochelle, Le CEDRE, Le CETMEF (Ministère de l'Équipement) et l'EIGSI. Le but du projet est de modéliser le fonctionnement d'un barrage. Cela constitue une première pour la recherche scientifique. Les principaux travaux et résultats obtenus par l'Eigsi sont présentés dans cette communication.

### **2) Définition d'un barrage**

La figure 1 présente deux types de barrage flottant. La flottabilité est obtenue par un élément gonflable (boudin), ou bien par un pain de mousse synthétique.



**Figure 1. Deux types de barrages flottants**

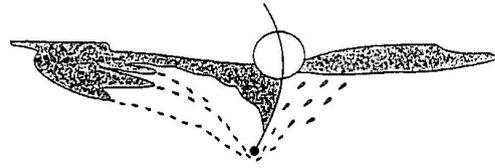
Pour donner un ordre d'idée, les caractéristiques d'un barrage standard pour la lutte antipollution en mer sont : un tirant d'air de 0.58 m, un tirant d'eau de 0.87 m, un poids linéaire au mètre de 11.5 Kg, dont 5.8 Kg de chaîne/lest. Ce type de barrage est composé d'une chambre de flottaison (gonflable), de flotteurs additionnels (coffres), d'une chaîne de traction et de lest, d'une sangle de crête, et d'une barrette flexible de jonction. Il existe des barrages autogonflants. Les matériaux des jupes et des boudins sont du tissu Hypalon, du néoprène, du Polyester, du Polyuréthane ou du PVC. Un barrage flottant est composé de tronçons, qui sont reliés entre eux par un dispositif de raccordement souple ou rigide. Le prix d'un barrage est de 1 à 2 MF au kilomètre. La résistance d'un barrage à la traction est au minimum de 200 kN.

### **3) Les modes de fuite**

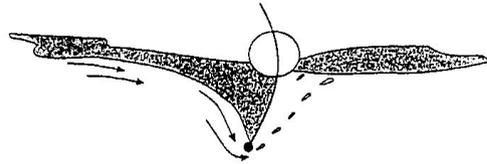
Tout barrage a des limites d'utilisation, liées aux efforts exercés par le courant marin, les vagues et le vent. Il est admis, et vérifié dans la pratique, que la vitesse du courant marin est la principale limite au bon fonctionnement des barrages (limite voisine de 1 nœud). Il vient ensuite les effets dus aux vagues, et enfin les effets aérodynamiques [\[CED 95\]](#).

Lorsque les efforts du courant sont importants, les fuites du barrage peuvent prendre plusieurs formes. Celles-ci sont schématisées sur les graphiques de la [figure 2](#). Citons principalement :

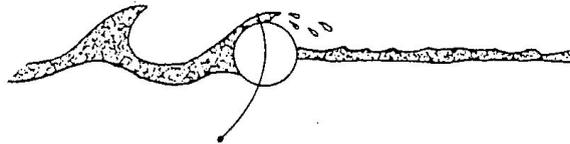
- l'entraînement des particules de pétrole par le courant sous le barrage
- le sous tirage de l'hydrocarbure par le courant lorsque le barrage est saturé de polluant
- les éclaboussures de particules de pétrole, créées par les vagues, et entraînées par le vent
- la submersion de particules de pétrole en amont du barrage, ou la submersion du barrage lui-même (chalutage)
- le couchage du barrage et de sa jupe par les efforts longitudinaux



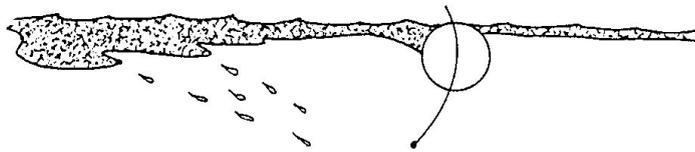
(a) fuite par entraînement



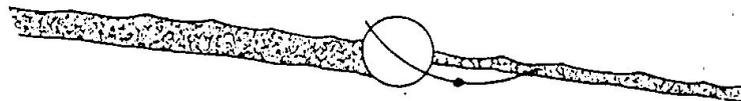
(b) fuite par sous - tirage



(c) fuite par éclaboussure



(d) fuite par submersion



(e) fuite par couchage

**Figure 2. Les cinq types de fuite d'un barrage flottant (a) entraînement (b) sous - tirage (c) éclaboussure (d) submersion (e) couchage**

#### **4) Besoin d'une modélisation**

L'amélioration de cette technique de lutte contre la pollution passe par une connaissance approfondie de son fonctionnement. L'approche empirique seule, a jusqu'à présent beaucoup été utilisée. Les seules études en bassin hydrodynamique ont été faite par le LNH (EDF) [\[DAR 80\]](#) [\[DON 80\]](#) [\[LEY 87\]](#).

La démarche de modélisation que nous proposons ici utilise les trois moyens suivants :

- ) les essais en bassin, qui permettent de quantifier les efforts et les performances d'une tranche verticale de barrage (§2)
- ) la modélisation fluide/structure basée sur la mécanique d'une chaînette, qui permet de calculer la forme et la tension d'un barrage, et en post-traitement l'efficacité totale du barrage (§3)
- ) l'optimisation des paramètres de conception du barrage, pour minimiser la fuite de la pollution, tout en respectant l'équilibre mécanique issu de la modélisation (§4).

#### LES SAIS EN BASSIN DES CARENES [GUY 95] [GUI 95]

Des essais expérimentaux sur un barrage flottant à échelle réduite vont être réalisés. Puisqu'il existe différents barrages anti-pollution (de part la forme, les dimensions, les formes de jupes etc.), le LHNE fournira les caractéristiques de la maquette à réaliser. Celle-ci aura été utilisée au préalable comme entrée de modèle numérique lors d'un calcul 2DVertical.

Une balance hydrodynamique à 3 composantes va être conçue. Elle permettra de mesurer les efforts de traînée et de portance ainsi que le moment de tangage. Afin d'éviter les fuites d'hydrocarbure aux extrémités de la maquette, il est envisagé que la maquette fasse toute la largeur du canal ; les frottements alors engendrés sur les parois seront à retrancher des efforts réels subis par le flotteur. La fabrication de cette balance devrait être réalisée au sein de l'IUT de Génie Civil de La Rochelle, ainsi que l'étalonnage. Le collage des jauges ainsi que le câblage n'ont pas encore été abordés.

Un montage expérimental est en cours d'étude. La difficulté majeure est due à la présence du polluant dans l'eau. Actuellement, il est prévu de cloisonner ce dernier afin qu'il ne se disperse dans le canal et ne vienne surtout s'étaler sur les bords du canal. La recherche de produits évitant au pétrole de s'accrocher sur les parois est actuellement en cours. Une attention particulière sera portée sur la conception de ces cloisons située en aval de la maquette afin d'éviter qu'elles ne provoquent les effets de bords ou qu'elles n'engendrent une vague d'étrave qui viendrait modifier les efforts subis par la maquette. Différents systèmes sont actuellement testés afin de pouvoir récupérer les particules de pétrole en suspension dans l'eau et de les remettre en amont de la maquette après un essai.

L'éventualité que le produit utilisé ne soit pas du pétrole brut sera étudiée par le CEDRE qui déterminera le substitut à utiliser lors des essais et ses lois de comportement. Ces caractéristiques seront utilisées dans les calculs de similitudes.

L'un des résultats le plus important est de savoir s'il y a fuite ou non du barrage, c'est-à-dire si le pétrole s'échappe et passe derrière la maquette (réponse qualitative). Cela permettra de déterminer une «fonction de polluant»  $f_{pol}$  binaire, dont la valeur sera de 1 si la présence de pétrole est décelée en aval de la maquette et de 0 sinon.

$$\begin{aligned}
 \text{Fonction de polluant : } & f_{pol} \text{ telle que } f_{pol} \in [0,1] \\
 & f_{pol} = 1 \text{ <-> pollution} \\
 & f_{pol} = 0 \text{ <-> protection (non pollution)} \qquad (1)
 \end{aligned}$$

Un procédé de visualisation latérale de la nappe d'hydrocarbure et de l'écoulement est à concevoir. Cette visualisation latérale permet d'évaluer la fonction  $f_{pol}$  du point de vue qualitatif. Cette fonction nous donnera ainsi les limites d'efficacité du barrage. Une mesure de l'épaisseur de la couche d'hydrocarbure engendrant la fuite pourrait aussi être entreprise.

Mis à part les dimensions de la maquette du barrage flottant et de sa jupe, les  $C_x$  et  $C_z$  du barrage, et la fonction de retenue du polluant  $f_{pol}$  seront donc mesurés en fonction du tirant d'eau de la maquette  $Z$ , de la vitesse d'avance  $V$ , et de l'incidence de la maquette  $\alpha$  par rapport à la vitesse (figure 3). Les valeurs de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  pour  $\alpha$  sont envisagées.

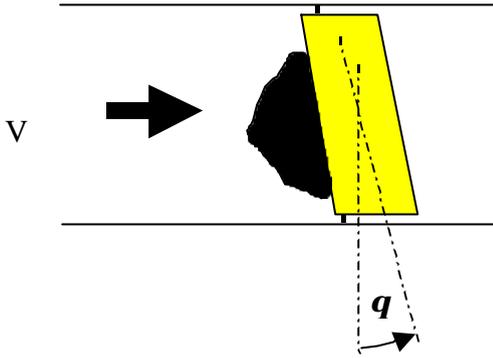


Figure 3. Maquette vue de dessus

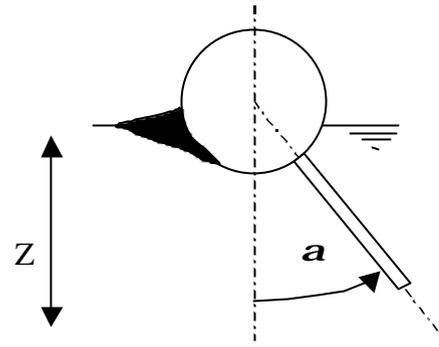


Figure 4. Tranche verticale d'un barrage

Le rôle de l'inclinaison verticale  $a$  du flotteur sera ensuite étudié, mettant en évidence des fuites par couchage (figure 4). L'inclinaison de la jupe ou non pourrait éventuellement être prise en considération.

Un classement des différents paramètres expérimentaux sera élaboré au préalable.

Les résultats des essais pourraient en outre nous permettre d'identifier les différents modes de défaillance :

- par entraînement (relatif à la vitesse d'avance et à l'épaisseur du pétrole dans la vague),
- par sous tirage (relatif à l'épaisseur de pétrole s'agglutinant le long de la jupe),
- par submersion (relatif à une forte vitesse d'avance),
- ou par couchage (relatif à un courant et un vent violents de directions opposés).

Le mode de défaillance par éclaboussures ne sera pas abordé dès maintenant puisqu'il est relatif à la hauteur des vagues et à la vitesse du vent.

Des essais sur des maquettes sur une tranche de raccord entre éléments jonction de barrage seront ensuite effectués pour quantifier les effets de la forme du barrage sur les fuites locales possibles. Un recalage des calculs 2D Verticaux sera là aussi entrepris.

Le filtrage de l'eau du bassin, l'étanchéité du bassin, l'utilisation d'eau douce ou d'eau de mer, entraîne une gestion des difficultés des essais qui reste à appréhender. Il existe des produits qui ajoutés à l'hydrocarbure le rendent moins miscible dans l'eau. Ils conduisent aussi à une surface d'interface eau / polluant plus lisse.

Les expérimentations seront effectuées dans le canal hydrodynamique de l'IUT de Génie Civil de La Rochelle. Il s'agit d'un bassin de traction d'une longueur de 20 mètres sur une largeur de 120 cm et d'une profondeur d'environ 70 cm. Ce canal a déjà été utilisé par F. Guyot dans [GUY 95]. L'ensemble du montage maquette+balance+cloisons de rétention sera monté sur le chariot mobile et tracté. La vitesse de déplacement du chariot est mesurée à l'aide d'un chronomètre actionné à son passage par deux cellules photoélectriques.

La maquette et son dynamomètre, le montage expérimental et la chaîne d'acquisition pourraient être utilisés également en tunnel hydrodynamique.

La loi de puissance des efforts en fonction de la vitesse  $V$  est un résultat expérimental qui sera comparé aux résultats numériques. Les résultats obtenus permettront alors de recalibrer les calculs 2D Verticaux réalisés.

### III-PREMIER MODELE MECANIQUE

Le calcul des efforts s'exerçants sur le barrage, et la forme de celui-ci peuvent s'obtenir avec une modélisation simple du barrage en tant que chaînette. Dans un premier temps nous avons retenu une chaînette mobile dans le plan de la surface libre de l'eau. Le bilan des efforts portera sur les seules traction longitudinale et traînée hydrodynamique dans le plan de la surface libre. Les efforts verticaux de portance hydrodynamique et de poussée d'Archimède sont absents de ce modèle. D'autre part, les tranches verticales du barrage sont supposées rester en position verticale ( $\mathbf{a} = 0$ ). La principale différence entre ce modèle de barrage et la mécanique d'une chaînette pesante réside dans le fait qu'une force de pression est une force du type suiveuse, qui s'exerce suivant la normale à la chaînette. Dans le cas de la chaînette pesante la force est verticale et suit une direction constante quelque soit la géométrie de la chaînette.

On note  $V$  le vecteur vitesse du courant marin,  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  (eau de mer, la différence de densité entre l'eau et l'hydrocarbure est négligée), et  $S$  la surface d'un élément de barrage sur laquelle agit le courant.

Afin de déterminer l'allure du barrage et les efforts de tension s'exerçant en chaque point de celui-ci, nous avons choisi de procéder par une méthode d'éléments finis rigides. Soit  $f$ , une densité linéique de force, nous avons alors comme force globale  $F$  appliquée:

$$F = \int_e f dx$$

où  $f$  est une force de pression, s'exerçant perpendiculairement à la surface du barrage,

$$f dx = \|f\| dx n$$

et où  $n$  est la normale à la surface (figure 3).

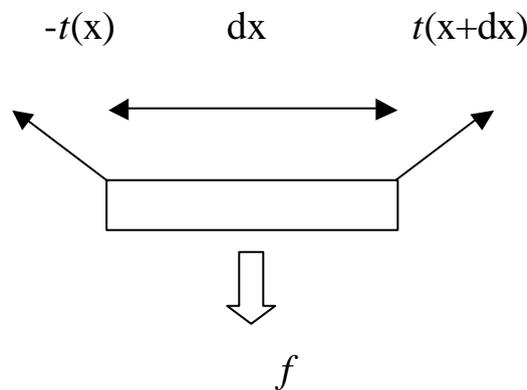


Figure 3. Equilibre d'une tranche de barrage

On note  $t$  la tension subie par l'élément fini considéré (exercée par les éléments finis voisins). Le bilan des forces sur un élément de longueur  $dx$  du barrage est [GER 86] :

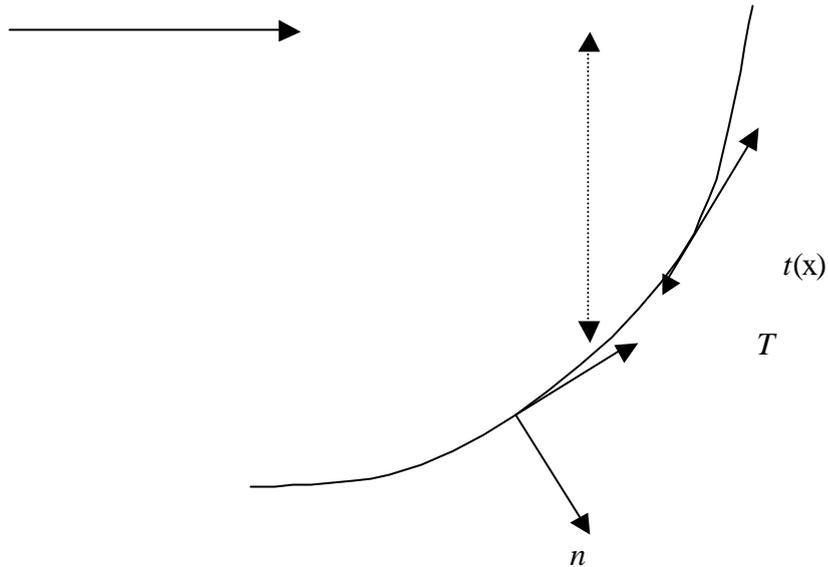
$$t(x+dx) - t(x) = f dx \quad (2)$$

On note  $y(x)$  la fonction décrivant la courbe géométrique formée par le barrage vu de dessus. Soit  $T$  un vecteur tangent au barrage de coordonnées  $[dx ; dy]$ . Ainsi le vecteur  $n$  normal à la surface, aura pour coordonnées:  $[dy ; -dx]$  (figure 4).

x

y(x)

t(x+dx)



**Figure 4. Géométrie locale d'un élément de barrage**

Rendons le vecteur  $n$  normé:

$$n / \|n\| = [dy / (dx^2 + dy^2)^{0,5}; -dx / (dx^2 + dy^2)^{0,5}]$$

or:

$$dy/dx = y'$$

nous avons donc :

$$n / \|n\| = [y' / (1 + y'^2)^{0,5}; -1 / (1 + y'^2)^{0,5}] .$$

Nous appellerons ce nouveau vecteur  $N$ .

Le vecteur vitesse du courant marin est vertical  $V:(0;V_y)$ . Soit  $V_u$  un vecteur unitaire tel que:

$$V = \|V\| V_u .$$

Selon les hypothèses de Landweber (voir [LAN 47] [JAC 91]) la force  $f$  du courant dépend du cosinus de l'angle existant entre la direction du courant et la normale à la surface du courant, ainsi, la force sera maximale pour un angle nul. La surface d'un élément de barrage est  $S = Z dx$  où  $Z$  est la hauteur de la partie immergée du barrage. D'où :

$$\begin{aligned} f dx &= \|f\| dx N \\ &= 0.5 \rho C_x Z dx V_y^2 (V_u \cdot N) N . \end{aligned}$$

Comme :

$$(V_u \cdot N) = -1 / (1 + y'^2)^{0,5}$$

on a :

$$(V_u \cdot N) \cdot N = [-y' / (1 + y'^2); 1 / (1 + y'^2)] .$$

Les composantes de  $f$  suivant  $x$  et  $y$  sont donc:

$$f_x = -K y' / (1+y'^2)$$

$$f_y = K / (1+y'^2)$$

avec :  $K = 0.5 \rho C_x Z V y^2$ .

D'après le bilan des forces vu à l'équation (2), nous avons:

$$t(x+dx) - t(x) = f dx = (K / (1+y'^2)) [-y'; 1] dx .$$

Les composantes de  $t$  suivant  $x$  et  $y$  en  $(x+dx)$  sont donc:

$$t_x(x+dx) = t_x(x) - K (y'(x) / (1+y'^2)) dx$$

$$t_y(x+dx) = t_y(x) + (K / (1+y'^2)) dx .$$

Nous avons donc maintenant toutes les équations pour déterminer à la fois l'allure du barrage et les efforts s'exerçant sur celui-ci :

$$t_x(x+dx) = t_x(x) - K (y'(x) / (1+y'^2)) dx$$

$$t_y(x+dx) = t_y(x) + (K / (1+y'^2)) dx$$

$$y(x+dx) = y(x) + (t_y(x) / t_x(x)) dx$$

$$y'(x) = (y(x+dx) - y(x)) / dx .$$
(3)

Pour résoudre un système d'équations différentielles du premier ordre, il faut fixer une condition initiale. Nous choisissons de fixer la position  $y(A)$ , et la tension (direction et intensité)  $t(A)$  du barrage, à gauche de celui-ci (point A d'abscisse  $x = 0$ ).

$$y(A) = 0 \text{ (position du bateau remorqueur gauche).}$$

$$t(A) = t_A \text{ (N)} \tag{4}$$

$$Q(A) = Q_A .$$

Une des données du problème est que l'effort maximal que peut supporter un barrage standard est de 20 tonnes ( $\|t\| < 20T$ ).

La longueur  $L$  du barrage proprement dit, est obtenue a posteriori, par la recherche de la position du point d'ancrage (point B) de droite du barrage, point caractérisé par  $y(B)=0$ . La longueur du barrage  $L(t_A, Q_A)$  et la position  $B(t_A, Q_A)$  de son extrémité droite dépendent des données initiales. Il en est de même de la distance  $\|AB\|$  entre les deux extrémités du barrage.

Les équations (3) avec les conditions initiales (4), sont résolues avec un programme implanté dans le logiciel Matlab. Le tableau 1 ci-dessous donne la solution du problème mécanique pour  $\|V\| = 1.5 \text{ nœud}$ , et pour des angulations  $Q_A$  de  $30^\circ$  et  $45^\circ$  du barrage, sur sa gauche par rapport à l'axe vertical. Pour  $Q_A = 30^\circ$ , nous prenons  $t_A = 170 \text{ kN}$ , et pour  $Q_A = 45^\circ$ ,  $t_A = 175 \text{ kN}$ . Pour une angulation de  $30^\circ$ , la longueur du barrage est de 1127.5 m. Cette longueur est plus courte : 663.3 m, pour une angulation de  $45^\circ$ . Le  $C_x$  utilisé est constant et vaut 1.8.

V=1.5 nœud , angulation $Q_A=30^\circ$ , $C_x=1.8$											
x	dx	y(x)	y(x+dx)	y'	L (m)	$f_x$	$f_y$	f	$T_x$ (N)	$t_y$ (N)	T totale
O	100	0,0	173,2	1,732	0,0	-22208,3	12821,9	25643,9	<b>-85000,</b>	<b>-147224</b>	<b>170000</b>
100	100	173,2	298,6	1,254	160,4	-25002,3	19943,5	31982,1	-107208,	-134402	
200	100	298,6	385,1	0,866	292,6	-25379,6	29315,8	38775,6	-132210,	-114458	
300	100	385,1	439,2	0,540	406,3	-21448,8	39699,4	45123,1	-157590,	-85143	

400	100	439.2	464.6	0.254	509.5	-12230.0	48183.6	49711.5	-179039.	-45443	
500	100	464.6	463.1	-0.014	609.5	734.5	51277.3	51282.5	<b>-191269.</b>	2739	
600	100	463.1	434.8	-0.284	713.4	13458.5	47472.2	49343.1	-190534.	54017	
700	100	434.8	377.5	-0.573	828.7	22126.7	38606.1	44497.4	-177075.	101489	
800	100	377.5	287.0	-0.904	963.5	25514.2	28219.4	38043.5	-154949.	140095	
900	100	287.0	157.0	-1.300	<b>1127,5</b>	24784.1	190591	31264.9	-129435.	168314	
V=1.5 nœud, angulation $\Theta_A=45^\circ$ , $C_x=1.8$											
x	dx	y(x)	y(x+dx)	y'	L (m)	fx	fy	f	Tx (N)	ty (N)	T totale
O	100	0,0	100,0	1,000	0,0	-25643,9	25643,9	36265,9	<b>-123743,</b>	<b>-123743</b>	<b>175000</b>
100	100	100.0	165.7	0.657	119.6	-23532.0	35834.8	42870.6	-149387.	-98099	
200	100	165.7	201.7	0.360	225.9	-16348.1	45401.2	48254.8	-172919.	-62265	
300	100	385.1	394.1	0.089	326.3	-4533.8	50883.8	51085.4	-189267.	-16683	
400	100	439.2	421.6	-0.176	427.8	8733.9	49754.6	50515.4	<b>-193801.</b>	34020	
500	100	464.6	419.3	-0.453	537.6	19268.2	42565.6	46723.6	-185067.	83774	
600	100	463.1	386.9	-0.762	<b>663,3</b>	24725.0	32447.2	40793.9	-165799.	126340	

**Tableau 1. Résultat du modèle mécanique pour les angulations de 30° et de 45°, V=1.5 nœud,  $C_x=1.8$ .**

Connaissant la solution de la forme et de la tension du barrage, la fonction  $f_{pol} = \sum e f_{pol}^e$  est évaluée en post-traitement sachant que  $a=0$ , que V est donné, et que l'angle  $Q(x)$  est issu du calcul.

Les évolutions prévues du modèle sont la prise en compte du bilan vertical de force (poussée d'Archimède et de portance liée au  $C_z$ ). Une évolution dite «1.5D» consistera à ajouter des solides articulés sur la chaînette. Cela permettra d'avoir comme variable supplémentaire l'angle d'inclinaison  $a(x)$  des tranches verticales du barrage. Enfin un modèle mécanique dit « 2.5D » tiendra compte les lignes d'ancrage et d'amarrage par câbles du barrage au fond de la mer.

#### **IV-MISE EN ŒUVRE DE L'OPTIMISATION**

##### **1) Problème d'optimisation**

L'optimisation d'un barrage est indépendante des évolutions du modèle mécanique. Cela consiste à minimiser une fonction économique liée à la pollution. Il faut tenir compte de la contrainte liée à la résistance mécanique du barrage.

Cette fonction d'efficacité contre la pollution tient regroupe plusieurs aspects. D'une part, il faut minimiser le coût du barrage en lui-même: sa partie textile (boudins et jupe) et sa partie métallique (chaîne). D'autre part, il faut minimiser les fuites d'hydrocarbure du barrage. Ces fuites entraîneront un coût de dépollution obligatoire en aval du barrage. Il faut enfin, tenir compte des prérogatives des plans POLMAR-TERRE. Ils indiquent les parties du littoral protégeables. Ils indiquent aussi le dispositif à utiliser. Une pondération de l'efficacité du barrage doit être faite suivant sa capacité à protéger un site, la vitesse du courant qui y réside, et la distribution de ces sites sur nos côtes.

Notre problème d'optimisation peut s'écrire :

$$\text{Min}_{(L, Z, R)} \quad \mathbf{C} = p_{v1} \mathbf{C}_{v1} + p_{v2} \mathbf{C}_{v2}$$

Où  $p_{v1}$ ,  $p_{v2}$  expriment la pondération dans la protection d'un littoral soumis à un courant de 1 nœud et de 2 nœuds, et où  $\mathbf{C}_{v1}$ ,  $\mathbf{C}_{v2}$  expriment le coût d'un barrage et de son éventuelle « non protection » du littoral. Les variables d'optimisation sont la longueur du barrage  $L$ , son tirant d'eau  $Z$ , la résistance de sa chaîne  $R$ .

Les fonctions  $\mathbf{C}_v$  peuvent s'écrire

$$\mathbf{C}_v = c_t L Z + c_c P_R + c_{pol} \sum_e f_{pol}^e$$

Où  $c_t$  est le coût d'une unité de textile,  $c_c$  le coût d'une unité de chaîne,  $P_R$  le poids d'une unité de chaîne de résistance  $R$ , et où  $c_{pol}$  est le coût de dépollution due à une fuite du barrage. Le coefficient  $c_{pol}$  s'interprète comme un coefficient de pénalisation associée à la contrainte  $\sum_e f_{pol}^e = 0$ .

Les contraintes du problème d'optimisation peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned} \|t\| &< R \\ L &> \|AB\| \end{aligned} \quad (5)$$

Le tirant d'eau  $Z > 0$ , la distance entre les extrémités  $\|AB\|$  est donnée. Dans la mise en œuvre de l'algorithme nous utiliserons que l'angulation du barrage à son point gauche respecte  $\pi/2 > \angle A > 0$ , et que la tension au point gauche du barrage  $t_A < R$ .

Un plan POLMAR de protection de site est souvent composé de plusieurs barrages connectés entre eux. Il faut pour être plus général que ci-dessus, ajouter à la fonction économique, le coût des corps morts et des amarres placés aux points de jonction.

La spécificité du problème est que la fonction  $f_{pol}$  n'est pas dérivable. Nous allons utiliser une méthode se dispensant des dérivées de la fonction à minimiser.

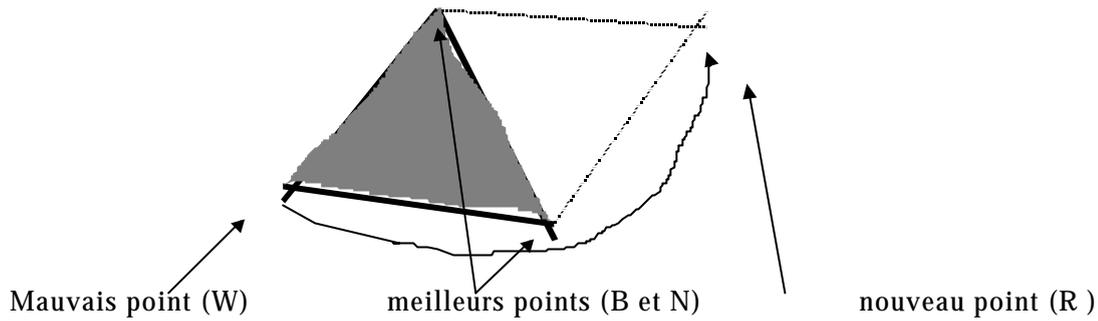
## 2) Présentation générale de la méthode du simplexe flexible

La méthode du simplexe décrite ci-après est aussi appelée la méthode des polyèdres flexibles. Elle est très utilisée en chimie industrielle pour optimiser les procédés. La fonction économique est souvent obtenue par un plan d'expérience.

Cette méthode séquentielle a été proposée par Spendley [SPE 62]. Elle consiste à faire évoluer dans l'espace admissible des variables un objet géométrique simple, dit "simplexe". Cet objet comprend des sommets. En chaque sommet de l'objet, la fonction économique  $\mathbf{C}$  est évaluée. Le plus mauvais sommet de l'élément est remplacé par un nouveau sommet où il est plausible que la fonction économique soit meilleure. Ce nouveau sommet est obtenu par réflexion du « mauvais » sommet vis à vis du centre de gravité des sommets restants.

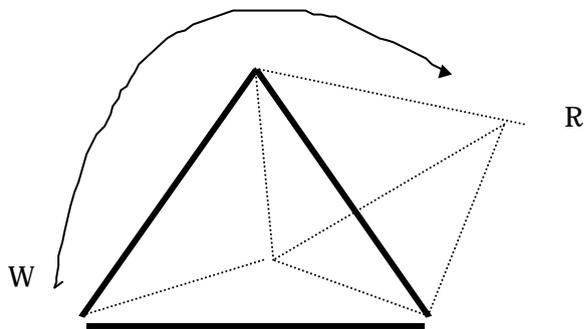
La nomenclature utilisée est la suivante :

- $W$  : point le « plus mauvais » (worst)
  - $N$  : point juste avant le « plus mauvais »
  - $B$  : « meilleur » point (best)
  - $G$  : centre de gravité de la figure formée par les points restants
  - $R$  : point symétrique, obtenu par réflexion (à distinguer de la résistance de la chaîne du barrage)
- Avec les seules deux variables de conception  $L$  et  $Z$  ( $R$  fixé à  $20^T$  par exemple) , un simplexe peut être un triangle équilatéral (figure 5).



**Figure 5. Simplex en dimension 2**

- En dimension  $k=3$ , avec les trois variables de conception (L, Z, R), un simplex peut être un tétraèdre régulier (figure 6).

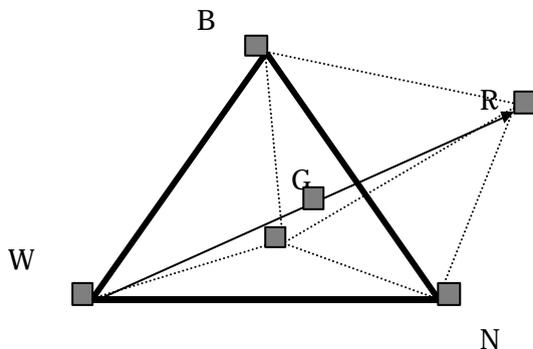


**Figure 6. Simplex en dimension 3**

- En dimension  $k \geq 4$ , par exemple avec les variables dépendantes (L, Z, R,  $t_A$ ,  $Q_A$ ), un simplex serait un hyperpolyèdre.

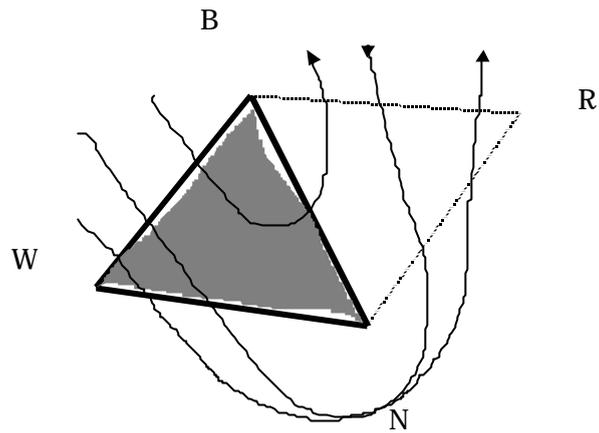
Les règles d'évolution du simplex dans l'espace des variables de conception sont les suivantes.

**REGLE 1 :** Le point éliminé est le « plus mauvais » point du simplex. Le nouveau point est le symétrique géométrique du point éliminé au travers de la figure formée par les points restants (figure 7).



**Figure 7. Règle de réflexion d'un simplex**

**REGLE 2 :** Si la réponse **C** au point R est moins bonne qu'aux points B et N, alors R sera remplacé par W à l'itération suivante, un phénomène de bouclage apparaît ( $W < - > R$ ). Dans ce cas le point N est utilisé pour construire le prochain point de réflexion (figure 8).

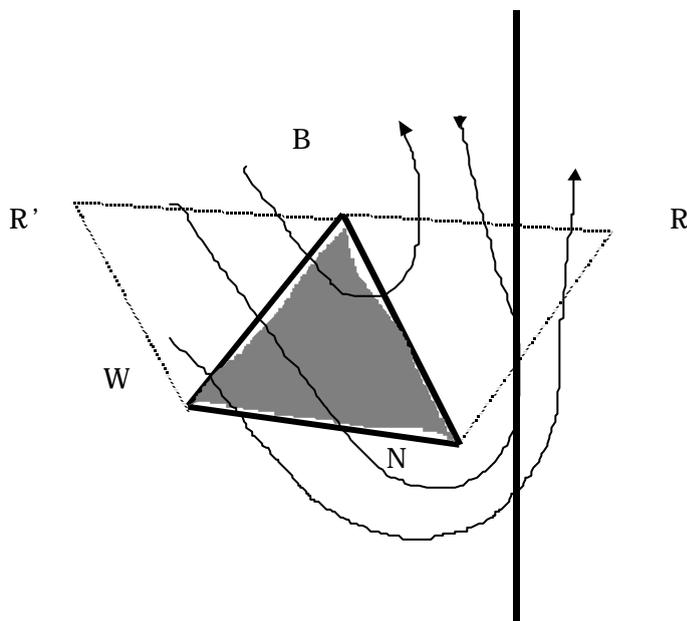


**Figure 8. Règle d'évolution en cas de « remontée »**

Cependant il y a deux réflexions possibles :

- Si la réponse en R est meilleure qu'en W, N est réfléchi à travers B-R
- Si la réponse en W est meilleure qu'en R, N est réfléchi à travers W-B

REGLE 3 : La réflexion du point rejeté peut franchir une limite sur une variable (cas de la contrainte  $\|t(x)\| < 20 T$  par exemple). Dans ce cas, le point réfléchi est affecté de la plus mauvaise réponse et la règle 2 est appliquée : le point N est réfléchi (figure 9).

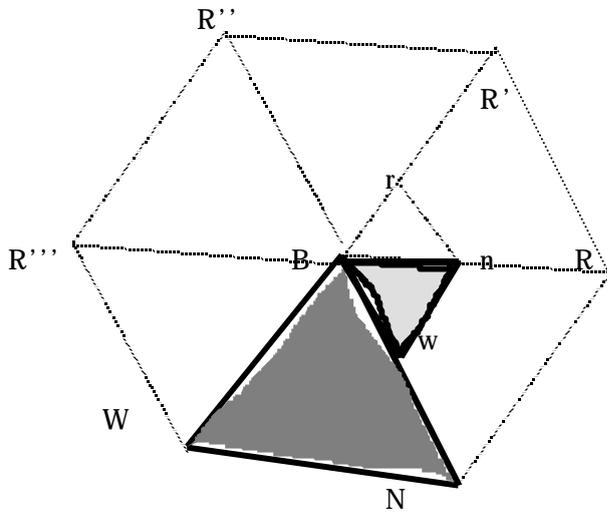


**Figure 9. Réflexion en présence d'une contrainte**

REGLE 4 (empirique): Lorsqu'un optimum est localisé, les règles 1, 2 et 3 forcent le simplex à "tourner" autour d'un point (pivot). Si la progression est pourvue jusqu'à ce que le pivot ait été utilisé M fois. M est défini de manière empirique par la relation :

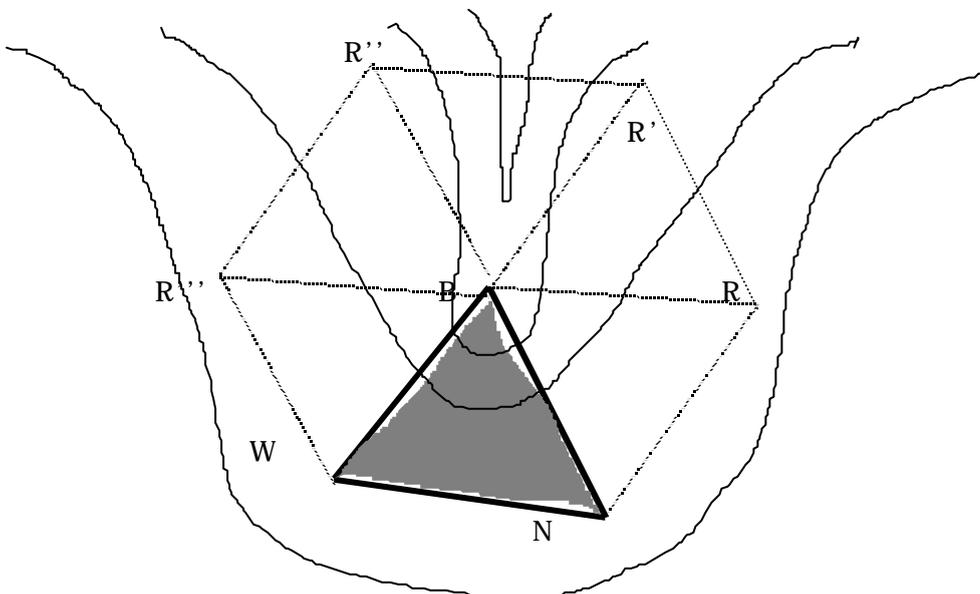
$$M = 1.65 k + 0.5 k^2$$

Cette poursuite permet d'explorer à fond l'espace autour de B. Une détermination plus précise de l'optimum peut être conduite à partir du point pivot en diminuant la taille du meilleur simplex autour de B. Il s'agit du simplex (Bnw) sur la figure 10 ci-dessous.



**Figure 10. Réduction de la taille du simplex à l'approche de la convergence**

Remarque : Certaines configurations de la surface de réponse **C** mettraient la méthode en péril. Un exemple est donné sur la figure ci-dessous.



**Figure 11. L'évolution d'un simplex dans un cas particulier**

Les évolutions connues de la méthode sont les suivantes. Elles permettent d'améliorer ses performances :

- Loin de l'optimum la taille du simplex peut être augmentée lors de la phase de réflexion, tandis que près de l'optimum elle peut être diminuée.
- La réflexion par G est remplacée par la réflexion par  $G_w$  obtenue par pondération des réponses aux points de la figure à travers laquelle la réflexion est faite. La réflexion du point W se fait via le point  $G_w$ .
- Les réponses **C** aux points G et R sont mesurées. Les réponses aux points W, G et R sont supposées suivre une loi d'interpolation (parabole, Gaussienne). Le point R est remplacé par le point optimum de cette interpolation sur la ligne WR.

## **CONCLUSION**

La technologie des barrages antipollution s'est développée avec une démarche empirique et avec le concours d'essais hydrodynamiques d'il y a une vingtaine d'années. Avec les moyens actuels il s'agit d'améliorer la connaissance que nous avons de cette technologie. Le choix des modèles physiques, des modèles numériques, et des dispositifs expérimentaux doit être judicieux. Il faut utiliser une approche complète et peu coûteuse en terme de modèle.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [RIT 02] RESEAU RITMER, <http://www.ritmer.org/fr/index.html>, site Web, 2002
- [CED 95] CEDRE, «*Les barrages flottants dans la lutte contre les pollutions en zone côtière – Etat de l'art sur les matériels commercialisés* », rapport CEDRE/DPNM n°94.22.09, Mai 1995
- [DAR 80] DARRAS , «*Etude bibliographique du comportement du barrage* », HE 042/78-42 et HE 042/80-29, Rapport d'étude LNH, 1980
- [DON 80] DONNARS P., HAUGUET A., «*Etude expérimentale du comportement d'un barrage soumis à un courant uniforme* », HE-42/80-55, Rapport d'étude LNH 1980
- [LEY 87] LEYMARIE J.C. , «*Efforts sur les amarres d'un barrage soumis à un courant permanent - Echelle 1/10* » HE 42/86-20, Rapport d'étude LNH 1987
- [GUY 95] GUYOT F., «*Etude expérimentale de la résistance ajoutée d'une maquette de navire soumise à des oscillations forcées harmonique. Etude du champ de vagues instationnaire associé*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1995
- [GUI 95] GUILBAUD M., GUYOT F., BA M., DELHOMMEAU G., «*Etude de l'écoulement hydrodynamique instationnaire autour d'un navire série 60* », 5<sup>ème</sup> journée de l'hydrodynamique, Mars 1995
- [LAN 47] LANDWEBER L., PROTTER M.H., «*The shape and tension of a light flexible cable in a uniform current* », Journal of Applied Mechanics, p 12-126, juin 1947
- [JAC 91] JACQUOT C, MARICHAL D. «*Etude du comportement dynamique d'un corps remorqué par un câble immergé* », 3<sup>ème</sup> journée de l'hydrodynamique de Grenoble, p 419-430, février 1991
- [GER 86] GERMAIN P., «*Mécanique des Milieux Continus* », tome 2, Ellipses Ecole Polytechnique, 1986
- [SPE 62] SPENDLEY, W., HEXT, G. R., HIMSWORTH, F. R. "Sequential application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation", Technometrics 4(1962):4 441-461.