B U L L E T I N

de la
lutte contre les déversements

ISSN 0381-4459

VOLUME 27
Janvier-décembre 2002

ESTIMATION DES FORCES AGISSANT SUR LES BARRAGES FLOTTANTS ANTI-MARÉE NOIRE

Robert Schulze
Environmental Consultant Inc.
Elkridge, Maryland
et
Stephen Potter
SL Ross Environmental Research Ltd.
Ottawa (Ontario)

Introduction

Il a toujours été nécessaire de prévoir la résistance à l'avancement d'un barrage flottant remorqué sans effectuer d'essais en bassins. Récemment encore, les formules développées n'étaient pas justes sur une vaste gamme de conditions et de types de barrages. Si on s'accorde généralement à dire que la résistance à l'avancement du barrage est proportionnelle au carré de la vitesse de remorquage, cela est loin d'être suffisant pour calculer cette force avec précision.

Jusque récemment, deux formules ont été ordinairement employées pour estimer les forces agissant sur les barrages flottants : (1) la formule relativement simple trouvée dans les *Technical Information Papers* publiés par l'ITOPF ; (2) la formule complexe, établie par la société Exxon Production Research et figurant, depuis 1986, dans le *World Catalog*.

Ces formules sont respectivement dites *formule de l'ITOPF* et *formule du World Catalog*. La comparaison des charges prédites par ces formules aux charges effectivement mesurées expérimentalement en mer a montré que les deux formules coïncident avec les résultats mesurés dans des domaines plutôt étroits et qu'elles sous-estiment dans de nombreux cas la résistance réelle à l'avancement des barrages.

Récemment, des essais en conditions contrôlés ont expressément visé à comparer la résistance mesurée à l'avancement à la résistance calculée à l'aide de formules. Ils visaient également à procurer des moyens plus exacts de calcul, à l'aide des nouvelles formules élaborées à partir de ces résultats mesurés. Le programme

Note à nos lecteurs

La présente livraison du Bulletin de la lutte contre les déversements est la dernière à être imprimée sur papier. Nous nous rendons aux arguments selon lesquels la publication du Bulletin uniquement sur notre site Web est plus économique et plus pratique. Pour continuer de recevoir le Bulletin sous sa forme électronique, veuillez aller sur le site Web du Centre de technologie environnementale et vous inscrire sur la liste d'envoi du bulletin. L'adresse est : www.etc-cte.ec.gc.ca/bulletin.

Les auteurs de l'article décrivent les essais réalisés en bassin expérimental de simulation du comportement du pétrole et des matières dangereuses, à l'établissement OHMSETT (Oil and Hazardous Materials Simulated Environmental Test Tank), afin de dégager de nouvelles formules empiriques pour le calcul de la résistance à l'avancement exercée sur les barrages anti-marée noire. Ils revisitent les formules ordinairement utilisées (de l'International Tanker Owners Pollution Federation [l'ITOPF] et du World Catalog of Oil Spill Response Products [le World Catalog]) pour déterminer si, à la lumière des données expérimentales, on ne peut pas les améliorer pour calculer plus justement cette résistance. Ils comparent les résultats de diverses méthodes de calcul et en évaluent la fidélité aux résultats d'essais en conditions contrôlées et aux résultats d'essais sur le terrain.

Les travaux décrits ont été effectués en vertu d'un marché passé avec le Minerals Management Service (MMS) du ministère américain de l'Intérieur. James Lane et Robert Smith étaient directeurs des travaux, Joe Mullin directeur du programme.

expérimental de 1999 du MMS cherchait à trouver un moyen de calculer la résistance à l'avancement en s'accordant aux résultats mesurés (Potter et McCourt, 1999).

Les essais, qui ont eu lieu dans le bassin de l'OHMSETT, dans le New Jersey, ont compris :

- la mesure de la résistance sur sept barrages remorqués à une gamme de vitesses ;
- la comparaison des résultats aux charges prédites par les formules de l'ITOPF et du World Catalog ;
- l'élaboration d'un nouvel ensemble d'équations empiriques inspirées de celle de l'ITOPF et collant aux résultats mesurés.

Étape importante dans l'élaboration d'une méthode d'estimation des forces s'exerçant sur les barrages flottants, ce travail était assujetti à plusieurs restrictions : (1) la force du vent n'a pas été prise en considération pour la détermination de la force totale ; (2) les formules empiriques construites exigent une constante particulière pour chaque type de barrage et chacun des trois contextes de fonctionnement ; (3) les seules hauteurs des vagues expérimentées étaient de 18,5 cm (7,3 po) et 31,2 cm (12,3 po) soit, approximativement, 0,15 m (0,5 pi) et 0,3 m (1 pi). On a proposé un ensemble de constantes pour les équations existantes concernant les vagues plus hautes, mais on n'a pas pu les confirmer par des mesures.

Ces essais ont considérablement amélioré l'exactitude et la crédibilité des calculs des forces, mais des travaux additionnels ont semblé nécessaires pour éclaircir les éventuels problèmes et permettre le calcul des forces dans des mers plus agitées. À cette fin, le MMS a commandé une autre étude (inédite à ce jour) pour déterminer la justesse des nouvelles équations empiriques (désormais dites du MMS) par rapport aux résultats et la capacité des équations de l'ITOPF ou du World Catalog d'aboutir à des résultats semblables ou même meilleurs. Plus précisément :

- on a calculé la résistance à l'avancement dans chaque essai en conditions contrôlées, avec les équations du MMS, en comparant ensuite les résultats aux résultats des mesures ;
- on a calculé la résistance à l'avancement avec les équations du World Catalog, en comparant ensuite ces résultats aux résultats des mesures ;
- on a utilisé les résultats des mesures pour ajuster les équations du World Catalog pour qu'elles donnent des résultats plus fidèles aux valeurs mesurées ;
- on a évalué le rendement de ces méthodes de calcul pour déterminer laquelle était la plus utile et dans quelles circonstances.

On n'a pas effectué de calculs additionnels avec les équations de l'ITOPF parce qu'on a déterminé qu'elles constituaient simplement un sous-ensemble particulier des équations empiriques du MMS.

Essais du MMS à l'OHMSETT, en 1999

(Potter et McCourt, 1999)

Le MMS a parrainé une série d'essais qui ont eu lieu dans le bassin de l'OHMSETT, du 24 juin au 10 juillet 1998. On y a mesuré la résistance à l'avancement sur sept barrages remorquées dans une gamme de rapports d'ouverture ou d'extension (gap ratio), d'états de la mer et de vitesses de remorquage. Les données découlant de ces essais ont servi à construire des équations permettant de prédire la résistance à l'avancement et la résistance nécessaire du barrage à la traction. On a comparé ces résultats et les équations de l'ITOPF, celles du World Catalog, et les forces mesurées dans les essais réalisés en mer par la société Marine Spill Response Corporation et la garde côtière des États-Unis.

Description de l'essai

Dans le bassin de l'OHMSETT, on a déployé des barrages pour des essais en grandeur nature. On a monté des capteurs de pression à chacun des points d'attache des câbles de remorquage sur le portique. La capacité des capteurs était de 2 000 ± 10 livres-force (lbf). On a étalonné les capteurs avant les essais et on les a vérifiés pour confirmer leur exactitude. Un ordinateur a enregistré les signaux des capteurs, la hauteur des vagues et la vitesse de remorquage à toutes les 0,1 seconde. Par observation visuelle, on a enregistré le comportement des barrages, notamment la submersion, l'aquaplanage, la forme des vagues et le rejaillissement de l'eau.

Tableau 1. - Essais de barrages par le MMS à l'OHMSETT (Potter et McCourt, 1999)

Barrage	Revanche (pi)	Revanche (cm)	Tirant d'eau (pi)	Tirant d'eau (cm)	Rapport de la flottabilité au poids*
b. rideau de 18 po de la GCC**	0,5	15	1,125	34	5
b. à panneau de 18 po de la GCC	0,58	18	0,92	28	3
b. rideau de 24 po de la GCC	1,1	34	0,92	28	14
b. à panneau de 36 po de la GCC	1	31	2	61	5
b. rideau *Oil-Stop* de 47 po de la GCA***	1,42	43	2,5	76	20
b. rideau *Ro-Boom* de 78,5 po de la GCC	2,8	85	3,7	110	20
b. rideau de 52 po de la Marine américaine	1,33	41	3	91	8

** Chiffres du fabricant. ** Garde côtière canadienne. *** Garde côtière américaine.*

Description des barrages

Les caractéristiques des barrages utilisés sont décrites dans le tableau 1.

Variables expérimentales

La grille des essais comprenait quatre variables : la vitesse de remorquage, l'état de la mer, la longueur du barrage et le rapport d'ouverture. La plupart des barrages ont été remorquées à quatre vitesses : 0,3, 0,5, 0,8 et 1 m/s (0,5, 1,0, 1,5 et 2,0 nœuds). Certains gros barrages ont été remorquées à seulement trois vitesses. Les essais se sont déroulés en eau calme, dans une vague régulière de 18,5 cm (7,3 po) de hauteur et dans un clapot portuaire de 31,2 cm (12,3 po) de hauteur. Le nombre d'épreuves a totalisé 358, soit 48 par barrage, dans la plupart des cas.

On a noté comme valeur moyenne de la traction la demi-somme de la traction à chacun des deux points de remorquage. C'est la moitié de la résistance à l'avancement calculée selon la formule du World Catalog. Les essais ont montré que la traction éprouvée par un barrage n'est pas constante, en particulier quand le barrage est remorqué au travers des vagues. Alors que le barrage suit les crêtes et les creux des vagues, la traction fluctue, culminant quand le barrage frappe le devant de la vague.

On a noté les valeurs maximales et moyennes de la traction, les charges maximales étant définies comme le 95e centile des valeurs enregistrées à chaque épreuve. Puisque le barrage doit être conçu pour résister à ces tractions maximales, l'analyse s'est concentrée sur ces charges de traction du 95e centile.

Formules du MMS pour le calcul de la traction

(Potter et McCourt, 1999)

On a mis les données mesurées des essais sous forme de tableaux, en fonction de la vitesse de remorquage, du rapport d'ouverture et de l'état de la mer. On s'est ensuite servi de ces données pour construire un ensemble de formules de calcul de la force de traction sur un barrage relativement à la surface projetée de la partie immergée du barrage et à la vitesse de remorquage. Comme on a déterminé que la force du vent était petite, on n'en a pas tenu compte.

Tableau 2. - Valeurs de *K* pour des barrages examinées

Barrage	Eau calme	Vagues régulières	Clapot portuaire
b. rideau de 18 po de la GCC	1,7	2,8	3,1
b. à panneau de 18 po de la GCC	1,7	4,9	5,5
b. rideau de 24 po de la GCC	2	2,8	3,5
b. à panneau de 36 po de la GCC	3,2	5,7	7
b. rideau *Oil-Stop* de 47 po de la GCA	2	2,9	2,9
b. rideau *Ro-Boom* de 78,5 po de la GCC	4,8	6	6,6
b. rideau de 52 po de la Marine américaine	3,4	4,5	4,6
Valeurs maximales	4,8	6	7
Valeurs moyennes	2,7	4,2	4,7

Les équations obtenues prennent la forme de l'équation de l'ITOPF, un ensemble particulier de constantes ayant été développé pour chaque barrage et l'état de l'environnement. Les auteurs de l'étude font remarquer que la méthode de corrélation a été celle des moindres carrés pour presque toutes les valeurs moyennes quadratiques de 0,95 ou plus.

L'équation de départ possédait un facteur de conversion pour assurer la cohérence des unités. Nous ne présenterons que l'équation transformée, sa constante *K* étant la valeur convertie dite *'K'* dans le rapport de l'étude. Voici l'équation de base obtenue pour la traction :

$$T = K \bullet A \bullet V^2$$

où : T = la force de traction, en livres (moitié de la résistance à l'avancement)*

K = une constante, en livres-force / (pi^2• nœuds^2)

A = la surface projetée de la partie immergée du barrage, en pi^2

V = la vitesse de remorquage, en nœuds

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

Par *surface projetée*, on entend soit le tirant d'eau du barrage multiplié par l'ouverture pendant le remorquage, soit la longueur du barrage multipliée par le tirant d'eau puis par le rapport d'ouverture.

Cette équation de base engendre toute une série d'équations après qu'on a attribué à *K* des valeurs permettant la conciliation des valeurs calculées de la traction avec les valeurs mesurées au 95e centile. Le tableau 2 présente les valeurs calculées de *K* à employer dans l'équation.

Discussion sur les équations empiriques antérieures

Voici l'équation de l'ITOPF, qui est peut-être la mieux connue pour le calcul des forces s'exerçant sur les barrages (ITOPF, 1986).

$$F_w = 26\, A_w\, (V_w/40)^2$$

$$F_c = 26\, A_c\, V_c^2$$

où : F_w = la force exercée sur le barrage par le vent, en kg

A_w = la surface de la partie non immergée du barrage (revanche), en m^2

V_w = la vitesse du vent, en nœuds

F_c = la force exercée sur le barrage par les vagues et le courant, en kg

A_c = la surface immergée du barrage, en m^2

V_c = la vitesse du courant ou de remorquage, en nœuds

Bien que certains auteurs ne le précisent pas, la surface immergée est clairement ce qu'on appelle généralement la *surface projetée*, qui est soit le tirant d'eau du barrage multiplié par l'ouverture pendant le remorquage, soit la longueur du barrage multipliée par le tirant d'eau puis par le rapport d'ouverture.

Les unités de force rendent difficile la comparaison des résultats obtenus par la formule de l'ITOPF et d'autres calculs. En outre, la force calculée ici est la résistance à l'avancement et non la traction (la moitié de cette résistance), qui est employée dans les équations du MMS. D'autres calculs utilisés ici donnent un résultat en livres-force (lbf).

Après conversion des unités et transformation du résultat en traction plutôt qu'en résistance à l'avancement, l'équation de l'ITOPF s'est révélée identique à l'équation du MMS avec $K = 2{,}66$. Comme l'équation de l'ITOPF est essentiellement un sous-ensemble de l'équation du MMS, nous ne l'emploierons pas pour la comparaison des valeurs de la traction.

Les formules du World Catalog et d'Exxon sont publiées depuis 1986 dans ce catalogue dont la dernière édition remonte à 1999 (Exxon, 1982 ; Schulze, 1999). Les voici :

$$T_a = 0{,}5\, L\, \tau C_d\, \rho_a\, f V_a^2$$
$$T_w = 0{,}5\, L\, \tau C_d\, \rho_w\, d\, (V_w + 0{,}5 \sqrt{H_s})^2$$
$$D = 2\,(T_a + T_w)$$

où : D = la résistance totale à l'avancement, en lbf *
T_a = la traction due au vent, en lbf
T_w = la traction due aux vagues, en lbf
V_a = la vitesse du vent, en pi/s
V_w = la vitesse du courant ou de remorquage, en pi/s
ρ_a = la masse volumique de l'air (0,002 38 slug/pi^3)
ρ_w = la masse volumique de l'eau (1,98 slug/pi^3)
L = la longueur du barrage, en pi
τ = un paramètre de la traction, sans dimension
C_d = un coefficient de la résistance à l'avancement (posé égal à 1,5), sans dimension
f = la revanche du barrage, en pi
d = le tirant d'eau du barrage, en pi
H_s = la hauteur significative des vagues, en pi

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

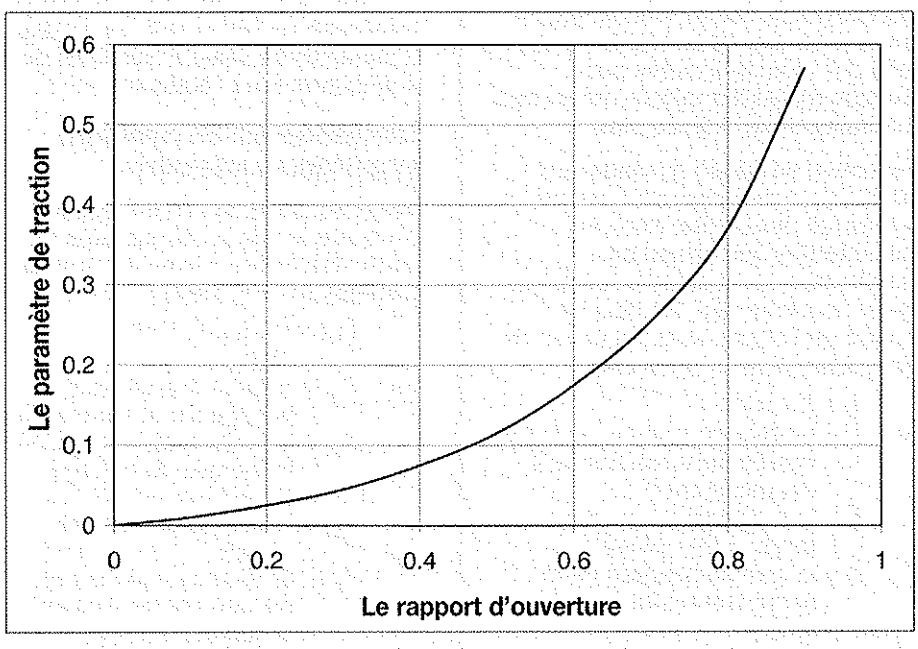


Figure 1. - Le paramètre de traction en fonction du rapport d'ouverture

À noter que, à la différence des autres formules, toutes les vitesses sont en pi/s ; il faut donc convertir la plupart des vitesses de remorquage (1 nœud = 1,69 pi/s).

Les auteurs de l'étude du MMS font observer que la force du vent représente une fraction généralement très petite de la force exercée sur le barrage. Par exemple, si on utilise les formules qui précèdent, dans un courant de 0,75 m/s (1,5 nœud), un vent de 10 m/s (20 nœuds) et un rapport typique du tirant d'eau à la revanche de 2, la charge due au vent serait d'environ 10 % seulement de celle qui serait due au courant. Comme les vents étaient légers pendant les essais à l'OHMSETT, on n'a pas pris leur force en considération dans les calculs.

Dans l'équation du World Catalog, le paramètre de traction (τ) est une fonction du rapport d'ouverture, et on peut choisir des valeurs discrètes sur la courbe de la figure 1. À noter que, dans la formule simple de l'ITOPF et dans les formules empiriques du MMS qui sont décrites plus loin, la force est proportionnelle à la surface projetée du barrage, ce qui signifie qu'elle est directement proportionnelle au rapport d'ouverture. La courbe du paramètre de traction n'est pas une fonction linéaire : la force augmente exponentiellement en fonction du rapport d'ouverture, ce qui donne un résultat différent.

L'origine de la courbe du paramètre de traction se situerait dans des travaux théoriques de Jerry Milgram, du Massachusetts Institute of Technology (MIT), réalisés à contrat pour Exxon. La courbe repose sur l'hypothèse selon laquelle un barrage remorqué adopte une forme caténaire, s'il est vu en plan, ce qui aide à calculer les charges exercées sur les barrages. Pendant longtemps, les utilisateurs de l'équation du World Catalog ont soupçonné qu'il était possible d'améliorer les résultats des calculs en ajustant la courbe ou en dessinant une série de courbes, à partir de valeurs soigneusement mesurées de la

traction du barrage au cours d'essais en grandeur nature. Cela n'avait jamais été fait, faute de données expérimentales. Ce l'est désormais, et brillamment, grâce aux données du MMS. Voici les détails de la façon dont on s'y est pris :

Ajustement de l'équation du World Catalog

Les valeurs calculées par l'équation du World Catalog coïncident dans certains cas avec les valeurs mesurées de la traction, mais elles pèchent parfois par défaut. Les utilisateurs soupçonnaient que ce phénomène était provoqué par une courbe défectueuse du paramètre de traction, qui ne peut avoir été tracée à partir de données mesurées détaillées. Le MMS a commandé une deuxième étude pour déterminer la fidélité de ses nouvelles équations empiriques aux résultats mesurés et pour voir si les équations du World Catalog pouvaient être conciliées avec les données mesurées (Schulze, 2001).

Il est justifié de vouloir améliorer l'équation du World Catalog parce qu'elle contient un terme tenant compte de la hauteur des vagues. Cela signifie, et c'est important, qu'il est possible d'y saisir toute hauteur des vagues. Les équations du MMS ajustent les valeurs calculées en utilisant une constante distincte pour chaque hauteur des vagues, mais ces hauteurs sont petites et se limitent aux valeurs qui pourraient être produites dans des essais grandeur nature en bassin. Les seules hauteurs éprouvées ont été 18,5 cm (7,3 po) et de 31,2 cm (12,3 po), ou approximativement 0,15 m (0,5 pi) et de 0,3 m (1 pi).

Comme on ne connaît pas le comportement de ces équations quand les vagues sont plus hautes, il s'agissait donc d'ajuster les équations du World Catalog, qui peuvent s'appliquer à n'importe quelle hauteur des vagues, pour les faire coïncider avec les données expérimentales. À cette fin, on a utilisé le 95e centile de la traction mesurée par le MMS à 0,5 m/s (1 nœud) en eau calme, pour chaque barrage, comme solution de l'équation du World Catalog, puis on a calculé une nouvelle valeur du paramètre de traction pour chaque rapport d'ouverture expérimenté. On a utilisé le résultat obtenu en eau calme pour construire la nouvelle courbe du paramètre de traction, parce que les équations du World Catalog permettent la saisie de la hauteur des vagues.

On a choisi la valeur de 0,5 m/s (1 nœud) pour centrer les données parce que c'est souvent la limite supérieure pour une localisation efficace de la marée noire. Comme, dans toutes ces équations, la vitesse est élevée au carré, l'emploi d'une vitesse supérieure de remorquage, comme 1 m/s (2 nœuds), pourrait tendre à augmenter toutes les erreurs qui se trouveraient dans les équations.

À l'aide de cette information, on a tracé un ensemble de courbes pour le paramètre de traction de chaque taille de barrage, mais non pour chaque type de barrage. Ces nouvelles valeurs du paramètre de traction ont ensuite servi à calculer un résultat correspondant aux valeurs mesurées pendant les essais. Les résultats de ces calculs sont très encourageants.

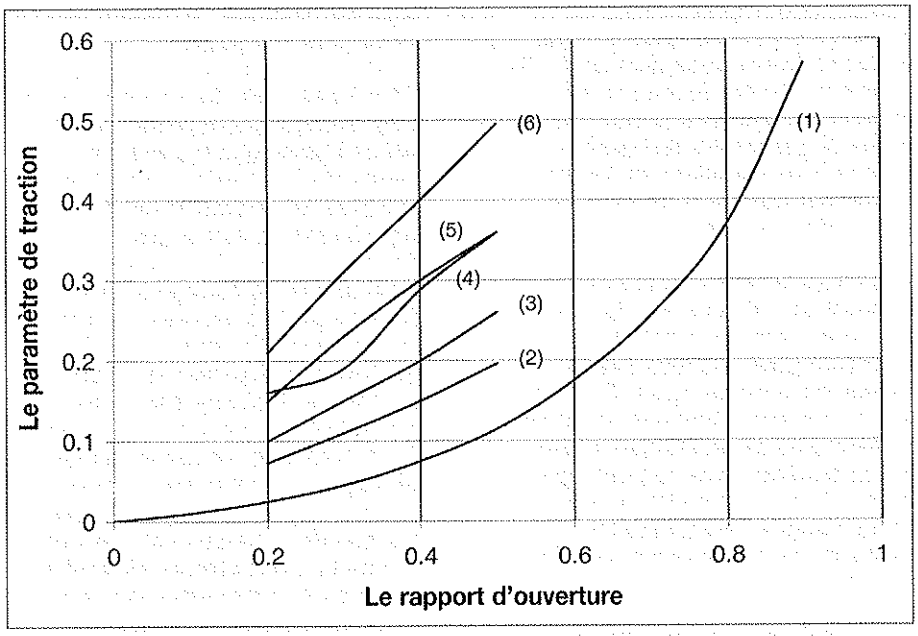
Les équations ajustées du World Catalog coïncident aussi bien, et parfois mieux, avec les résultats mesurés que les équations empiriques du MMS. Il est plus facile employer les équations du MMS, mais elles sont moins universelles. Les constantes de ces équations incluent seulement l'eau calme et des vagues de 17,8 et 30,4 cm (7 et 12 po) de hauteur, ce qui est plutôt restrictif, puisque l'eau abritée se définit par des vagues pouvant atteindre 0,9 m (3 pi) et l'eau du large par des vagues de jusqu'à 1,8 m (6 pi). Comme la hauteur des vagues constitue un terme de l'équation du World Catalog, celle-ci se prête à une gamme beaucoup plus large d'états de la mer.

La figure 2 expose les nouvelles courbes du paramètre de traction obtenues grâce aux calculs décrits ci-dessus. La GCC utilise la même courbe pour les barrages rideaux de 18 po (46 cm) et de 24 po (61 cm) parce que les valeurs mesurées présentent la même allure et que, dans les deux cas, le tirant d'eau est à peu près identique.

On n'a pas tracé de nouvelle courbe pour le barrage à panneau de 18 po (46 cm) parce que les valeurs mesurées à 0,5 m/s (1 nœud) sont à peu près identiques. À des vitesses supérieures de remorquage, notamment dans les vagues, on mesure avec le barrage à panneau des valeurs très élevées de la force. En fait, ni les équations du MMS ni les équations ajustées du World Catalog ne décrivent bien la traction sur ce barrage aux grandes vitesses de remorquage, en particulier dans les vagues. Essayer de concilier les équations avec les valeurs mesurées aux grandes vitesses est susceptible de produire des valeurs excessives aux vitesses inférieures, en particulier autour de 0,5 m/s (1 nœud), où la majeure partie du remorquage est susceptible de se faire. D'où la décision de faire coïncider les équations et les valeurs mesurées pour les barrages à panneau le mieux possible jusqu'à 0,5 m/s (1 nœud), puis d'autoriser de plus grands écarts aux vitesses supérieures.

Sur la figure 2, on peut voir que, sauf pour le barrage à panneau, les nouvelles courbes du paramètre de traction sont presque rectilignes. Cela nous amène à croire que les équations du World Catalog pourraient encore être simplifiées. On pourrait dégager une constante pour chaque type de barrage pour que l'utilisateur n'ait à employer que cette constante et le rapport d'ouverture, sans devoir lire la valeur du paramètre de traction sur une courbe. Le tableau 3 présente les nouvelles constantes qui peuvent être employées avec le rapport d'ouverture dans des équations modifiées.

Les nouvelles constantes *(C)* présentées dans le tableau 3 peuvent se combiner à d'autres constantes dans l'équation actuelle du World Catalog pour donner une équation considérablement simplifiée de la traction exercée sur le barrage. Voici les termes de l'équation que l'on peut ainsi fusionner en une constante unique :



(1) Courbe d'origine
(2) Barrage rideau de 18 et de 24 po
(3) Barrage rideau de 47 po
(4) Barrage à panneau de 36 po
(5) Barrage rideau de 52 po
(6) Barrage rideau de 78,5 po

Figure 2. - Nouvelles courbes du paramètre de traction en fonction du rapport d'ouverture correspondant aux résultats mesurés.

Tableau 3. - Constantes particulières pour les équations du World Catalog

Type de barrage	Courbe du paramètre de traction	Constante C du World Catalog
b. rideaux de 18 et de 24 po	2	0,38
b. rideau de 47 po	3	0,5
b. à panneau de 36 po	4	0,72
b. rideau de 52 po	5	0,75
b. rideau de 78,5 po	6	1

ρw = la masse volumique de l'eau (1,98 slug/pi^3)

τ = un paramètre de la traction, sans dimension

C_d = un coefficient de la résistance à l'avancement (posé égal à 1,5), sans dimension

L = la longueur du barrage, en pi

d = le tirant d'eau du barrage, en pi

A = la surface projetée, en pi^2 (longueur du barrage • tirant d'eau • rapport d'ouverture) ; inutile désormais d'employer L et d.

Ainsi, dans l'équation d'origine

$$T_w = 0{,}5\ L\ \tau C_d\ \rho_w\ d\ (V_w + 0{,}5\sqrt{H_s})^2$$

on fusionne les constantes d'origine ($0.5 \times C_d \times \rho_w = 0.5 \times 1.5 \times 1.98 = 1.5$) et on insère la nouvelle constante C à la place du paramètre de traction. La nouvelle équation du World Catalog pour la traction provoquée par la force de l'eau devient alors :

$$T_w = 1{,}5\ C\ A\ (1{,}67\ V_w + 0{,}5\sqrt{H_s})^2$$

où : T_w = la traction due aux vagues, en lbf *

C = la constante du barrage, figurant au tableau 3

A = la surface projetée, en pi^2 (longueur du barrage • tirant d'eau • rapport d'ouverture)

V_w = la vitesse de remorquage, en pi/s

H_s = la hauteur des vagues, en pi

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

On saisit la valeur de V_w en nœuds, puisque l'on a ajouté le facteur de conversion en pi/s. La formule est beaucoup plus maniable que la formule d'origine du World Catalog. La constante C peut prendre une valeur parmi cinq, selon la taille du barrage. Quand on travaille avec un seul barrage et un seul rapport d'ouverture, on peut réduire la formule à une seule constante, qu'on emploie avec la vitesse de remorquage et la hauteur des vagues.

Comme, dans les essais du MMS, on n'a pas mesuré la force du vent, on ne peut comparer aucune valeur nouvelle mesurée aux valeurs calculées. Afin de ne plus avoir besoin du paramètre de traction, on peut ajuster l'équation exprimant la traction due au vent en y insérant la nouvelle constante C et la surface projetée du barrage au-dessus de l'eau. Rappelons l'équation d'origine :

$$T_a = 0{,}5\ L\ \tau C_d\ \rho_a\ f\ V_a^2$$

T_a = la traction due au vent, en lbf

V_a = la vitesse du vent, en pi/s

ρ_a = la masse volumique de l'air (0,002 38 slug/pi^3)

L = la longueur du barrage, en pi

τ = un paramètre de la traction, sans dimension

C_d = un coefficient de la résistance à l'avancement (posé égal à 1,5), sans dimension

On fusionne les constantes d'origine ($0{,}5 \times C_d \times \rho_a = 0{,}5 \times 1{,}5 \times 0{,}002\ 38 = 0{,}001\ 785$)

A = la surface projetée, en pi^2 (longueur du barrage•tirant d'eau•rapport d'ouverture) ; inutile désormais d'employer L et f.

C = la constante du barrage, figurant au tableau 3.

Ainsi l'équation d'origine devient :

$$T_a = 0{,}001\ 785\ C\ A\ (1{,}69\ V_a)^2$$

Comme avant, la résistance à l'avancement est donnée par :

$$D = 2\ (T_a + T_w)$$

où : D = la résistance totale à l'avancement, en lbf *

T_a = la traction due au vent, en lbf

T_w = la traction due aux vagues, en lbf

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

Évaluation du rendement des calculs de la traction pour tous les barrages éprouvés

Comparons maintenant tous les résultats calculés à l'aide des équations du MMS et du World Catalog aux résultats mesurés (Schulze, 2001). Bien que les deux ensembles d'équations aient été formulés pour coller aux résultats mesurés, aucun n'y parvient parfaitement.

Les équations du MMS sont conciliées avec les résultats mesurés par ajustement des courbes. La formule du World Catalog fait de même en ajustant la courbe du paramètre de traction à chaque rapport d'ouverture de valeurs mesurées par rapport à une vitesse basse de remorquage de 0,5 m/s (1 nœud) en eau calme. Cette vitesse a été choisie parce qu'elle est peut-être la plus typique et que l'un des termes de l'équation permet d'adapter cette dernière à l'état de la mer : il convient donc de baser l'équation sur la situation correspondant à l'eau calme.

- **Barrage rideau de 18 po de la GCC.** - Les équations du MMS et du World Catalog coïncident bien avec les valeurs mesurées. Elles donnent, en général, des résultats à peu près identiques, mais tendant à pécher par défaut, dans le cas du World Catalog.
- **Barrage à panneau de 18 po de la GCC.** - Les équations ne coïncident pas aussi bien, dans son cas, avec les résultats mesurés, en particulier aux grandes vitesses de remorquage. En eau calme, les deux types d'équations sont satisfaisants jusqu'à 1 m/s (2 nœuds). Dans la vague de 0,18 m (0,6 pi), le World Catalog fait mieux jusqu'à 1 m/s (2 nœuds) pour le barrage long, le MMS pour le court. La même chose est vraie dans la vague de 0,30 m (1 pi). Dans la plupart des cas, les équations du World Catalog sont meilleures que celles du MMS jusqu'à 0,8 m/s (1,5 nœud) ; à 1 m/s (2 nœuds), quelque chose se produit, et aucun ensemble d'équations ne représente bien les valeurs mesurées. À noter que, contrairement à l'équation du MMS, le World Catalog n'emploie pas une nouvelle constante pour le barrage à panneau de 18 po (34 cm).
- **Barrage rideau de 24 po de la GCC.** - Les données mesurées et calculées sont toujours proches. L'un ou l'autre système de calcul est satisfaisant pour ce barrage dans les conditions décrites.
- **Barrage rideau *Oil-Stop* de 47 po de la GCC.** - Les données mesurées et calculées sont toujours proches. L'un ou l'autre système de calcul est satisfaisant pour ce barrage dans les conditions décrites.
- **Barrage rideau de 52 po de la marine des USA.** - Les valeurs calculées pour ce gros barrage ne sont pas aussi proches des résultats mesurés pour les petits, mais elles sont assez proches pour remplir leur objectif. L'un ou l'autre système de calcul serait satisfaisant pour ce barrage dans les conditions décrites.
- **Barrage rideau *Ro-Boom* de 78,5 po de la GCC.** - Les données mesurées sur ce grand barrage sont beaucoup plus erratiques que sur les petits barrages. Les équations sont donc également beaucoup moins susceptibles de coïncider avec les données mesurées. Même si les vitesses de remorquage étaient plus rapprochées les unes des autres (aucune épreuve n'a eu lieu à 1 m/s [2 nœuds]), les valeurs mesurées variaient fortement. Malgré ces différences, les deux équations ont permis de calculer assez bien les forces agissant sur les barrages pour être utiles dans tous les essais signalés.
- **Barrage à panneau de 36 po de la GCC.** - Pour des raisons mal élucidées, la traction mesurée sur ce type de barrage est très erratique, donc difficile à simuler avec des équations. Dans tous les contextes, les deux systèmes d'équations font bien jusqu'à 0,8 m/s (1,5 nœud), puis traînent très loin derrière les valeurs mesurées. Comme ce type de barrage est moins susceptible d'être remorqué à cette vitesse et au-dessus, il semblerait sage de laisser telles quelles les équations. Quiconque a besoin de renseignements détaillés sur la traction exercée sur de plus grands barrages à panneau à partir de 0,8 m/s (1,5 nœud) devrait obtenir un ensemble particulier de constantes pour cette application.

Dans les équations du World Catalog, on peut faire varier la hauteur des vagues. Le tableau 5 permet de comparer la traction sur les barrages des tailles indiquées, en eau abritée et en haute mer, selon les équations du MMS et les tensions selon les équations du World Catalog aux hauteurs convenables des vagues.

Bien que l'on ne possède pas les valeurs de la traction mesurées en bassin pour les vagues de 0,9 et 1,8 m (3 et 6 pi) de hauteur, les valeurs calculées nous amènent à croire que les équations du MMS sous-estiment la traction en eau abritée et les vagues du large, plus particulièrement aux basses vitesses de remorquage.

Évaluation globale des résultats

Selon notre évaluation des mesures expérimentales, les équations du MMS ou du World Catalog permettraient, dans la plupart des contextes, de calculer les forces agissant sur les barrages. Le tableau

Tableau 4. - Valeurs de la constante *K* en fonction des états normalisés de la mer

État de la mer	Valeurs moyennes de *K*
Eau calme (hauteur des vagues : 0 à 0,3 m [1 pi]) barrages de 18 po	1,7
Eau abritée (hauteur des vagues : 0 à 0,9 m [3 pi]) barrages de 24 et de 36 po	4,3
Eau du large (hauteur des vagues : 0 à 1,8 m [6 pi]) barrages de 47, 52 et 67 po	4,7

5 semble indiquer que les équations du World Catalog sont meilleures dans les contextes où l'eau est abritée et dans les vagues du large qui ne peuvent pas être produites en bassin expérimental.

Les équations du MMS seraient d'un emploi plus facile, puisqu'elles comportent moins de termes. Après fusion des constantes, cependant, les équations ajustées du World Catalog exigent un peu plus d'effort. En outre, les cracks de l'ordinateur affirment pouvoir intégrer les équations du World Catalog dans les tableaux de calcul et les résoudre à l'ordinateur. D'après notre analyse, il semble clair que les deux ensembles d'équations sont assurés d'un créneau comme moyens de calcul de la traction sur les barrages flottants remorqués.

Comparaison de la traction mesurée au cours d'essais en mer et des résultats des calculs

Dans la nouvelle étude du MMS (Schulze, 2001), la traction mesurée au cours d'essais en mer est comparée aux résultats calculés à l'aide des formules du MMS et du World Catalog. Dans certains cas, les valeurs calculées collent très bien aux résultats mesurés et, dans d'autres cas, elles excèdent ces derniers de beaucoup. À cela, il y a de nombreuses raisons, parmi lesquelles quelques-unes seulement sont bien élucidées.

Voici des explications des écarts entre les mesures et les calculs :

Tableau 5. - Valeurs calculées de la traction sur des barrages typiques, en eau abritée et dans les eaux du large

Vitesse de remorquage (nœuds)	Traction calculée selon le MMS (livres)	Traction selon le World Catalog (livres)
Eau abrité ; vagues de 0,9 m (3 pi) ; barrage de 36 po ; revanche de 0,30 m (1 pi) ; tirant d'eau de 0,60 m (2 pi) ; 61 m (200 pi) de longueur ; rapport d'ouverture de 0,3 ; *K* selon le MMS = 4,3 ; *C* selon le World Catalog = 0,72.		
0,5	129	377
1,0	516	847
1,5	1 161	1 500
2,0	2 064	2 336
Eau du large ; vagues de 1,8 m (6 pi) ; barrage de 52 po ; revanche de 0,40 m (1,3 pi) ; tirant d'eau de 0,9 m (3 pi) ; 61 m (200 pi) de longueur ; rapport d'ouverture de 0,3 ; *K* selon le MMS = 4,7 ; *C* selon le World Catalog = 0,75.		
0,5	212	868
1,0	846	1 720
1,5	1 904	2 862
2,0	3 384	4 294

- Les auteurs des essais en mer signalent généralement la traction moyenne, tandis que les équations que nous avons décrites sont conçues pour estimer les 95e centiles, ou deux écarts types au-dessus de la moyenne. Dans les essais en mer, on a rarement enregistré l'écart type, mais, le cas échéant, c'est une valeur généralement grande, parfois beaucoup plus que la moyenne même (Nordvik et al., 1995). Dans la plupart des cas, les valeurs calculées de la traction en mer sont beaucoup plus grandes que les valeurs moyennes mesurées, ce qui est bon parce que cela montre que les valeurs calculées prédisent des nombres qui peuvent être dans le 95e centile, ce qui fournit un coefficient de sécurité pour la conception et l'usage des barrages.

- Il est difficile de mesurer avec justesse la vitesse de remorquage en mer, en particulier quand elle est basse. À l'origine, les techniques de mesure étaient frustres, parfois basées sur la dérive minutée de copeaux de bois. En outre, les courants du large ne sont pas tous mesurés. Comme, dans toutes les équations prédisant la traction, la vitesse de remorquage est élevée au carré, les inexactitudes peuvent considérablement modifier les résultats.

- Le rapport d'ouverture a un effet sensible sur la traction exercée sur le barrage. Il est souvent difficile de maintenir le rapport souhaité d'ouverture dans les essais en mer, ce qui entraîne un écart important entre la traction mesurée et la traction calculée.

- La traction calculée est directement proportionnelle au tirant d'eau du barrage. Quand la vitesse de remorquage des barrages est grande, ces derniers tendent à s'enfoncer dans l'eau, ce qui peut augmenter le tirant d'eau. (Le raidisseur inférieur du barrage rideau peut tendre à faire basculer ce dernier, de sorte que le tirant d'eau peut ne pas augmenter quoique la revanche diminue.) De toute façon, l'augmentation non signalée du

tirant d'eau du barrage fera que la traction mesurée excédera la traction calculée.

- L'action des vagues accroît la traction sur les barrages, mais pas toujours d'une manière prédictible par une équation. La pente des vagues, mesurée par le rapport de leur longueur à leur hauteur, est susceptible d'être plus significative que la seule hauteur des vagues, mais ce rapport n'a pas été documenté et n'est pas reconnu dans les équations de la traction des barrages. Il est facile de comprendre comment une vague extrêmement longue n'aura aucun effet sur le fonctionnement du barrage, contrairement aux vagues courtes d'une mer hachée. Les essais semblent indiquer que la pente des vagues est le facteur déterminant et que le point crucial est une pente d'environ 12 à 15. Les vagues plus longues (d'une pente moindre) ne sont pas susceptibles de nuire au fonctionnement du barrage, mais les vagues plus courtes le feront certainement.
- Dans le essais, l'échec de certains barrages est imputable à l'aquaplanage. La réduction résultante du tirant d'eau du barrage diminue la traction ou celle-ci n'augmente pas en raison de la vitesse de remorquage.

Les prochains essais sur des barrages pourraient aider à résoudre ces écarts, grâce à l'inclusion des mesures suivantes.

- Signaler les valeurs observées de la traction, notamment les charges moyennes et le 95e centile des charges.
- Signaler les observation exactes des rapports d'ouverture des barrages, des courants, des vitesses de remorquage et des tirants d'eau des barrages et expliquer les variations survenant pendant l'essai.
- Signaler les valeurs de la pente et de la hauteur des vagues.

Résumé

L'équation du MMS donne de bons résultats en eau calme et dans les vagues de jusqu'à 0,3 m (1 pi) de hauteur. On utilisera l'équation ci-dessous avec les constantes appropriées. Des constantes moyennes sont fournies pour les vagues plus hautes, mais les valeurs calculées peuvent pécher par défaut. Pour des vagues de plus de 0,3 m (1 pi), il peut être préférable d'employer les équations du World Catalog, en y introduisant les valeurs convenables de la hauteur des vagues.

Équation du MMS

$$T = K \bullet A \bullet V^2$$

où : T = la force de traction, en livres
K = une constante, en lbf / (pi^2• nœuds^2)
A = la surface projetée de la partie immergée du barrage, en pi^2
V = la vitesse de remorquage, en nœuds

La surface projetée s'entend soit du tirant d'eau du barrage multiplié par la largeur balayée, soit de la longueur du barrage multipliée par le tirant d'eau puis par le rapport d'ouverture. On emploiera les valeurs de K du tableau 6. Les valeurs calculées de la traction sont conformes au 95e centile des valeurs mesurées. La résistance à l'avancement vaut deux fois la traction. Les valeurs conseillées de K en eau abritée et en haute mer sont des moyennes qui n'ont pas été vérifiées avec des données expérimentales.

Équation du World Catalog

L'équation du World Catalog donne des résultats comparables à ceux de l'équation du MMS et susceptibles d'être meilleurs pour les vagues dont la hauteur dépasse 0,3 m (1 pi).

$$T_W = 1{,}5\ C\ A\ (1{,}69\ V_W + 0{,}5 \sqrt{H_s})^2$$

où : T_W = a traction, en lbf *
C = la constante du barrage, figurant au tableau 7
A = la surface projetée, en pi^2 (longueur du barrage • tirant d'eau • rapport d'ouverture)
V_W = la vitesse de remorquage, en pi/s
H_s = la hauteur des vagues, en pi

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

Les valeurs calculées de la traction sont conformes au 95e centile des valeurs mesurées. La résistance à l'avancement vaut deux fois la traction. Les valeurs appropriées de la constante C figurent dans le tableau 7.

On trouve également dans le World Catalog une équation de la force du vent.

Tableau 6. - Valeurs de *K* pour les barrages éprouvés

Barrage	Eau calme	Vagues régulières	Clapot portuaire	Eau abritée	Haute mer
b. rideau de 18 po de la GCC	1,7	2,8	3,1		
b. à panneau de 18 po de la GCC	1,7	4,9	5,5		
b. rideau de 24 po de la GCC	2,0	2,8	3,5	4,3	
b. à panneau de 36 po de la GCC	3,2	5,7	7,0	4,3	
b. rideau *Oil-Stop* à panneau de 47 po de la GCA	2,0	2,9	2,9		4,7
b. rideau *Ro-Boom* de 78,5 po de la GCC	4,8	6,0	6,6		4,7
b. rideau de 52 po de la Marine américaine	3,4	4,5	4,6		4,7
Valeurs maximales	4,8	6,0	7,0		
Valeurs moyennes	2,7	4,2	4,7		

Tableau 7. - Constantes spéciales pour les équations du World Catalog

Type de barrage	Constante *C* du World Catalog
b. rideaux de 18 et de 24 po	0,38
b. rideau de 47 po	0,5
b. à panneau de 36 po	0,72
b. rideau de 52 po	0,75
b. rideau de 78,5 po	1

$$T_a = 0{,}001\ 785\ C\ A\ (1{,}69\ V_a)^2$$

où : T_a = la traction due au vent, en lbf*

A = la surface projetée du barrage au-dessus de l'eau, en pi^2 (longueur du barrage • hauteur de revanche • rapport d'ouverture)

C = la constante du barrage, figurant au tableau 7.

V_a = la vitesse du vent, en nœuds

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

Enfin, la résistance à l'avancement est donnée par la relation suivante :

$$D = 2\ (T_a + T_w)$$

où : D = la résistance totale à l'avancement, en lbf*

T_a = la traction due au vent, en lbf

T_w = la traction due aux vagues, en lbf

* *Pour convertir en kilogrammes, multiplier par 0,45.*

Références

Exxon, *Oil Spill Cleanup Manual*, vol. IV, « Oil Spill Cleanup Technology: Equipment and Techniques », Exxon Production Research Company, Houston, TX, 1982.

ITOPF, *Response to Marine Oil Spills*, International Tanker Owners Pollution Federation Ltd., Londres, 1986.

NORDVIK, A.B., S.L. SLOAN, J. STAHOVEC, K. BITTING et D.F. POL, « Phase 3: Oil Containment Boom At Sea Performance Tests », *Marine Spill Response Corporation Technical Report Series* 95-003, 1995.

POTTER, S. et J. MCCOURT, *Estimation of Towing Forces on Oil Spill Containment Booms*, SL Ross Environmental Research, Ottawa. Préparé pour le Minerals Management Service, Herndon, VA, juillet 1999.

SCHULZE, R., *World Catalog of Oil Spill Response Products*, World Catalog JV, Annapolis, MD, 1999.

SCHULZE, R., *Oil Spill Response Performance Review of Booms*, annexe C, « Forces on Booms », U.S. Minerals Management Service, Herndon, VA, 2001. (Inédit)

Le Bulletin de la lutte contre les déversements a été publié pour la premiére fois en 1976. De caractère modeste, il avait pour but de permettre un échange de renseignements sur les mesures d'intervention en cas de déversements ainsi que sur d'autre sujets connexes. Le bulletin compte maintenant au-delà de 2 500 abonnés et il est diffusé dans plus de 40 pays. Nous encourageons nos lecteurs à soumettre des articles sur leurs travaux et leur opinions dans ce domaine à Dr Merv Fingas.

Dr Merv Fingas
Chef, Division des urgences - science et technologie
Centre de technologie environnementale
Environnement Canada
335, River Road
Ottawa (Ontario) K1A 0H3
Canada

Tél. : (613) 998-9622
Fax : (613) 991-9485
Courriel : fingas.merv@etc.ec.gc.ca

Distribué par :

Bureau du transfert de la technologie
Direction générale pour l'avancement des technolgies environnement
Environnement Canada
Ottawa (Ontario) K1A 0H3
Tél : (819) 953-5750
Fax : (819) 953-7253
Courriel : epspubs@ec.gc.ca

Pour nous informer d'un changement d'adresse, veuillez vous adresser cette adresse.