



SODIM

Société de développement de l'industrie maricole inc.

*Caractéristiques hydrodynamiques de
certaines composantes des filières maricoles
utilisées au Québec*

Rapport final

Dossier n° 710.78

Rapport commandité par la SODIM

Juin 2008



**CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES
DE CERTAINES COMPOSANTES
DES FILIÈRES MARICOLES
UTILISÉES AU QUÉBEC**

RAPPORT FINAL

Juin 2008



295, chemin Sainte-Foy
Québec (Québec)
Canada
G1R 1T5

Tél. : (418) 522-4945
Télec.: (418) 522-5218
Courriel : info@biorex.com
Site WEB: www.biorex.com

**CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES
DE CERTAINES COMPOSANTES
DES FILIÈRES MARICOLES
UTILISÉES AU QUÉBEC**



Référence à citer

Gagnon, M. et P. Bergeron. 2008. Caractéristiques hydrodynamiques de certaines composantes des filières maricoles utilisées au Québec. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). iii + 33 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	II
LISTE DES FIGURES	III
1. INTRODUCTION.....	1
2. MÉTHODOLOGIE.....	1
2.1. Composantes des filières testées	1
2.1.1. Sections de boudin.....	2
2.1.2. Bouées	3
2.1.3. Sacs de captage.....	6
2.2. Appareillage et déroulement des essais	7
2.3. Analyse des données	10
2.4. Validation des données	13
2.4.1. Mesures de courant.....	13
2.4.2. Mesures de force.....	13
2.5. Bases de comparaison avec la littérature	16
3. RÉSULTATS.....	17
3.1. Sections de boudin.....	17
3.1.1. Inclinaison dans le courant.....	17
3.1.2. Force horizontale.....	17
3.1.3. Force verticale	19
3.1.4. Coefficients de traînée	20
3.2. Bouées	21
3.2.1. Inclinaison dans le courant.....	21
3.2.2. Force horizontale.....	21
3.2.3. Force verticale	21
3.2.4. Coefficients de traînée	21
3.3. Sacs de captage de pétoncle	23
4. DISCUSSION.....	24
4.1. Sections de boudin et bouée cylindrique.....	24
4.1.1. Comparaison avec la littérature.....	24
4.1.2. Application à une filière complète.....	25
4.2. Bouées sphériques.....	28
4.2.1. Comparaison avec la littérature.....	28
4.2.2. Application à une filière complète.....	28
4.3. Sacs de captage	30
5. CONCLUSIONS.....	31
6. RÉFÉRENCES.....	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Caractéristiques des sections de boudin testées	2
Tableau 2.	Caractéristiques des bouées testées	4
Tableau 3.	Nombre d'essais réalisés pour chaque objet.....	10
Tableau 4.	Comparaison du poids volumique dans l'eau des boudins de Moules Forillon mesuré directement par le capteur de force 3D et calculé à partir de mesures réalisées dans l'air avec une balance à ressort.....	14
Tableau 5.	Plage du nombre de Reynolds pour les tests réalisés avec une vitesse du courant d'au moins 20 cm/s.....	16
Tableau 6.	Coefficient de traînée normal moyen pour les quatre sections de boudin testées.....	20
Tableau 7.	Coefficient de traînée normal moyen pour les cinq bouées testées.....	22
Tableau 8.	Valeurs de coefficient de traînée normal retrouvées dans la littérature pour des cylindres rigides et un nombre de Reynolds entre 3×10^4 et 3×10^5	25
Tableau 9.	Valeur du coefficient de traînée normal proposé pour le boudin de moules en fonction de l'angle d'incidence du courant.....	31
Tableau 10.	Valeurs de coefficient de traînée recommandées pour la modélisation des filières mytilicoles en conditions extrêmes.....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Photographie des quatre sections de boudin testées le 20 septembre..... 3

Figure 2. Schéma de la bouée cylindrique et des deux bouées sphériques propres et photographie des deux bouées de 16 pouces recouvertes de salissures qui ont été testées 5

Figure 3. Photographies des sacs de captage de pétoncle testés 7

Figure 4. Photographie de l'appareillage installé sur le bateau mytilicole pour les tests de traînée..... 8

Figure 5. Forces en jeu pour un cylindre suspendu à un capteur de force 2D et soumis à un courant horizontal constant..... 10

Figure 6. Relation obtenue entre les mesures du courantomètre corrigées et les données des GPS 14

Figure 7. Relation entre les observations et les calculs de l'angle d'inclinaison des objets testés. 15

Figure 8. Relation entre l'angle d'inclinaison des sections de boudin SB1 et SB3 (angle calculé) et des sections SB2 et SB4 (angle mesuré) et la vitesse du courant 18

Figure 9. Relation entre la composante horizontale de la force mesurée par le capteur de force 3D et la vitesse du courant pour les sections de boudin 18

Figure 10. Relation entre la force verticale exercée par le courant sur les sections de boudin 1 et 3 et l'inclinaison du boudin dans le courant..... 19

Figure 11. Relation entre les coefficients de traînée normal et tangentiel des sections de boudin 1 et 3 et la vitesse du courant..... 20

Figure 12. Relation entre le coefficient de traînée normal des bouées et la vitesse du courant 22

Figure 13. Relation entre les surfaces de traînée normale et tangentielle des sacs de captage et la vitesse du courant..... 23

1. INTRODUCTION

Le présent rapport a été réalisé dans le cadre du projet d'acquisition de nouvelles données et de modélisation des filières flottantes submergées entrepris à l'automne 2004 pour le compte de la Société de développement de l'industrie maricole inc. (SODIM). Ce projet a comme objectif d'optimiser la conception des filières maricoles utilisées au Québec.

La présente étude a comme objectif spécifique de déterminer les coefficients de traînée hydrodynamique de certaines composantes des filières submergées. Les résultats seront utilisés pour les modélisations hydrodynamiques des filières en conditions extrêmes réalisées dans une étape ultérieure du projet à l'aide d'un logiciel développé par l'Institut des Technologies océaniques (ITO) du Conseil national de recherche du Canada (Bergeron *et al.*, 2008).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. COMPOSANTES DES FILIÈRES TESTÉES

L'expérience avait comme objectif spécifique de déterminer les coefficients de traînée normal et tangentiel des principales composantes des filières de grossissement de moules et de captage de pétoncles sur lesquelles les courants exercent une force de traînée. Ces composantes sont le boudin de moules (pour les filières mytilicoles), les sacs de captage de pétoncle (pour les filières de captage), les bouées et les parties des lignes qui sont recouvertes d'une épaisse couche de salissures marines.

Les essais ont été réalisés dans le havre de Gaspé et non pas en bassin d'hydraulique expérimentale parce qu'il aurait été impossible de préserver la structure du boudin de moules et des salissures marines sur les bouées si ces objets avaient été retirés de l'eau et transportés sur de longues distances. Ils ont été réalisés avec des sections de boudin de moules, des sacs de captage et des bouées recueillis sur place. Selon le type de filière et le site maricole, la surface de traînée des supports d'élevage (boudin de moules ou collecteur de pétoncle) et des bouées représente entre 80 et 90 % de la surface de traînée totale des filières.

Des portions de ligne recouvertes de salissures marines n'ont pas été l'objet d'essais dans le cadre de la présente étude parce qu'il n'a pas été possible de les échantillonner sur les filières et de conserver leur structure intacte pour les essais dans le havre. Cependant, ces parties de ligne ressemblent beaucoup au boudin de moules (Bergeron et Gagnon, 2008). Conséquemment, les coefficients de traînée utilisés dans les modélisations pour ces parties de ligne seront ceux du boudin de moules.

2.1.1. Sections de boudin

Six sections de 4 m de longueur d'un boudin de moules en continu d'une filière ont été utilisées pour les essais. Chaque section correspondait à la moitié d'une grande boucle du boudin continu. Ces sections ont été prélevées en plongée sous-marine directement sur la filière sur laquelle le bateau était tracté pour les essais (filière no. 144 de Moules Forillon) et ont été installées sur l'appareil de mesure (voir la section 2.2) sans qu'elles ne soient émergées. Leur structure, dimensions et poids sont demeurés tout à fait intacts pour les essais.

Après chaque série d'essais, les sections de boudin ont été hissées à bord du bateau et ont été l'objet des mesures suivantes :

- poids total dans l'air;
- longueur de la section; et
- circonférence du boudin à intervalles de 30 cm.

La circonférence du boudin a été mesurée avec une bande de plastique semi-rigide de 10 cm de largeur avec laquelle on ceinturait avec une force raisonnable le boudin avant de lire sur la bande graduée la circonférence. Les caractéristiques des quatre sections testées le 20 septembre sont données au Tableau 1. Le boudin avait une forme cylindrique très régulière (Figure 1) et était plus âgé (27 mois), plus volumineux et plus lourd que les boudins typiques (voir Bergeron et Gagnon, 2008).

Tableau 1. Caractéristiques des sections de boudin testées.

Boucle	Section	Longueur (L) (m)	Poids dans l'air (kg)	Poids dans l'eau (kg)	Diamètre moyen (cm)	Aire normale (A _n) (m ²)	Surface mouillée (A _t) (m ²)
1	SB1	4,08	64,3	11,5	18,8	0,767	2,41
	SB2	4,10	61,2	10,7	18,1	0,742	2,33
2	SB3	4,12	69,4	14,3	20,5 ⁽¹⁾	0,845	2,65
	SB4	4,15	73,6	14,5	20,5	0,851	2,67

(1) Le boudin a dégrappé sur le pont du bateau. Diamètre estimé à 20,5 cm à partir du poids dans l'eau et de la longueur du boudin.

Les formules suivantes ont été utilisées pour calculer les sections normale et tangentielle du boudin :

$$A_n = DL \tag{1}$$

$$A_t = \pi DL \tag{2}$$

$$D = \frac{C}{\pi} \tag{3}$$

où :

A_n est la section normale du boudin (m²);

- A_t est la section tangentielle du boudin (m^2);
D est le diamètre moyen de l'enveloppe du boudin (m);
C est la circonférence moyenne de l'enveloppe du boudin (m) mesurée avec une bande de plastique de 10 cm de largeur; et
L est la longueur de la section (m).



Figure 1. Photographie des quatre sections de boudin testées le 20 septembre. A : SB1 et SB2; B : SB3 et SB4. La structure très régulière du boudin a été altérée lors de la remontée du boudin à bord du bateau après les essais.

2.1.2. Bouées

Les caractéristiques des bouées testées sont fournies au Tableau 2 et à la Figure 2. La bouée cylindrique neuve testée est représentative des bouées de compensation utilisées dans les lagunes des Îles-de-la-Madeleine. Les deux bouées sphériques usagées mais nettoyées de deux formats différents (12 pouces et 16 pouces) sont représentatives des bouées de compensation sur les filières de la Gaspésie. Enfin, les deux bouées sphériques de 16 pouces recouvertes d'une épaisse couche de salissures marines sont représentatives des bouées tendeur et de toute autre bouée qui n'est pas nettoyée au moins une fois par année.

Parce que les capteurs de force ne pouvaient pas être immergés dans l'eau, le système utilisé pour déterminer le coefficient de traînée des bouées a consisté à inverser leur flottabilité afin de pouvoir les suspendre au capteur de force sans qu'il soit nécessaire de suspendre une lourde pesée sous la bouée, ce qui aurait compliqué considérablement la conduite des tests et l'analyse des données (voir la Section 2.2). L'inversion de la flottabilité des bouées a été

Tableau 2. Caractéristiques des bouées testées.

Numéro	Type	Diamètre (D) et hauteur (H) (cm)	Poids de salissures dans l'air (kg)	Flottabilité calculée ⁽¹⁾ (kg)	Poids dans l'eau ⁽²⁾ (kg)	Section normale (A _n) (m ²)	Section tangentielle (A _t) (m ²)
BC	cylindrique	17,9 et 45	0	12,8	9,0	0,081	0,0252
BS12	sphérique	30,6	négligeable	14,5	12,8	0,074	0,074
BS16	sphérique	42,0	négligeable	35,0	28,5	0,139	0,139
BS16-S1	sphérique	46,2	7,5	33,1	20,5	0,168	0,168
BS16-S2	sphérique	49,0	13,5	31,6	20,7	0,189	0,189

(1) En assumant un rapport air/eau de 4 pour le poids des salissures.

(2) Après leur remplissage avec du sable et de l'eau.

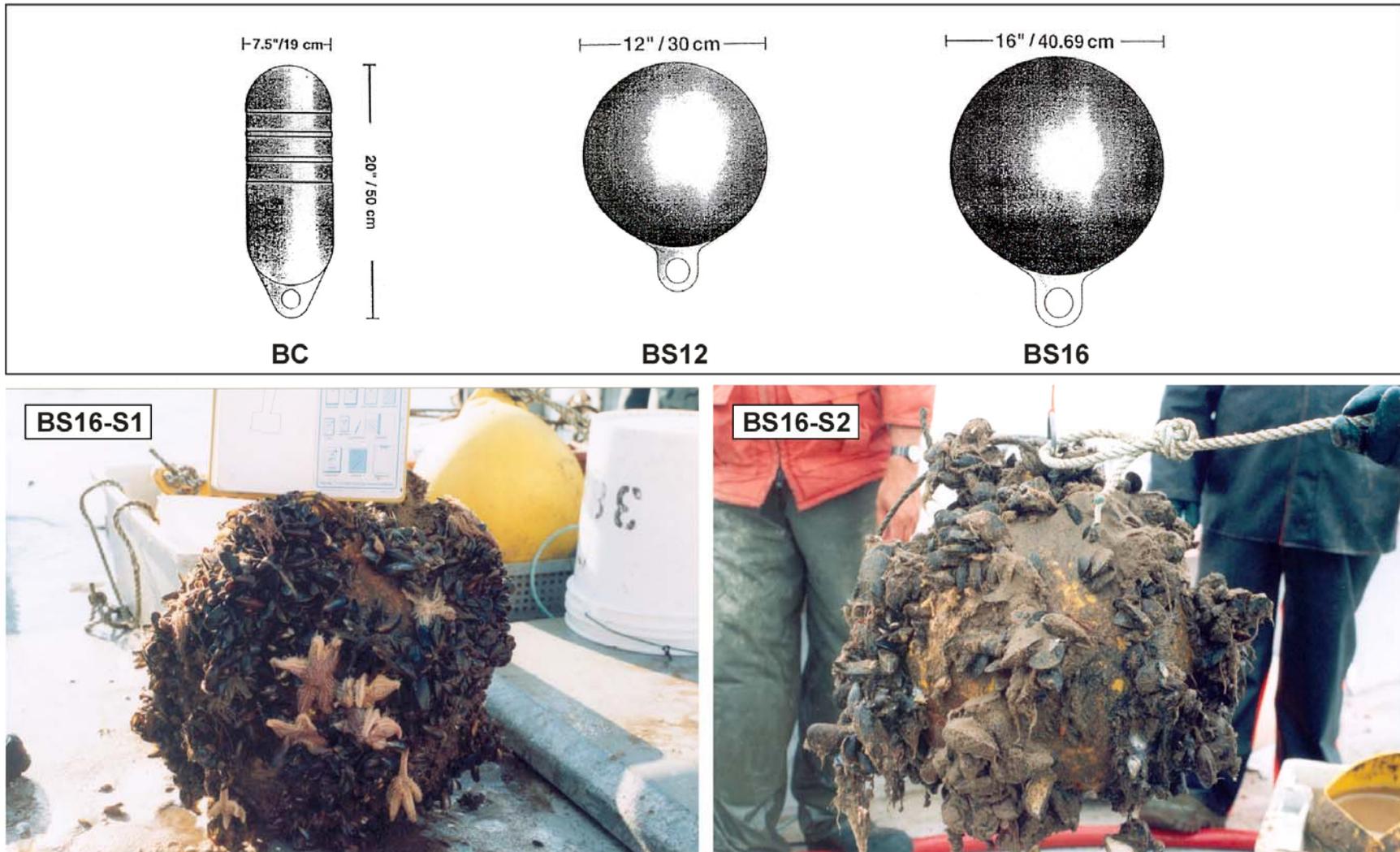


Figure 2. Schéma de la bouée cylindrique et des deux bouées sphériques propres et photographie des deux bouées de 16 pouces recouvertes de salissures qui ont été testées.

obtenue en perçant un trou près de leur anneau et en insérant à l'intérieur de la bouée une quantité de sable et d'eau suffisante pour que leur poids dans l'eau lors des essais soit du même ordre de grandeur que leur flottabilité en situation normale. La composante verticale des forces est ainsi inversée dans les calculs par rapport à la situation normale. Dans l'ensemble, le poids dans l'eau des bouées obtenu en les remplissant de sable et d'eau (Tableau 2) est légèrement inférieur à leur flottabilité avant cette opération.

Les formules suivantes ont été utilisées pour calculer la section normale des bouées sphériques:

$$A_n = A_t = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

où, pour les bouées recouvertes de salissures (sales):

$$D = \frac{C}{\pi} \quad (5)$$

Pour la bouée cylindrique, les formules suivantes ont été utilisées pour calculer A_n et A_t :

$$A_n = DH \quad (6)$$

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

où :

A_n est la section normale de la bouée (m^2);

A_t est la section tangentielle de la bouée (m^2);

D est le diamètre de la bouée (m);

C est la circonférence moyenne de l'enveloppe de la bouée sale mesurée avec une bande de plastique de 10 cm de largeur; et

H est la hauteur de la bouée cylindrique (m; excluant l'anneau).

2.1.3. Sacs de captage

Quatre sacs de captage de pétoncle provenant de la baie de Gaspé ont été fournis par Moules de Gaspé inc. pour les tests (Figure 3). Ces sacs en filet de polyéthylène avaient 80 cm de longueur et 40 cm de largeur et contenaient quatre bandes de filet en plastique Netron.

Il n'a pas été possible de monter pour les tests un objet équivalent au demi-V des filières de captage, soit 12 sacs montés deux par deux le long d'une ligne munie d'une pesée de 2,1 kg (dans l'air) à l'extrémité. De plus, les sacs fournis étaient pratiquement vides; ils sont représentatifs de ceux retrouvés sur les filières de captage au début du cycle d'élevage. Les quatre sacs ont été attachés deux par deux à une corde de polypropylène selon la technique utilisée aux Îles-de-la-Madeleine. Leur poids dans l'eau étant presque nul, une pesée de béton

rectangulaire de 7,1 litres et 17,5 kg (dans l'air) a du être ajoutée sous les sacs afin d'éviter qu'ils n'émergent sous l'effet du courant.



Figure 3. Photographies des sacs de captage de pétoncle testés.

2.2. APPAREILLAGE ET DÉROULEMENT DES ESSAIS

La Figure 4 présente l'appareillage utilisé pour l'expérience. Ce système a été installé sur le bateau mytilicole de Moules Forillon inc. Un cadre rigide en aluminium a été monté en travers du pont arrière du bateau afin de pouvoir suspendre les objets à l'étude dans l'eau du côté opposé à celui des poulies étoilées (« star wheel ») sur lesquelles reposait la ligne maîtresse

d'une filière. Les poulies étoilées ont été utilisées pour tracter le bateau le long de cette filière à différentes vitesses.

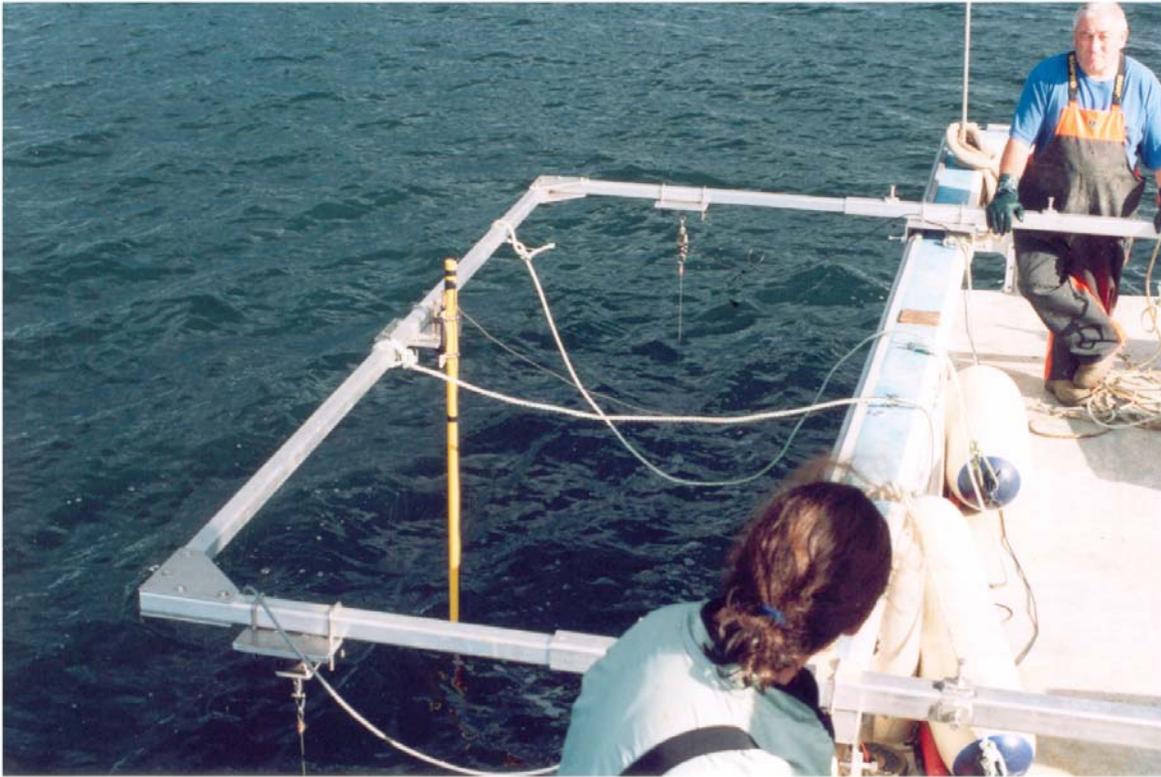


Figure 4. Photographie de l'appareillage installé sur le bateau mytilicole pour les tests de traînée. Le courantomètre est installé au bout de la tige au centre; deux sections de boudin immergées ont été attachées au capteur de force 3D (avant-plan) et au capteur de force 1D (arrière-plan). Les deux bras extensibles du cadre ne sont pas en pleine extension et le capteur 1D n'est pas dans la position qu'il occupait lors des essais.

Trois appareils de mesure ont été montés sur le cadre et ont été reliés à une console d'enregistrement, soit un capteur de force 3D, un courantomètre et un capteur de force 1D. Les trois appareils étaient situés à 1,8 m l'un de l'autre dans l'axe longitudinal du bateau. Dans l'axe transversal au bateau, le capteur 3D était situé à 0,2 m du courantomètre et le capteur 1D était situé à 1,2 m du courantomètre.

Le capteur 3D est un bloc de force à trois composantes, longitudinale (F_x), latérale (F_y) et verticale (F_z), sur lequel les objets à l'étude ont été suspendus. Le capteur 1D est un capteur de tension (une seule composante) qui devait servir à valider les données du capteur 3D. Cependant, il n'a pas fonctionné correctement durant l'expérience. Le courantomètre utilisé est un compteur de tours à hélice électronique préalablement calibré. L'hélice a été immergée à

2,25 m sous la surface de l'eau, soit à la profondeur des bouées et de la partie centrale des sections de boudin inclinées dans des courants de 30 à 50 cm/s.

En plus des mesures électroniques de force et de vitesse du courant, un rapporteur d'angle a été utilisé pour mesurer l'angle entre la ligne sur laquelle était suspendu l'objet à l'étude et la verticale. Cette mesure a été utilisée pour valider l'angle calculé à partir des mesures de force. De plus, la vitesse du bateau par rapport au fond a été mesurée à l'aide de deux GPS (Raytheon NAV 398 et Garmin eTrex Vista). Les deux appareils ont donné des résultats identiques. Ces derniers ont été utilisés pour valider les données du courantomètre.

Les essais ont été réalisés les 19 et 20 septembre 2005 dans un des parcs maricoles de Moules Forillon inc., dans le havre de Gaspé. Les résultats présentés dans ce rapport ont tous été obtenus le deuxième jour alors que les conditions étaient idéales pour la conduite de tels essais. En effet, pendant ces essais, le vent et la mer étaient très calmes.

Pour les sections de boudin, chaque série d'essais a été réalisée avec une première section de boudin suspendue au capteur de force 3D et une deuxième suspendue au capteur de force 1D. La vitesse maximale du courant à laquelle les sections de boudin ont été soumises s'élève à 57 cm/s.

Dans le cas des bouées et des sacs de captage, chaque objet a été suspendu au capteur 3D alors que le capteur 1D ne supportait aucun objet. La vitesse maximale du courant à laquelle les bouées ont été soumises s'élève à 88 cm/s. Dans le cas des sacs de captage, une première série d'essais a été réalisée avec les sacs lestés et une deuxième série, avec la pesée seule. La vitesse maximale du courant pour ces essais a été de 81 cm/s.

Chaque série d'essais a consisté à soumettre l'objet à des courants de plus en plus rapides en tractant le bateau le long de la ligne maîtresse avec les poulies étoilées. Chaque série d'essais s'est déroulée comme décrit ci-dessous.

- 1) L'objet était attaché à l'aide d'un mince fil de métal au capteur de force 3D et était immergé verticalement sous le capteur de façon à ce que son centre de gravité se situe entre 2 et 2,5 m sous la surface de l'eau à une vitesse de 30 à 50 cm/s.
- 2) Au début et à la fin de chaque série d'essais, les forces étaient enregistrées pendant environ trois minutes alors que le bateau était à l'arrêt sur la ligne maîtresse (vitesse de l'eau par rapport à l'objet pas nécessairement nulle).
- 3) La vitesse du courant agissant sur l'objet était augmentée par palier de vitesse constante d'environ trois minutes chacun. Ainsi, chaque série comprenait 2-3 paliers de vitesse (essais) le long du parcours aller le long de la ligne maîtresse et autant d'essais le long du parcours de retour jusqu'au point de départ sur cette ligne.
- 4) Pour certains objets, le parcours aller-retour le long de la ligne maîtresse a été répété deux ou trois fois pour augmenter le nombre d'essais.

Le Tableau 3 présente le nombre d'essais réalisés pour chaque objet.

Tableau 3. Nombre d'essais réalisés le 20 septembre pour chaque objet.

Objet	Nombre d'essais
Boudins SB1-SB2	11
Boudins SB3-SB4	16
Bouée BC	9
Bouée BS12	7
Bouée BS16	7
Bouée BS16-S1	7
Bouée BS16-S2	13
Sacs de captage lestés	10
Pesée	7

2.3. ANALYSE DES DONNÉES

La Figure 5 schématise les forces en jeu pour un cylindre immergé suspendu à un capteur de force et soumis à un courant horizontal constant.

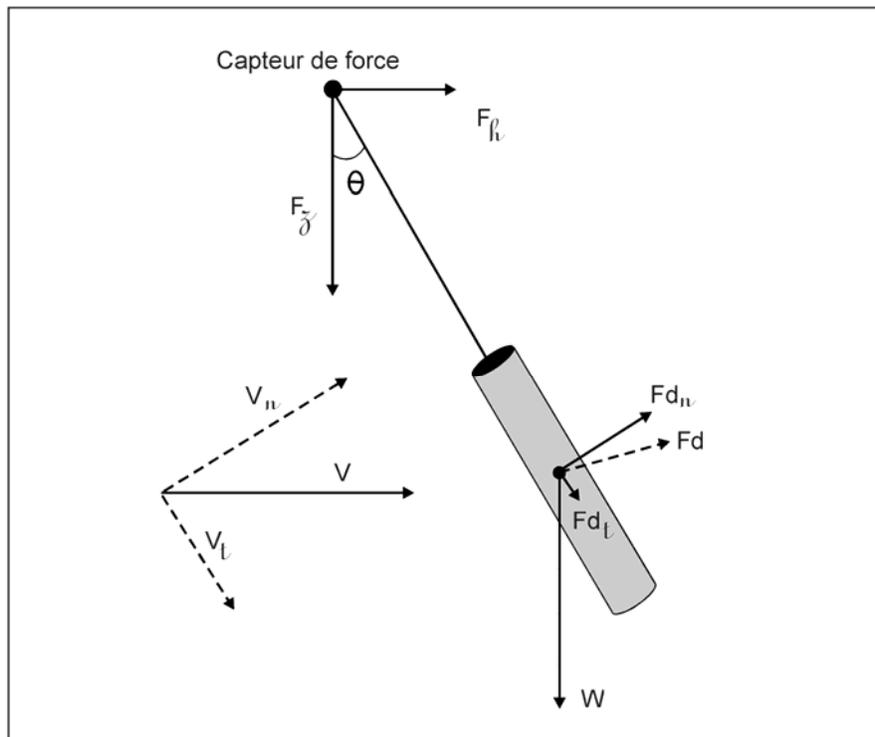


Figure 5. Forces en jeu pour un cylindre suspendu à un capteur de force 2D et soumis à un courant horizontal (V) constant.

Le coefficient de traînée normal (Cd_n) d'un objet complètement immergé dans l'eau est une constante qui établit la relation entre, d'une part, la force exercée par un courant normal (perpendiculaire à l'axe principal de l'objet) sur cet objet et, d'autre part, la vitesse de ce courant. Ce coefficient peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$Cd_n = \frac{Fd_n}{0,5\sigma A_n V_n^2} \quad (8)$$

où :

Cd_n est le coefficient de traînée normal de l'objet;

Fd_n est la composante normale de la force de traînée (Newton) exercée sur l'objet par le courant;

σ est la densité de l'eau (1 025 kg/m³);

A_n est la section de l'objet dans son axe longitudinal (m²); et

V_n est la vitesse (m/s) de la composante normale du courant.

Le coefficient de traînée tangentiel (Cd_t) d'un objet complètement immergé dans l'eau est une constante qui établit la relation entre, d'une part, la force exercée par un courant longitudinal (parallèle à l'axe principal de l'objet) sur cet objet et, d'autre part, la vitesse de ce courant. Le Cd_t peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$Cd_t = \frac{Fd_t}{0,5\sigma A_t V_t^2} \quad (9)$$

où :

Cd_t est le coefficient de traînée tangentiel de l'objet;

Fd_t est la composante tangentielle de la force de traînée (Newton) exercée sur l'objet par le courant;

σ est la densité de l'eau (1 025 kg/m³);

A_t est, pour un objet compact (bouées), la section de l'objet dans son axe transversal et, pour un objet longiligne (boudin de moules, lignes), la surface mouillée de l'objet (m²); et

V_t est la vitesse de la composante longitudinale du courant (m/s).

Pour un objet parfaitement sphérique, le coefficient de traînée tangentiel est égal au coefficient de traînée normal ($Cd_n = Cd_t$). Pour un objet cylindrique longiligne, le Cd_t correspond au coefficient de friction de l'objet et est beaucoup moins grand que le Cd_n .

Pour chacun des essais, les données du courantomètre ont été traitées pour calculer la vitesse moyenne du courant (V).

Pour chacun des essais avec les boudins SB1 et SB3, les enregistrements bruts de force ont été traités afin de calculer la moyenne des composantes longitudinale (F_x), latérale (F_y) et verticale (F_z) de la force. Le zéro de chacune des composantes de force ($F_{x(0)}$, $F_{y(0)}$ et $F_{z(0)}$)

pour chaque objet a été déterminé par extrapolation à l'origine de la relation entre la composante de force et la vitesse du courant. Les valeurs moyennes pour les trois composantes de force ont ensuite été corrigées en fonction de ces zéros.

Les variables utilisées dans les Équations 8 et 9 ont été calculées à partir des équations suivantes :

$$V_n = V \cos \theta \quad (10)$$

$$V_t = V \sin \theta \quad (11)$$

$$Fd_n = W \sin \theta \quad (12)$$

$$Fd_t = \frac{F_h}{\sin \theta} - W \cos \theta \quad (13)$$

$$F_h = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2)} \quad (14)$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{F_h}{F_z} \quad (15)$$

où :

F_h est la composante horizontale de la force (N);

θ est l'angle (degrés) de la force résultante par rapport à la verticale (angle d'inclinaison par rapport à la verticale de l'axe principal de l'objet); et

W est le poids de l'objet dans l'eau (N).

Pour chacun des essais avec les sections de boudin SB2 et SB4, l'angle θ mesuré avec le rapporteur d'angle a été utilisé pour calculer le Cd_n de ces objets en utilisant l'équation suivante :

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{\alpha^2 + 4} - \alpha}{2} \right) \quad (16)$$

où :

$$\alpha = \frac{W}{0,5\sigma A_n C d_n V^2} \quad (17)$$

La force verticale exercée par le courant sur l'objet ($F_z - W$) est nulle lorsque l'angle d'inclinaison de l'objet est nul et lorsqu'il est égal à :

$$\theta_{(0)} = \text{Tan}^{-1} \frac{C_{d_n} A_n}{C_{d_t} A_t} \quad (18)$$

Lorsque l'inclinaison de l'objet est inférieure à $\theta_{(0)}$, la composante verticale de la force de traînée ($F_z - W$) est négative (i.e. dirigée vers la surface de l'eau) et, lorsque l'inclinaison est supérieure à $\theta_{(0)}$, elle est dirigée vers le bas. Pour un objet parfaitement sphérique, $\theta_{(0)}$ est égal à 45° . Pour les objets cylindriques, $\theta_{(0)}$ est plus grand que 45° .

Dans le cas des sacs de captage, les forces enregistrées pour les essais réalisés avec la pesée seule ont été soustraites des forces enregistrées pour la même vitesse de courant avec les sacs lestés afin d'estimer les forces attribuables aux sacs seuls. Parce que les sacs testés ont été progressivement déformés avec l'augmentation de la vitesse du courant (A_n et A_t n'étaient pas constants), les surfaces de traînée ($C_{d_n} A_n$ et $C_{d_t} A_t$) plutôt que les coefficients de traînée ont été calculés.

2.4. VALIDATION DES DONNÉES

2.4.1. Mesures de courant

Une analyse préliminaire a montré que le courantomètre a légèrement sous-estimé la vitesse du courant. Les valeurs du courantomètre ont donc été multipliées par 1,07 pour rectifier ce biais. La Figure 6 met en relation la vitesse du courant corrigée (courantomètre) et la vitesse du bateau (GPS). Les relations obtenues dans cette figure sont tout à fait cohérentes. Selon la direction vers laquelle le bateau était tracté (vers l'amont ou l'aval) et la phase de la marée (flot, étale ou jusant), la vitesse du courant mesurée par le courantomètre a été plus élevée ou plus faible que la vitesse du bateau ou encore similaire (étale).

2.4.2. Mesures de force

Le Tableau 4 compare le poids volumique du boudin de moules calculé à partir du poids dans l'eau mesuré avec le capteur de force 3D en 2005 pour trois des sections testées et celui calculé à partir du poids dans l'air mesuré en 2004 avec une balance à ressort calibrée pour quatre autres sections. Le poids volumique obtenu avec les deux types de mesure est similaire ce qui indique que les mesures de force du capteur 3D ont une valeur absolue fiable.

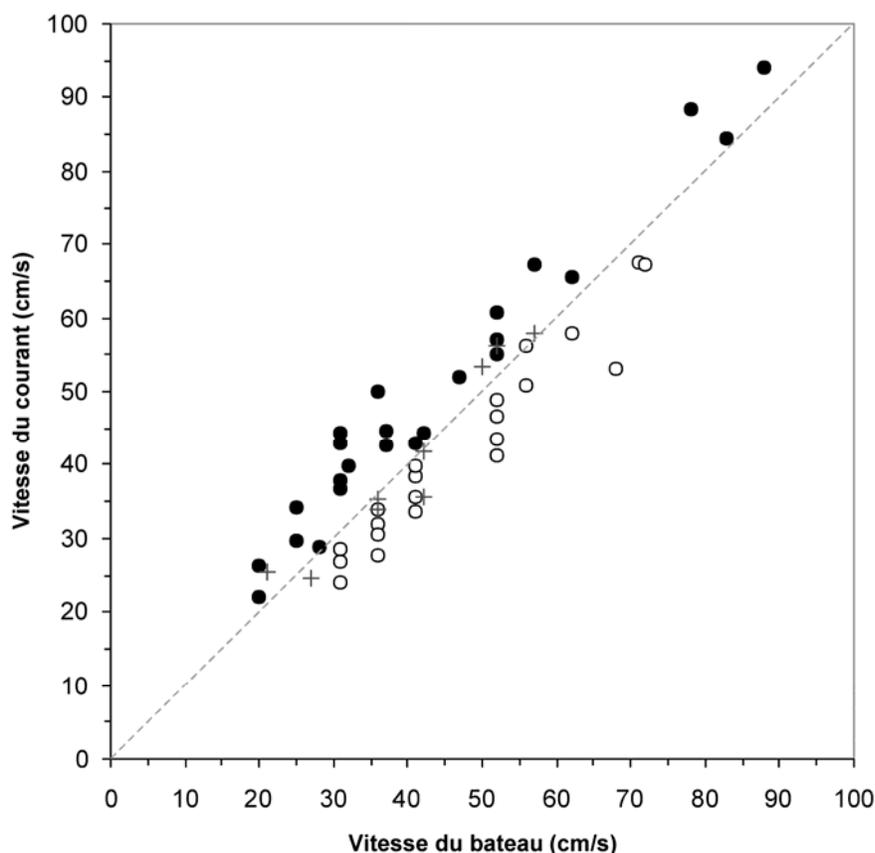


Figure 6. Relation obtenue entre les mesures du courantomètre corrigées (vitesse du courant par rapport aux objets testés) et les données des GPS (vitesse du bateau par rapport au fond). Les points pleins correspondent aux essais réalisés en tractant le bateau contre le courant de marée. Les points vides correspondent aux essais réalisés en tractant le bateau dans la même direction que le courant de marée. Enfin, les croix sont pour les essais réalisés durant l'étalement de marée.

Tableau 4. Comparaison du poids volumique dans l'eau des boudins de Moules Forillon mesuré directement par le capteur de force 3D et calculé à partir de mesures réalisées dans l'air avec une balance à ressort.

Section de boudin	Volume du boudin (m ³)	Poids dans l'eau mesuré (kg)	Poids dans l'eau calculé ⁽¹⁾ (kg)	Poids volumique kg/m ³
2005-SB1	0,113	11,5	-	101,7
2005-SB4	0,137	14,5	-	105,8
2004-209-1	0,202	-	21,8	107,9
2004-209-2	0,173	-	19,6	113,3
2004-147-1	0,172	-	16,2	94,2
2004-147-2	0,173	-	16,4	94,8

(1) En assumant un rapport air/eau de 5,45.

La comparaison des angles mesurés avec le rapporteur d'angle avec ceux calculés avec l'Équation 15 pour chaque essai permet d'évaluer la cohérence des mesures réalisées avec le capteur de force 3D. La Figure 7 présente la relation obtenue entre ces deux variables pour l'ensemble des essais. Pour tous les essais, l'angle calculé à partir des mesures de force est à peu près le même que celui mesuré avec le rapporteur d'angle. Compte tenu que les mesures réalisées avec le rapporteur d'angle étaient imprécises, le résultat montre que les mesures des trois composantes de force par le capteur 3D sont dans l'ensemble tout à fait cohérentes.

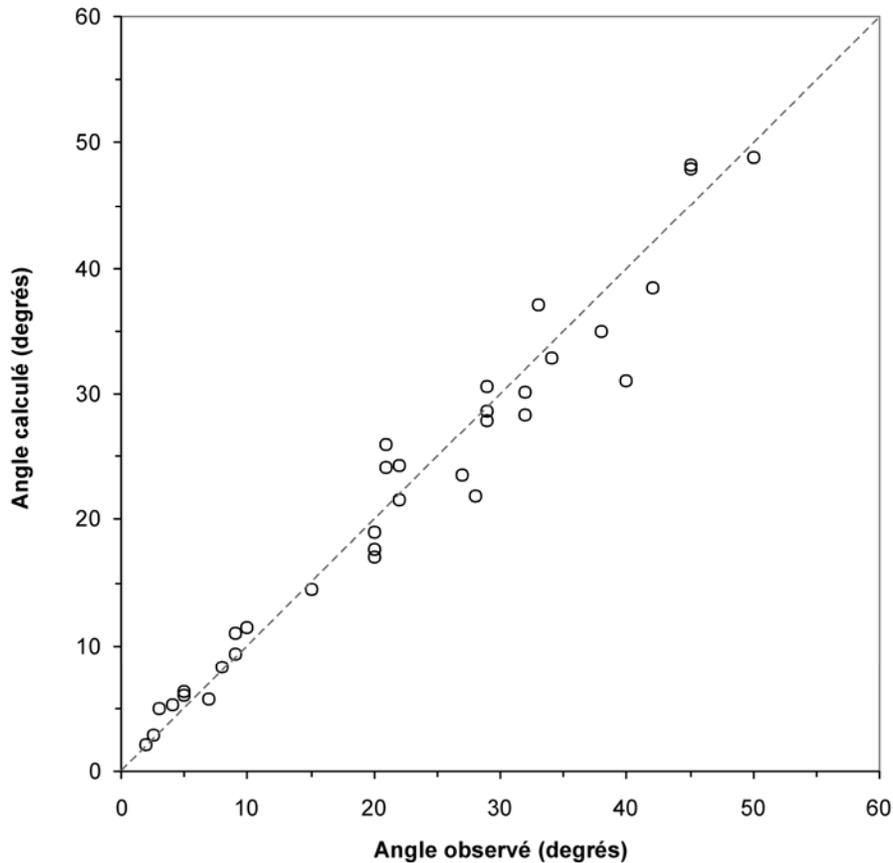


Figure 7. Relation entre les observations et les calculs de l'angle d'inclinaison des objets testés.

Par ailleurs, la précision du calcul du coefficient de traînée tangentiel est très sensible à l'angle de l'objet par rapport à la verticale. Plus cet angle est faible, plus les valeurs du coefficient tangentiel dépendent de la précision du zéro des forces, notamment de la mesure du poids de l'objet. La valeur du C_{d_n} est elle aussi très sensible à la précision du zéro des forces F_x et F_y pour les faibles vitesses de courant. Pour ces raisons, les essais qui ont été retenus pour la présentation des résultats ci-dessous sont ceux pour lesquels la vitesse du courant était supérieure à 20 cm/s. De plus, les résultats pour le coefficient de traînée tangentiel ne sont présentés que pour les essais pour lesquels l'inclinaison de l'objet excédait 20°.

2.5. BASES DE COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE

Une revue de la littérature a été réalisée afin de comparer les valeurs de coefficient obtenues dans cette étude avec celles obtenues pour des objets similaires. Pour permettre une comparaison valable, il faut que les valeurs comparées aient été obtenues dans des régimes d'écoulement similaires. À cette fin, on utilise un indice qui tient compte de trois des principaux facteurs qui déterminent le régime d'écoulement, soit le diamètre de l'objet, la vitesse d'écoulement et la viscosité du fluide. Cet indice s'appelle le nombre de Reynolds (Re) et est obtenu avec l'équation suivante :

$$Re = \frac{DV}{Q} \quad (19)$$

où :

- D est le diamètre des objets (m);
- V est la vitesse du courant (m/s); et
- Q est la viscosité cinétique de l'eau (= $1,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Le Tableau 5 présente les plages du nombre de Reynolds pour les tests réalisés dans le cadre de cette étude avec une vitesse du courant d'au moins 20 cm/s.

Tableau 5. Plage du nombre de Reynolds pour les tests réalisés avec une vitesse du courant d'au moins 20 cm/s.

Composante	Nombre de Reynolds
Boudin de moules	3×10^4 à 1×10^5
Bouées	3×10^4 à 5×10^5
Sacs de captage	indéterminé

Dans le cas des sections de boudin et des bouées sales, il faut aussi tenir compte de la façon avec laquelle le diamètre de ces objets a été mesuré pour comparer les résultats des essais avec la littérature. En effet, la valeur de Cd obtenue dépend de la définition du diamètre des objets sphériques et cylindriques. Habituellement, les valeurs de Cd citées dans la littérature sont pour une définition du diamètre correspondant à la suivante :

$$D_e = D_l + E_s \quad (20)$$

où :

- D_e est le diamètre effectif de l'objet;
- D_l est le diamètre de l'objet sans rugosité; et
- E_s est la hauteur moyenne des rugosités.

Le diamètre effectif du boudin de moules et des bouées sales n'a pas été calculé avec l'Équation 20 parce que D_l et E_s sont inconnus pour le boudin et E_s est difficile à mesurer pour les bouées sales. Dans le cas du boudin, Plew (2005) a déterminé D_e en mesurant par

planimétrie la surface de l'ombre projetée des sections de boudin et en divisant cette aire par la longueur des sections. Une telle approche n'a pas été possible dans le cadre de cette étude.

Dans la présente étude, le diamètre (D) des boudins et des bouées sales correspond à la circonférence moyenne de l'enveloppe des objets (mesurée avec un bande de plastique de 10 cm de largeur) divisé par π (Équations 3 et 5). Selon cette définition, D est plus grand que D_e . Donc, pour un même objet, le C_d calculé en utilisant le diamètre tel que mesuré dans la présente étude sera plus petit que la valeur obtenue en utilisant D_e .

3. RÉSULTATS

3.1. SECTIONS DE BOUDIN

3.1.1. Inclinaison dans le courant

La Figure 8 présente la relation entre l'angle des quatre sections de boudin par rapport à la verticale (angle calculé pour SB1 et SB3 et angle observé pour SB2 et SB4) et la vitesse du courant. La relation obtenue pour les quatre sections de boudin suit la courbe sigmoïde théorique établie avec l'Équation 16 pour un boudin qui a les dimensions et le poids moyens des quatre sections et des C_{d_n} et C_{d_t} constants de 1,35 et 0,1, respectivement. Selon cette courbe théorique, le boudin atteint un angle de 45° dans un courant de 58 cm/s.

3.1.2. Force horizontale

La force horizontale F_h mesurée par le capteur de force est celle qui, sur une filière complète, sera transmise intégralement aux ancres. Elle est donc déterminante pour évaluer la résistance de ces derniers. La Figure 9 présente la relation entre la force horizontale (F_h) et la vitesse du courant pour les sections de boudin 1 et 3. La relation obtenue est similaire pour les deux sections et elle suit la courbe théorique établie pour un boudin qui a les dimensions et le poids moyens des deux sections et un C_{d_n} et C_{d_t} constants de 1,35 et 0,1, respectivement. Entre 20 et 60 cm/s, la force horizontale est pratiquement proportionnelle à la vitesse du courant et non pas au carré de cette vitesse. Cela est surtout attribuable au fait que la section du boudin qui fait face au courant diminue avec l'augmentation du courant.

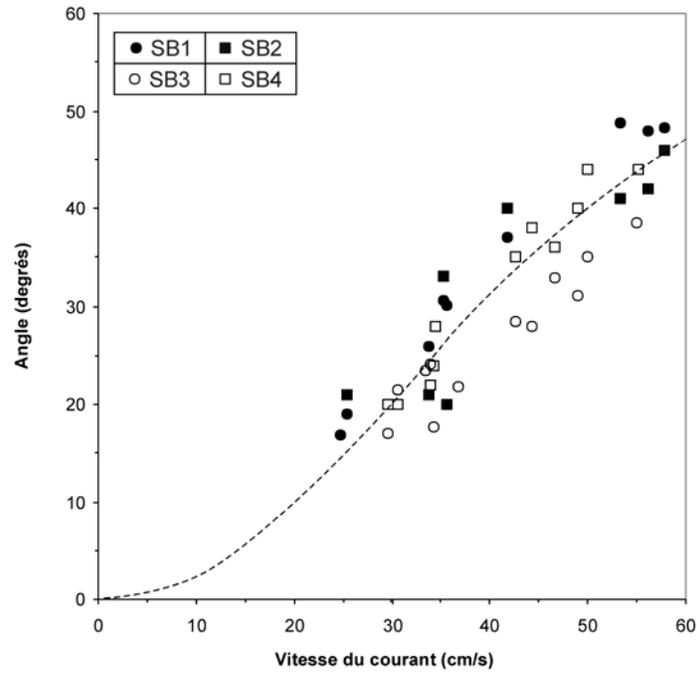


Figure 8. Relation entre l'angle d'inclinaison des sections de boudin SB1 et SB3 (angle calculé) et des sections SB2 et SB4 (angle mesuré) et la vitesse du courant.

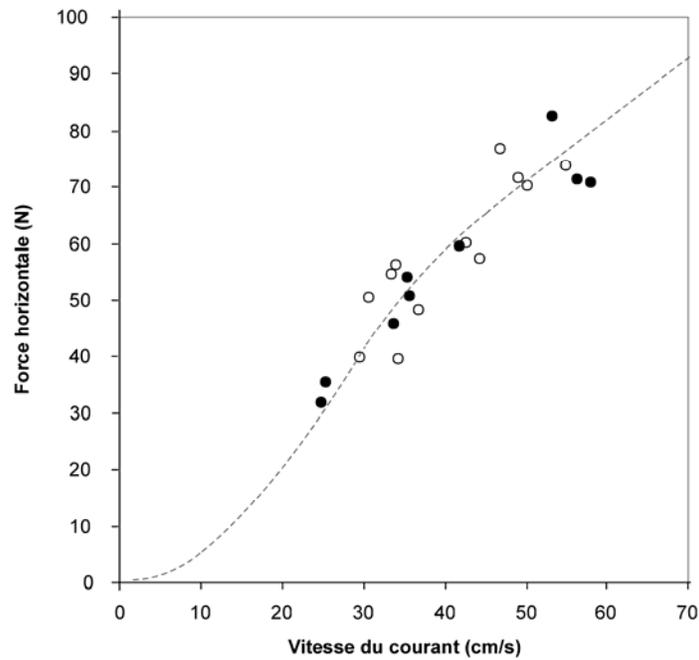


Figure 9. Relation entre la composante horizontale de la force mesurée par le capteur de force 3D et la vitesse du courant pour les sections de boudin. Points pleins : SB1; points vides : SB3.

3.1.3. Force verticale

La Figure 10 présente la relation entre la force verticale exercée par le courant (F_z-W) sur les sections de boudin 1 et 3 et l'angle d'inclinaison des boudins. La relation obtenue est similaire pour les deux sections. Par contre, la relation obtenue lorsque le boudin de moules était incliné vers le courantomètre (amont) est différente de celle obtenue lorsque le boudin de moules était incliné vers l'avant du bateau (aval). Dans la première situation, les points sont situés au-dessus de la courbe théorique établie pour un boudin qui a les dimensions et le poids moyens des deux sections et des Cd_n et Cd_t constants de 1,35 et 0,1, respectivement. Dans la deuxième situation, les points suivent de près cette courbe. La raison pour cette différence est probablement qu'il y a eu une interaction entre le boudin et le courantomètre lorsque les deux étaient rapprochés. Pour cette raison, les essais au cours desquels l'objet (boudin, bouée, sacs de captage) était incliné de plus de 10° vers le courantomètre n'ont pas été retenus pour la suite des analyses.

Selon la courbe théorique, la force verticale exercée par un courant de 50 cm/s sur le boudin équivaut à une diminution du poids du boudin de 32,5 %.

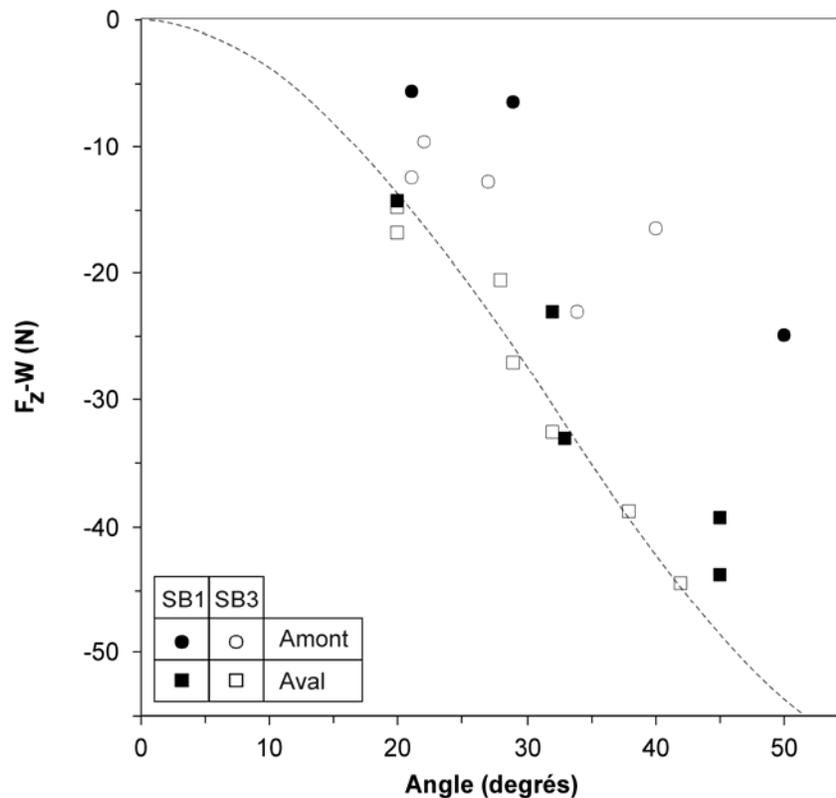


Figure 10. Relation entre la force verticale (négative lorsque dirigée vers le haut) exercée par le courant sur les sections de boudin 1 et 3 et l'inclinaison du boudin dans le courant.

3.1.4. Coefficients de traînée

La Figure 11 présente la relation obtenue entre les coefficients de traînée normal et tangentielle des sections SB1 et SB3 et la vitesse des courants. Par ailleurs, le Tableau 6 présente le Cd_n moyen des sections SB1 et SB3 calculé à partir des forces mesurées (Équations 8 à 15) et des sections SB2 et SB4 calculé à partir des angles mesurés (Équation 16).

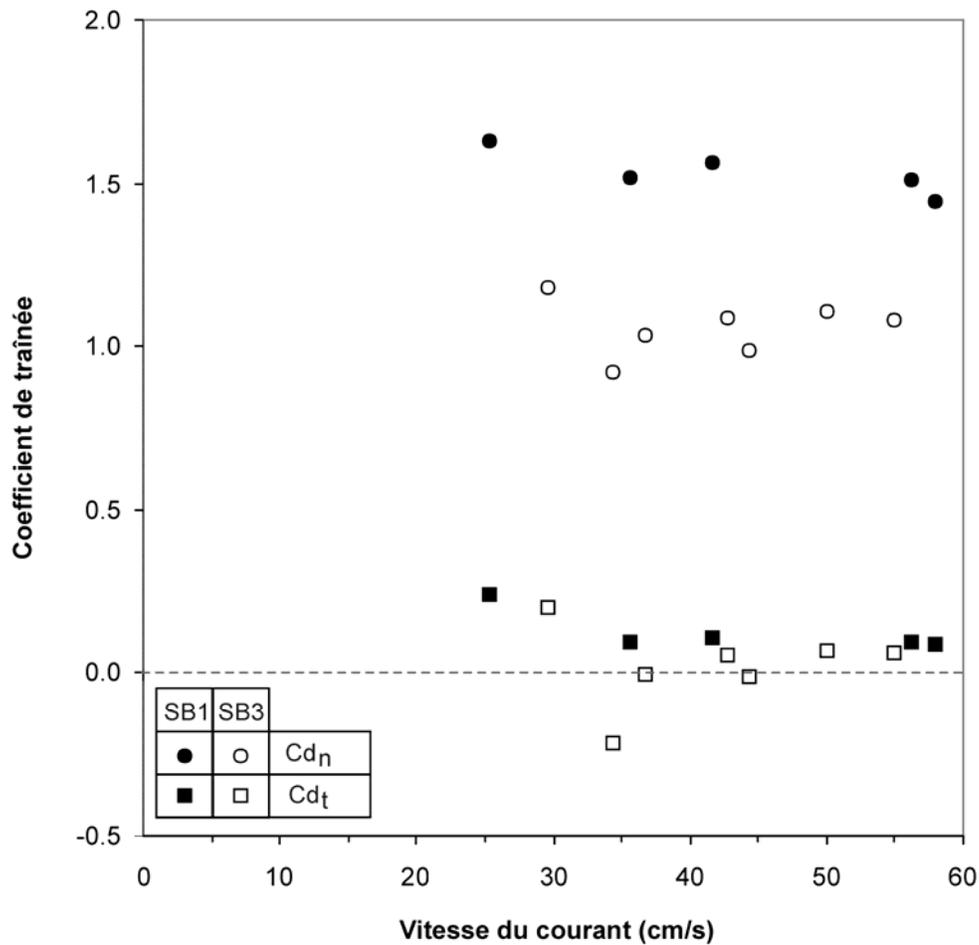


Figure 11. Relation entre les coefficients de traînée normal et tangentielle des sections de boudin 1 et 3 et la vitesse du courant.

Tableau 6. Coefficient de traînée normal moyen pour les quatre sections de boudin testées.

Section	Cd_n
SB1	1,53
SB2	1,33
SB3	1,06
SB4	1,50
Moyenne	1,36

Dans l'ensemble, le C_{d_n} des sections SB1 et SB3 varie peu en fonction de la vitesse du courant pour des vitesses entre 20 et 60 cm/s (Figure 11). Le C_{d_n} moyen de la section SB1 (1,5) est plus élevé que celui de la section SB3 (1,1). La valeur moyenne obtenue pour les sections SB2 (1,3) et SB4 (1,5) à partir de l'Équation 16 est similaire à celle obtenue pour la section SB1 (1,5). Ce résultat indique que le coefficient de traînée normal du boudin de moules varie significativement le long du boudin en continu. La valeur moyenne obtenue pour les quatre sections est 1,36.

Par ailleurs, le coefficient de traînée tangentiel des deux sections (Figure 11) converge vers 0,1 avec l'augmentation de la vitesse du courant. Cette convergence serait attribuable à la diminution de l'erreur de calcul du coefficient tangentiel avec l'augmentation de l'angle du boudin plutôt qu'un véritable changement des caractéristiques hydrodynamiques.

3.2. BOUÉES

3.2.1. Inclinaison dans le courant

Les bouées sont beaucoup moins inclinées par le courant que les sections de boudin de moules. Par exemple, les bouées sphériques propres ont atteint un angle de seulement 3° dans un courant de 50 cm/s. Cette faible inclinaison est surtout attribuable au fait que le poids volumique (kg/m^3) des bouées (i.e. leur flottabilité par unité de volume en situation normale) était beaucoup plus élevé que celui du boudin. Ainsi, la force de traînée sur les bouées est relativement faible par rapport à leur poids. L'angle atteint par les bouées en situation normale aurait été encore plus petit parce que leur poids lors des essais était significativement plus petit que leur flottabilité en situation normale (Tableau 2).

3.2.2. Force horizontale

Contrairement au boudin de moules, la force horizontale que le courant exerce sur les bouées est proportionnelle au carré de la vitesse du courant. Cela est attribuable au fait que la section des bouées face au courant demeure à peu près la même quelle que soit la vitesse du courant.

3.2.3. Force verticale

Dans l'ensemble, le courant n'exerce pas une force verticale importante sur les bouées en raison de leur forme et de leur faible inclinaison dans le courant.

3.2.4. Coefficients de traînée

Le coefficient de traînée normal de la bouée cylindrique varie très peu avec la vitesse du courant (Figure 12). Le coefficient moyen (1,1) est moins élevé que celui des sections de boudin. Les valeurs obtenues pour les deux bouées sphériques propres diminuent rapidement avec l'augmentation de la vitesse du courant alors que celles des bouées sphériques sales sont plutôt constantes. La bouée de 12 pouces propre a un coefficient plus élevé que celui de la

bouée de 16 pouces. Celui des deux bouées sphériques de 16 pouces couvertes de salissures est près de deux fois celui de la bouée propre du même modèle et leur C_d se situent entre 1,15 et 1,3 (Tableau 7).

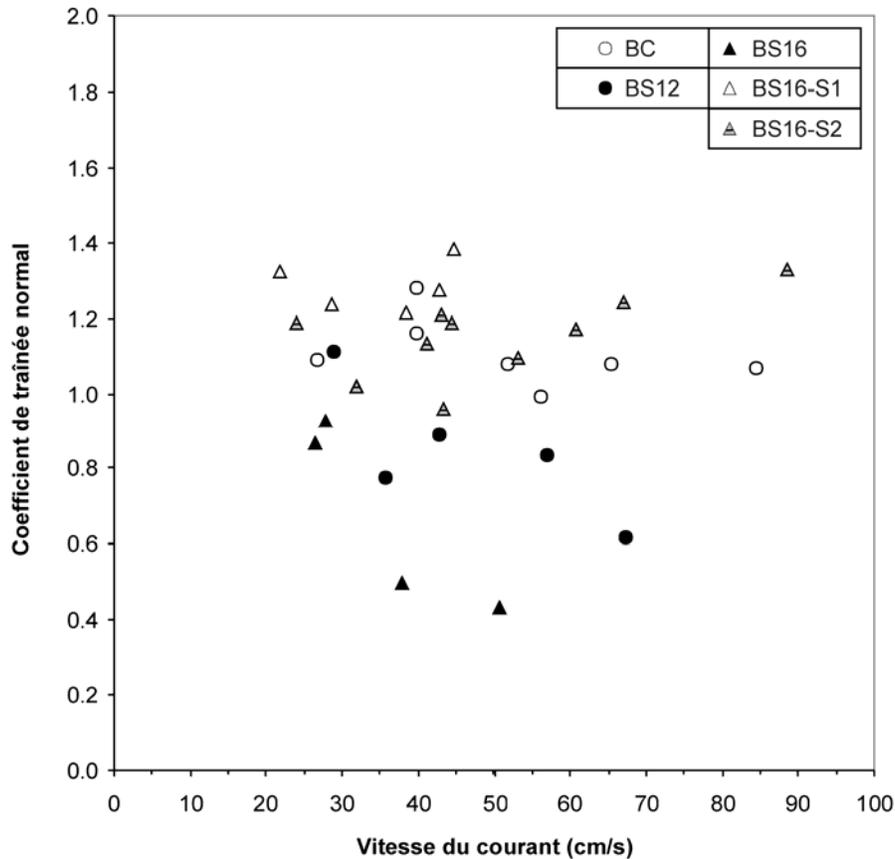


Figure 12. Relation entre le coefficient de traînée normal des bouées et la vitesse du courant.

Tableau 7. Coefficient de traînée normal moyen pour les cinq bouées testées.

Bouée	C_{d_n}
BC	1,10
BS12	0,85
BS16	0,68
BS16-S1	1,29
BS16-S2	1,15

L'angle d'inclinaison des bouées lors des tests a été insuffisant pour que des valeurs fiables du coefficient de traînée tangentiel puissent être calculées, sauf pour un essai réalisé avec la bouée BS16-S2. Pour cette bouée, le C_{d_t} obtenu est 1,31, soit une valeur égale au C_{d_n} (1,33) obtenu pour cet essai.

3.3. SACS DE CAPTAGE DE PÉTONCLE

Les quatre sacs de captage de pétoncle lestés avec la pesée ont atteint un angle de 45° lorsque soumis à un courant d'environ 55 cm/s. La Figure 13 présente la relation entre les surfaces de traînée normale (CdA_n) et tangentielle (CdA_t) des sacs de captage (sans pesée) et la vitesse du courant. La surface de traînée normale varie peu avec l'augmentation de la vitesse du courant et se situe autour de $0,8 \text{ m}^2$ ($0,2 \text{ m}^2$ par sac) alors que la surface de traînée tangentielle converge vers $0,4 \text{ m}^2$ ($0,1 \text{ m}^2$ par sac) pour des vitesses élevées. Des résultats presque identiques (CdA_n et CdA_t un peu plus petits) ont été obtenus lorsque le poids de la pesée et la force de traînée sur elle n'étaient pas soustraits des forces mesurées pour les sacs lestés (non présenté). Cela est attribuable au fait que la surface des sacs de captage normale au courant était beaucoup plus grande que celle de la pesée.

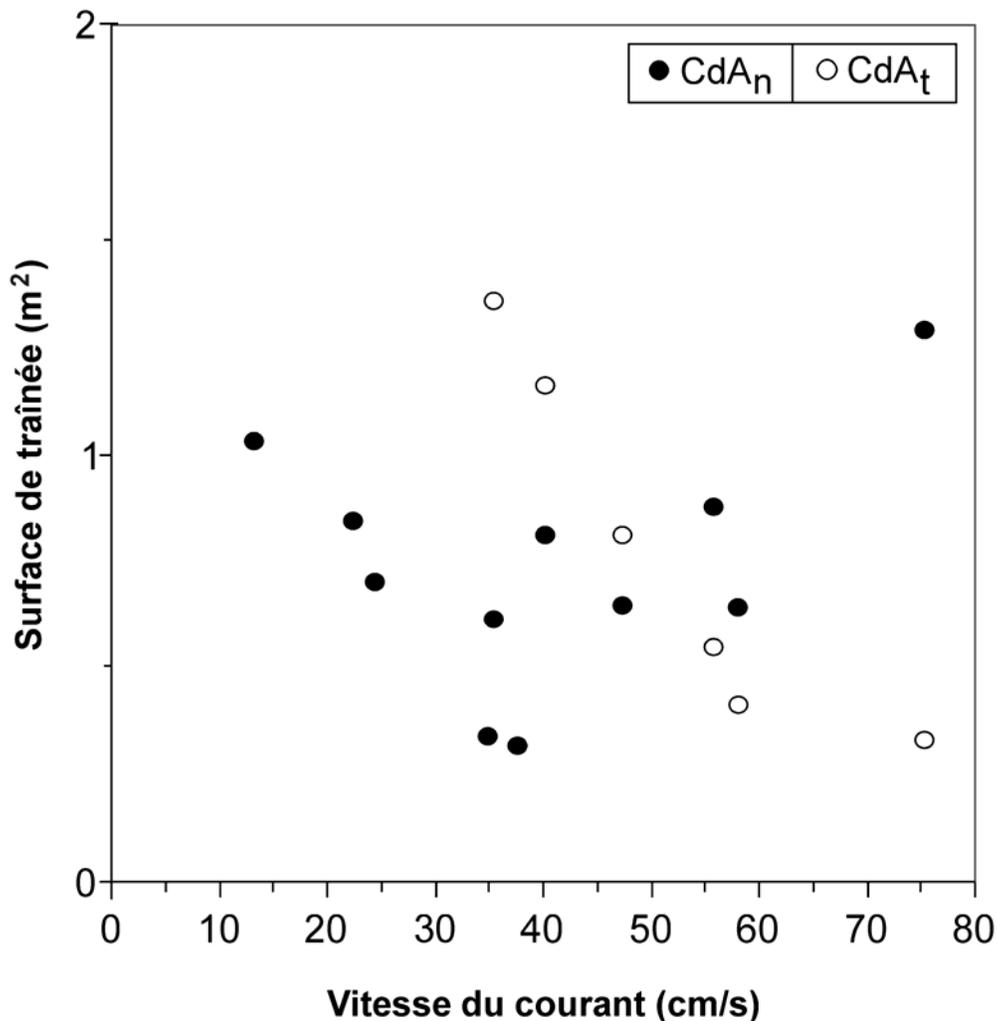


Figure 13. Relation entre les surfaces de traînée normale et tangentielle (CdA_n et CdA_t) des sacs de captage et la vitesse du courant.

4. DISCUSSION

4.1. SECTIONS DE BOUDIN ET BOUÉE CYLINDRIQUE

4.1.1. Comparaison avec la littérature

Il existe une abondante littérature sur le coefficient de traînée des cylindres rigides et, cela, particulièrement pour la modélisation des plate-formes de forage pétrolières et des mouillages océanographiques. Les observations réalisées dans le havre de Gaspé montrent que les sections de boudin de moules peuvent être modélisées comme s'il s'agissait de cylindres rigides. En effet, bien que les sections de boudin s'inclinent dans le courant, elles n'ont pas courbé et sont demeurées rectilignes. De plus, les forces mesurées sont conformes aux forces théoriques calculées pour un cylindre rigide dont les coefficients de traînée ne varient pas en fonction de la vitesse du courant pour des vitesses entre 20 et 60 cm/s. Par ailleurs, la bouée cylindrique testée peut, elle aussi, être modélisée par un cylindre rigide.

Toutes les valeurs de C_d retrouvées dans la littérature sont pour des cylindres verticaux fixes tractés dans des bassins d'hydraulique expérimentale. Il s'agit donc de valeurs du coefficient de traînée normal (C_{d_n}). Règle générale, le C_{d_n} d'un cylindre diminue avec l'augmentation de la vitesse du courant jusqu'à l'atteinte d'un plateau pour des Re entre 5×10^3 et 5×10^5 (vitesse du courant entre 3 et 300 cm/s pour les boudins de moules testés). Dans cette plage de Re , le C_{d_n} des cylindres lisses ou peu rugueux varie peu en fonction de la vitesse du courant, de la rugosité et du diamètre du cylindre (Plew, 2005; Nath, 1981). Le Tableau 8 présente les valeurs typiques retrouvées dans la littérature pour des cylindres lisses et des cylindres dont la rugosité a été artificiellement augmentée.

À notre connaissance, les seules valeurs de C_{d_n} pour un boudin de moules qui ont été publiées sont celles de Plew (2005) et de Lien et Freidheim (2003). Ces derniers ont réalisé des simulations hydrodynamiques de filières en Norvège en utilisant pour les boudins de moules un C_{d_n} égal à 1,4. Par ailleurs, Plew (2005) a déterminé le C_{d_n} de trois courtes sections (environ 0,5 m de longueur) de boudin néo-zélandais tractées dans un bassin sans vagues à des vitesses inférieures à 32 cm/s. Les valeurs de C_{d_n} obtenues par cet auteur varient entre 1,32 et 1,46. Il y a lieu de préciser ici que les moules néo-zélandaises sont beaucoup plus grosses que les moules québécoises et que le boudin néo-zélandais testé avait à peu près le même diamètre que ceux de la présente étude. Par contre, Plew (2005) a utilisé une méthode différente pour déterminer le diamètre des boudins. Pour comparer les deux études, il faut comparer la surface de traînée par unité de longueur (i.e. le coefficient de traînée multiplié par le diamètre du boudin). Le C_dA moyen par mètre de boudin néo-zélandais testé par Plew (2005) s'élève à 0,18 alors que celui des boudins québécois testés dans le cadre de cette étude s'élève à 0,26. Enfin, il apparaît que le C_{d_n} calculé par Plew (2005) ne tient pas compte de l'inclinaison du boudin dans le courant. Si on utilise une telle approche, on obtient pour le

boudin québécois dans un courant entre 20 et 40 cm/s un C_dA par mètre égal à 0,21. Donc, le boudin québécois offrirait un peu plus de résistance au courant qu'un boudin néo-zélandais de même diamètre.

Tableau 8. Valeurs de coefficient de traînée normal retrouvées dans la littérature pour des cylindres rigides et un nombre de Reynolds entre 3×10^4 et 3×10^5 .

Référence	Type de données	Rugosité du cylindre	C_{d_n}
Plew (2005)	Expériences en laboratoire	Lisse	0,9 à 1,2
		Surface de gravier fin	0,9 à 1,2
		Boudin de moules	1,3 à 1,5
Nath (1981)	Expériences en laboratoire	Lisse	0,4 à 1,2
		Surface sableuse	0,8 à 1,2
		Avec salissures marines rigides	1,1 à 1,5
ISO (2004)	Revue de littérature	Rugueux	1,05 à 1,15
ISO (2004) et NORSOK (1999)	Valeurs recommandées pour la modélisation des plate-formes de forage	Lisse	0,65
		Avec salissures marines rigides	1,05
HSE (1996)	Expériences en laboratoire	Lisse	0,6 à 0,7
		Avec salissures marines	1,1 à 1,4
Girardot (2001)	Valeur recommandée pour la modélisation des mouillages océanographiques	Lisse	1,0
Heideman et Sarpkaya (1985)	Expériences en laboratoire	Surface sableuse	1,1
Heideman et George (1981)	Expériences en laboratoire	Lisse	0,6 à 0,7
		Avec balanes	1,0
	Valeurs recommandées pour la modélisation des plate-formes de forage	N/a	0,8 à 1,2

Dans le cas de la bouée cylindrique, un C_{d_n} autour de 1,1 correspond à celui obtenu pour des cylindres recouverts d'un couche de sable ou de gravier fin.

Quant au coefficient de traînée tangentiel (C_{d_t}) des cylindres, la revue de la littérature a fourni peu d'information sur le sujet. Les valeurs proposées se situent autour de 0,003 pour des câbles lisses et 0,015 pour des cordages propres comme ceux utilisés par les mariculteurs (Girardot, 2001). Il est donc plausible que le C_{d_t} du boudin de moules soit d'environ 0,1.

4.1.2. Application à une filière complète

Les valeurs obtenues pour le coefficient de traînée normal des sections de boudin de moules ne sont pas directement transposables à une filière entière pour les raisons expliquées ci-dessous.

4.1.2.1. Effet de sillage

Les filières sont assimilables à une rangée de cylindres. Or, en raison de l'effet de sillage (« wake effect »), la force de traînée exercée par le courant sur cette rangée de cylindres dépend du rapport (S/D) de l'espacement entre les boudins (S) et du diamètre des boudins (D) ainsi que de l'angle d'incidence (β) du courant par rapport à l'axe longitudinal de la filière. En effet, selon le rapport S/D et β , chaque cylindre subit un courant moyen plus grand ou moins grand que celui qu'il aurait subi s'il avait été seul comme lors des essais réalisés dans le cadre du présent projet.

Les normes de design des plate-formes de forage (ISO 2004; HSE, 2001) prescrivent de ne pas augmenter ou réduire le coefficient de traînée des structures cylindriques rigides verticales en fonction de l'angle d'incidence du courant lorsque le rapport S/D est plus grand que 4. Puisque le rapport S/D des boudins sur les filières québécoises est d'environ 4 (Bergeron et Gagnon, 2008), l'application de la règle ci-dessus ferait qu'aucune augmentation ou réduction du Cd pour tenir compte de l'effet de sillage ne serait applicable pour les filières mytilicoles du Québec.

Cependant, l'effet de sillage sur une rangée d'une centaine de cylindres qui modélise une filière de grossissement de moules a été étudié plus récemment par Plew (2005). Des rangées de cylindres rugueux verticaux et fixes ayant différents rapport S/D ont été soumises à différents courants (vitesse et angle d'incidence variables). Les résultats présentés par cet auteur comparent le Cd global de la rangée de cylindres au Cd mesuré pour un seul cylindre. Les résultats obtenus montrent que l'effet de sillage augmente la force de traînée dans certaines situations et qu'il la diminue dans d'autres.

Premièrement, le Cd d'une rangée de cylindres soumise à un courant perpendiculaire est plus grand que le Cd d'un cylindre seul pour un rapport S/D inférieur à 6. L'augmentation du Cd est d'autant plus grande que S/D diminue et que la rugosité des cylindres augmente. Sur les filières mytilicoles du Québec, le rapport S/D est d'environ 4. Pour cette valeur, Plew (2005) a obtenu une augmentation du Cd d'environ 25 %.

Deuxièmement, le Cd d'une rangée de cylindres diminue avec la diminution de l'angle d'incidence du courant par rapport à l'axe de la rangée. L'importance de cette réduction est une fonction du sinus de cet angle (par exemple, le Cd avec un angle de 30° est égal à 50 % du Cd avec un courant normal (90°)). Cette relation ne tient pas pour les angles près de 0 (courant parallèle à la rangée); la diminution du Cd pour un courant parallèle (0°) a été de 90 % pour un S/D égal à 2,2. Elle serait moins importante pour un rapport S/D égal à 4.

4.1.2.2. Déformation de la filière par le courant et le relevage

Les augmentations ou réductions du Cd décrites ci-dessus ont été établies pour des rangées de cylindres fixes. Or, les filières maricoles sont des structures flexibles qui sont déformées par les courants. Dans un champ 3D de courant, la filière prendra la forme qui minimise la force de traînée que les courants exercent sur elle au même titre qu'un arbuste plie dans le vent. Ainsi,

dans un courant oblique, la filière aura tendance à s'orienter parallèlement au courant en raison de cet effet de girouette et, cela, tant que le permet la contrainte imposée par les ancrages. Par ailleurs, dans un courant perpendiculaire, la filière adopte un profil latéral bombé et l'angle d'incidence du courant par rapport à l'axe de la rangée de boudins change progressivement entre les extrémités et le centre de la filière.

Bien que le logiciel développé par l'ITO simule la déformation de la filière dans le courant, il ignore l'effet de sillage (Bergeron *et al.*, 2008). En effet, chaque cylindre (portion de boudin verticale) y est modélisé comme s'il s'agissait d'un cylindre isolé et les forces sur les cylindres isolés sont additionnées pour obtenir la force totale sur la filière. Cette approche peut entraîner une sous-estimation ou une surestimation importante de la force exercée sur la filière. Pour tenir compte de l'effet de sillage, on devra ajuster dans les simulations le coefficient de traînée du boudin de moules en fonction de S/D et de β .

4.1.2.3. Variation de la section transversale en fonction de l'angle d'incidence du courant

Le boudin en continu de la plupart des filières québécoises est disposé en alternant sur la ligne maîtresse des petites boucles de 1,0 m de longueur ou moins avec des grandes bouches de 5 à 10 m de longueur. On peut modéliser la portion centrale des grandes boucles comme s'il s'agissait de deux boudins verticaux séparés d'une distance égale à la distance entre les attaches sur la ligne maîtresse. Par contre, pour une partie non-négligeable du boudin en continu, soit la petite boucle et la partie inférieure de la grande boucle, on doit tenir compte du fait que le boudin est presque horizontal. La section transversale des filières avec un boudin en continu est donc plus grande pour un courant perpendiculaire à la filière que pour un courant parallèle. Pour tenir compte de ce premier facteur dans les simulations, le Cd_n des cylindres qui modélisent le boudin a été ajusté (ce qui revient à ajuster A_n) en fonction de l'angle d'incidence du courant en utilisant l'équation suivante :

$$Cd'_n = \left(1 - \frac{2L_u}{L_b} \cos\beta \right) Cd_n \quad (21)$$

où :

Cd'_n est le coefficient de traînée des boudins verticaux ajusté pour tenir compte de la géométrie du boudin;

L_u est la longueur (m) d'une petite boucle;

L_b est la longueur (m) totale d'une petite et d'une grande boucles;

β est l'angle d'incidence du courant par rapport à l'axe de la filière; et

Cd_n est le coefficient de traînée des boudins verticaux ajusté pour l'effet de sillage.

4.2. BOUÉES SPHÉRIQUES

4.2.1. Comparaison avec la littérature

Le coefficient de traînée de sphères lisses pour un Re entre 1×10^4 et 5×10^5 est presque constant et se situe autour de 0,5 (Girardot, 2001; Finke et Siedler, 1986). Puisque les bouées sphériques propres testées n'étaient pas tout à fait lisses et qu'elles n'étaient pas parfaitement sphériques (présence de l'anneau d'attache), il est plausible que le C_d de ces deux bouées soit un peu plus élevé que celui des sphères lisses. La différence importante obtenue entre les coefficients des deux bouées sphériques propres et la diminution du coefficient de traînée de ces deux bouées avec l'augmentation de la vitesse du courant sont des résultats inattendus. Il est probable que le coefficient de ces bouées convergent vers une valeur d'environ 0,7 à des vitesses du courant supérieures à 50 cm/s.

Dans le cas des deux bouées sphériques de 16 pouces sales, nous n'avons trouvé dans la littérature aucune donnée sur le coefficient de traînée de sphères recouvertes de salissures marines. De plus, les données représentatives disponibles pour des sphères plus ou moins rugueuses sont pour des Re supérieurs à 3×10^5 . Les résultats indiquent que le C_d de ces bouées se situe autour de 1,2, soit un peu moins du double de celui des bouées propres. Si on tient aussi compte de l'augmentation de la section transversale de la bouée, les salissures ont pour effet de plus que doubler la force de traînée exercée par le courant sur la bouée.

4.2.2. Application à une filière complète

4.2.2.1. Bouées de compensation

Il n'y a pas d'ajustement du C_d en fonction de l'angle d'incidence du courant requis pour les bouées de compensation parce que leur section transversale au courant ne varie pas selon l'angle d'incidence du courant et parce que la distance entre ces bouées sur les filières est suffisamment grande pour qu'il n'y ait pas d'effet de sillage.

4.2.2.2. Bouées tendeur et de jambe composites

Les bouées tendeur et de jambe de certaines filières maricoles sont constituées d'un ensemble de deux ou trois bouées plus ou moins rapprochées l'une de l'autre. Ces bouées sont agencées selon une des trois façons suivantes :

- en série : une ligne d'attache par bouée; les lignes sont chacune attachées à un point différent sur la ligne maîtresse; la distance entre les points d'attache est égale à au moins 3 fois le diamètre des bouées;
- en grappe : une ligne d'attache par bouée; les lignes d'attache ont la même longueur et sont toutes attachées au même point sur la ligne maîtresse; la distance entre le centre des bouées est égale à leur diamètre; et

- superposées verticalement (bouées cylindriques seulement) : une seule ligne d'attache; les bouées ont un trou dans leur axe principal qui permet le passage de la ligne d'attache et sont attachées une au-dessus de l'autre sur cette ligne à une distance entre leur centre égale à moins de 2 fois la longueur des bouées.

Le logiciel de l'ITO ne permet de placer qu'une seule bouée à l'emplacement de ces bouées. La surface de traînée normale (CdA_n) de cette bouée composite peut être différente de la surface de traînée totale des bouées individuelles qui la composent selon l'importance de l'interaction (effet de sillage) entre les bouées.

4.2.2.3. Bouées en série

Pour les bouées en série, la surface de traînée normale (CdA_n) de la bouée fictive qui les modélise dépend de la distance entre les bouées et de l'orientation du courant par rapport à l'axe de la filière. Lorsque la distance entre les attaches est supérieure à 3-5 fois le diamètre de la bouée, il n'y a pas d'effet de sillage et la surface de traînée normale de la bouée modélisée est égale au total des surfaces de traînée des bouées individuelles quelle que soit l'orientation du courant (Kendoush *et al.*, 2007; Plew, 2005). Par contre, pour des bouées plus rapprochées, la surface de traînée normale de la bouée modélisée est plus grande que le total des surfaces de traînée des bouées individuelles dans un courant normal à l'axe de la filière et est plus petite dans un courant parallèle à l'axe de la filière.

4.2.2.4. Bouées en grappe

Lorsque trois bouées ou plus sont disposées en grappe, la surface de traînée normale (CdA_n) de la bouée fictive qui les modélise demeure la même quelle que soit l'orientation du courant par rapport à l'axe de la filière. Tran-Cong *et al.* (2004) fournissent des formules qui permettent de calculer la surface de traînée normale de la bouée fictive qui modélise de tels objets. Dans le cas de trois bouées en grappe, la surface de traînée de la bouée fictive est égale à 0,6 fois la surface de traînée totale des trois bouées individuelles.

Dans le cas de deux bouées disposées en grappe, lorsque les deux bouées n'ont pas tout à fait les mêmes dimensions ou la même quantité de salissures sur elles (surface de traînée plus grande pour une des deux bouées), elles se placent l'une derrière l'autre par rapport au courant dans des courants intenses (effet de girouette). Les données disponibles indiquent que la surface de traînée normale de la bouée qui modélise deux bouées de dimensions presque identiques est alors égale à moins de 0,5 fois la surface de traînée totale des deux bouées qu'elle modélise (Kendoush *et al.*, 2007; Itoh et Himeno, 2002).

4.2.2.5. Bouées superposées

Pour les bouées superposées sur une ligne d'attache unique, la surface de traînée normale de la bouée composite qui les modélise dépend de la distance entre les bouées mais demeure la même quelle que soit l'orientation du courant par rapport à l'axe de la filière. Pour des bouées sphériques, l'interaction entre les bouées superposées serait négligeable lorsque la distance entre leur centre est égale à au moins 3-4 fois leur diamètre (Kendoush *et al.*, 2007). Lorsque cette distance est égale à leur diamètre, les données disponibles indiquent que la surface de traînée normale de la bouée qui les modélise peut être jusqu'à 20 % plus grande que le total des surfaces de traînée des bouées individuelles. Il n'y a pas de données pour des cylindres superposés. On peut cependant présumer que la surface de traînée normale de la bouée qui les modélise peut être plus grande que le total des surfaces de traînée des bouées individuelles lorsque ces bouées sont très rapprochées.

Dans tous les cas, on peut considérer que la surface de traînée tangentielle (CdA_t) des bouées qui modélisent des bouées tendeur ou de jambe composites est égale à la somme des surfaces de traînée tangentielle des bouées individuelles.

4.3. SACS DE CAPTAGE

Dans le cas des filières de captage de pétoncle, les résultats obtenus dans la présente étude sont applicables aux filières en début de cycle d'élevage, lorsque les sacs sont presque vides et ont un poids dans l'eau presque nul. Bergeron et Gagnon (2008) proposent de modéliser chaque demi-V (6 paires de sacs plus une demi-pesée) de la ligne continue de collecteurs par un cylindre vertical suspendu à la ligne maîtresse. Dans le cas des filières en début du cycle d'élevage, les résultats des tests indiquent que les surfaces de traînée normale et tangentielle de ce cylindre sont respectivement de 2,4 m² et 1,2 m². Si on assume, par convention, que la longueur et le diamètre du cylindre sont respectivement 5,0 m et 0,5 m, les coefficients de traînée normal et tangentiel du cylindre peuvent être fixés respectivement à 1,0 et 0,15.

Les résultats obtenus ne sont pas représentatifs des filières lors de la récolte parce que les sacs testés n'avaient pas la forme et le poids des collecteurs matures (environ 0,4 kg dans l'eau). Dans le cas des filières de captage en fin du cycle d'élevage, les dimensions du cylindre peuvent être ajustées en fonction des mesures réalisées sur les sacs de captage matures (Bergeron et Gagnon, 2008). Quant aux coefficients de traînée de ces sacs matures, on assumera qu'ils sont similaires à ceux d'un boudin de moules.

La distance horizontale moyenne entre les deux bras du V formé par la ligne de collecteurs est environ 15 fois le diamètre des sacs vides et encore plus dans le cas des sacs matures. Il est donc probable qu'il n'y a pas d'effet de sillage significatif entre les deux bras du V et que la section transversale de la filière de captage ne change pas significativement en fonction de l'angle d'incidence du courant. Pour cette raison, le coefficient de traînée des cylindres qui

modélisent ces sacs ne changera pas en fonction de l'angle d'incidence du courant par rapport à l'axe de la filière de captage.

5. CONCLUSIONS

Les tests de traînée réalisés dans le havre de Gaspé en 2005 ont fourni des données cohérentes et valables pour les principales composantes des filières mytilicoles en fin du cycle d'élevage et pour les filières de captage de pétoncle en début du cycle d'élevage. Les forces enregistrées sont conformes aux forces théoriques pour des cylindres ou des sphères et les valeurs de coefficient de traînée obtenues sont similaires à celles retrouvées dans la littérature pour des objets similaires.

En raison d'un effet de sillage important, le coefficient de traînée normal obtenu pour le boudin de moules et les bouées dans le cadre des présents essais doit être ajusté en fonction de la géométrie du boudin continu et des bouées composites ainsi qu'en fonction de l'orientation du courant par rapport à l'axe de la filière. Nous proposons dans le Tableau 9 des valeurs de Cd pour le boudin de moules ajustées en fonction de l'angle d'incidence du courant pour trois types de filières, soit 1) avec des boudins verticaux, 2) avec un boudin continu attaché par boucles de 10 m de longueur (Gaspésie) et 3) avec un boudin en continu attaché par boucles de 5 m de longueur (Îles-de-la-Madeleine) et 4) relevée en surface dans des sites d'environ 20 m de profondeur (Gaspésie). Ces valeurs approximatives tiennent compte de l'effet des trois facteurs décrits à la Section 4.1.2 et assument que le boudin réel est modélisé par des cylindres verticaux dont la somme des sections transversales est égale à la section transversale du (ou des) boudin(s) réel(s).

Tableau 9. Valeur du coefficient de traînée normal proposé pour le boudin de moules en fonction de l'angle d'incidence du courant.

Angle d'incidence du courant ⁽¹⁾ (degrés)	Boudins verticaux	Boudin en continu; boucles de 10 m	Boudin en continu; boucles de 5 m	Filière relevée en surface en Gaspésie
0	0,4	0,3	0,2	1,0
22,5	0,7	0,5	0,4	1,2
45	1,2	1,0	0,9	1,4
67,5	1,5	1,4	1,3	1,5
90	1,6	1,6	1,6	1,6

(1) Par rapport à la filière au repos.

Dans le cas des bouées tendeur et de jambe composites, la littérature montre que, pour minimiser la force de traînée exercée par le courant sur une filière, il y a avantage à disposer les bouées composites en grappes plutôt qu'en série le long de la ligne maîtresse ou superposées verticalement sur une seule ligne d'attache.

Pour les autres composantes, l'effet de sillage est probablement négligeable. Le Tableau 10 présente les valeurs recommandées pour la modélisation de ces composantes pour tous les angles d'incidence.

Tableau 10. Valeurs de coefficient de traînée recommandées pour la modélisation des filières mytilicoles en conditions extrêmes (courants entre 20 et 80 cm/s).

Composante de la filière	Cd _n	Cd _t
Parties non-accessibles de la ligne maîtresse (avec salissures)	1,35	0,1
Partie supérieure des lignes d'amarrage (avec salissures)	1,35	0,1
Partie supérieure des lignes de jambe (avec salissures) ⁽¹⁾	n/a	n/a
Partie accessible de la ligne maîtresse (sans salissures)	1,2	0,02
Partie inférieure des lignes d'amarrage (sans salissures)	1,2	0,02
Partie inférieure des lignes de jambe (sans salissures) ⁽¹⁾	n/a	n/a
Bouées de compensation sphériques de 16 pouces ⁽²⁾	0,7	0,7
Bouées de compensation sphériques de 12 pouces ⁽²⁾	0,7	0,7
Bouées de compensation cylindriques ⁽²⁾	1,1	1,0
Bouées sphériques avec salissures ⁽²⁾	1,3	1,3

(1) Les lignes de jambes sont unidimensionnelles dans le logiciel de l'ITO. On tiendra compte de la traînée sur ces lignes en augmentant le diamètre du boudin de jambe (voir Bergeron *et al.*, 2008).

(2) Valeurs à utiliser pour les bouées individuelles ou composites distancées de plus de 4 fois leur diamètre. Pour les bouées composites plus rapprochées, les valeurs doivent être réduites pour tenir compte de l'interaction entre les bouées.

Les valeurs des Tableaux 9 et 10 ne sont applicables qu'à des cylindres ou des sphères dont le diamètre a été déterminé avec les équations présentées dans ce rapport et pour des courants entre 20 et 80 cm/s.

Dans le cas des sacs de captage de pétoncle, la surface de traînée normale et tangentielle des sacs vides dans des courants de 20 à 70 cm/s ont été estimés à environ 0,2 et 0,1 m². Dans le cas des sacs matures, les résultats obtenus ne sont pas représentatifs des filières lors de la récolte. On recommande d'utiliser les dimensions des sacs matures (Bergeron et Gagnon, 2008) et les coefficients de traînée du boudin de moules mature donnés ci-dessus pour modéliser les filières à la récolte.

6. RÉFÉRENCES

Bergeron, P. et M. Gagnon. 2003. Description, analyse et modélisation des filières flottantes utilisées pour l'élevage des mollusques au Québec. Rapport de Biorex inc. au Regroupement des mariculteurs du Québec. xvi + 367 p.

Bergeron, P. et M. Gagnon. 2008. Caractérisation des filières maricoles en Gaspésie et aux Iles-de-la-Madeleine. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). v + 66 p.

- Bergeron, P., M. Gagnon, W. Raman-Nair et G. Janes. 2008. Modélisation hydrodynamique des filières maricoles du Québec : description du logiciel et simulation des filières. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). vi + 194 p.
- Finke, M. et G. Siedler. 1986. Drag coefficients of oceanographic mooring components. *J. Atmosph. Oceanic Tech.* 3: 255-264.
- Gagnon, M. 2008. Caractérisation des courants et des vagues dans les principaux sites maricoles du Québec. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). v + 57 p.
- Girardot, J.-P. 2001. Mouillages: techniques des mouillages utilisés en océanographie. Université de Bretagne occidentale, Laboratoire de physique des océans, 75 p.
- Heideman, J. C. et R. J. George. 1981. Biological and engineering parameters for macrofouling growth on platforms offshore Louisiana. *The Ocean: an international workplace. Oceans 1981 Conference, Boston, Mass., Vol 13: 550-557.*
- Heideman, J. C. et T. Sarpkaya. 1985. Hydrodynamic forces on dense arrays of cylinders. *Offshore Technology Report OTC 5008*, 8 p.
- Health & Safety Executive (HSE). 1996. Drag and inertia coefficient; data for circular cylinders. *Marine Research Review 11, Offshore Technology Report—OTO96 905*, 35 p.
- Health & Safety Executive (HSE). 2001. *Offshore Technology Report: Environmental considerations. OTO 2001/010: 72 p.*
- ISO 2004. *ISO/DIS 19902. Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures. 362 p.*
- Itoh, Y. et R. Himeno. 2002. Numerical simulation of three-dimensional flow around two circular cylinders in tandem arrangement. *RIKEN Review 48: 3-6.*
- Kendoush, A.A., A.H. Sulaymon et S.A.M. Mohammed. 2007. Experimental evaluation of the virtual mass of two solid spheres accelerating in fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science 31(7): 813-823.*
- Lien, E. et A. Fredheim. 2003. Development of a longtube mussel system for cultivation of mussels (*Mytilus edulis*). *Proceed. Open Ocean Aquaculture IV: 137-141.*
- Nath, H. J. 1981. Hydrodynamic coefficients for macro-roughnesses. *Offshore Technology Conference, OTC 3989: 337-356.*
- Norwegian Technology Standards Institution (NORSOK). 1999. *NORSOK Standard: Actions and effects. Norwegian Technology Standards Institution, 81 p.*
- Plew, D. R. 2005. The hydrodynamic effects of long-line mussel farms. *Thèse de Doctorat. Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande, 330 p.*
- Plew, D. R., G. L. Stevens, R. H. Spigel et N. D. Hartstein. 2005. Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms. *J. Oceanic Engineering 30: 95-106.*
- Tran-Cong, S., M. Gay et E.E. Michaelides. 2004. Drag coefficients of irregularly shaped particles. *Powder Technology 139: 21-32.*