



SODIM

Société de développement de l'industrie maricole inc.

*Règles de base relatives à la conception des
filiales flottantes submergées utilisées au
Québec*

Rapport final

Dossier n° 710.18

Rapport commandité par la SODIM

Mai 2003



Règles de base relatives à la conception des filières flottantes submergées utilisées au Québec



RAPPORT FINAL

MAI 2003

Règles de base relatives à la conception des filières flottantes submergées utilisées au Québec

Photographies de la page couverture :

Clichés 1 et 2 : Agriculture, Pêcheries et Alimentation, Québec

Cliché 3 : Les Moules Cascapédia et Forillon Ltée

Cliché 4 : Biorex inc.

Référence à citer :

Bergeron, P. et M. Gagnon. 2003. Règles de base relatives à la conception des filières flottantes submergées utilisées au Québec. Rapport produit par Biorex inc. pour le Regroupement des mariculteurs du Québec. v + 32 pages.

AVIS AU LECTEUR

Les mentions de marque de commerce et de produits commerciaux qui apparaissent dans ce rapport ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

L'utilisation de toute méthode ou technique mentionnée dans ce document est sous l'entière responsabilité de l'utilisateur ou de l'utilisatrice et n'engage en aucune façon ni la firme Biorex, ni le Regroupement des mariculteurs du Québec, ni aucun des organismes commanditaires de l'étude.

PRÉFACE

Le présent rapport est une version synthèse simplifiée d'un rapport produit pour le Regroupement des mariculteurs du Québec (RMQ) intitulé : « Description, analyse et modélisation des filières flottantes utilisées pour l'élevage des mollusques au Québec ».

La réalisation de ce travail a été possible grâce à une contribution financière de Développement Économique Canada, du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et de la Société de développement de l'industrie maricole.

Ce projet d'envergure est une initiative du RMQ et a été réalisé sous la supervision d'une équipe ad hoc de suivi de projet composée de Mme Julie Roy (RMQ), M. Stéphane Morissette (Les Moules Cascapédia et Forillon Ltée), M. Sylvain Vigneau (Pétoncles 2000), M. Sylvain Lafrance (Société de développement de l'industrie maricole) ainsi que M. Georges Cliche (Station technologique maricole des Iles-de-la-Madeleine), M. Gilles Lapointe (Direction régionale de la Gaspésie) et M. Marcel Roussy (Centre aquacole marin de Grande-Rivière), tous trois du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être réalisé grâce à la participation d'un grand nombre de personnes. Nous tenons particulièrement à remercier les mariculteurs du Québec qui ont collaboré au projet et qui ont fourni de précieux renseignements sur leur technique d'élevage, leurs équipements et les trucs du métier qu'ils ont développés au cours des années. Nous tenons également à remercier les membres de l'équipe de suivi pour les conseils techniques tout au long de l'étude et pour les commentaires et suggestions émis sur les versions préliminaires du présent rapport. Enfin, nous désirons souligner la collaboration de nombreux individus et organismes qui ont fourni des informations, des données ou des rapports souvent inédits sur les filières flottantes en usage au Canada et à l'étranger.

TABLE DES MATIÈRES

AVIS AU LECTEUR	I
PRÉFACE	II
REMERCIEMENTS	III
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES	V
1. INTRODUCTION.....	1
2. GÉNÉRALITÉS.....	1
2.1. Composantes d'une filière flottante	1
2.2. Type de filières flottantes	5
2.3. Disposition des filières à l'intérieur des sites maricoles	8
3. FORCES EN JEU	10
3.1. Force de traînée	10
3.2. Torque produit par le courant	11
4. GÉOMÉTRIE DES FILIÈRES SUBMERGÉES	12
4.1. Tension dans la ligne porteuse au repos	14
4.2. Longueur utile de la ligne porteuse	15
4.3. Stabilité verticale de la ligne porteuse face aux courants	17
4.4. Angle de traction des amarres sur les ancrages	18
5. FLOTTABILITÉ DE LA FILIÈRE	19
5.1. Notions de base	19
5.2. Gestion de la flottabilité	23
6. LES ANCRAGES.....	25
7. CRITÈRES DE CONCEPTION D'UNE FILIÈRE OPTIMALE	28
8. RÈGLES DE BASE	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Avantages et inconvénients des trois types d'ancrage utilisés au Québec sur les filières flottantes submergées. 26

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma illustrant les principales composantes d'une filière flottante..... 2

Figure 2. Schéma illustrant les trois types d'amarrage utilisés sur les filières flottantes 3

Figure 3. Schémas non à l'échelle illustrant les trois types de filières flottantes 6

Figure 4. Trois types d'agencement des filières flottantes sur un site d'élevage..... 9

Figure 5. Stabilité relative de trois blocs de béton de même poids par rapport à la force de renversement exercée par la traction horizontale d'une amarre. 13

Figure 6. Variables de base permettant de caractériser la géométrie d'une filière submergée. 14

Figure 7. Profil longitudinal d'une filière submergée soumise à un courant longitudinal 17

Figure 8. Profil latéral d'une filière submergée soumise à un courant latéral 18

1. INTRODUCTION

Le Regroupement des Mariculteurs du Québec a confié à une firme d'experts-conseils le mandat de réaliser une étude sur la technique d'élevage sur filières flottantes utilisée au Québec dont les objectifs étaient de :

- dresser un portrait de la technique d'élevage sur filières flottantes au Québec;
- identifier les problèmes auxquels font face les producteurs concernant la conception des filières flottantes et les opérations effectuées sur ces structures;
- décrire la nature des forces qui affectent la viabilité, la stabilité et la maniabilité des filières flottantes;
- modéliser le comportement des filières flottantes sous différentes conditions ambiantes;
- identifier les améliorations à apporter au design des filières flottantes et à leurs composantes en vue d'optimiser leur utilisation.

Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un premier rapport (désigné ici comme le rapport intégral) qui peut difficilement être utilisé directement par les mariculteurs pour améliorer leur technique d'élevage en raison de la quantité importante d'information qu'il contient, des aspects théoriques développés et de la complexité des processus décrits.

Le présent rapport est une version synthèse simplifiée de ce rapport intégral. Il regroupe les principales règles de base à suivre pour la conception des filières flottantes afin d'accroître leur stabilité en mer et leur productivité. Il répond mieux aux besoins des mariculteurs et leur permettra d'identifier plus facilement les améliorations à apporter à leur technique d'élevage selon les conditions environnementales qui prévalent à leur site. Il fournit également des informations sur les différents types de filières flottantes, les forces externes qui agissent sur elles, le comportement des filières de différentes géométries soumises à ces forces, la gestion de la flottabilité et les ancrages.

2. GÉNÉRALITÉS

2.1. COMPOSANTES D'UNE FILIÈRE FLOTTANTE

Les principales composantes d'une filière flottante sont (Figure 1) :

- la ligne porteuse;
- les lignes d'amarrage;
- les ancrages;

- les bouées;
- les supports d'élevage;
- les pesées; et
- l'accastillage.

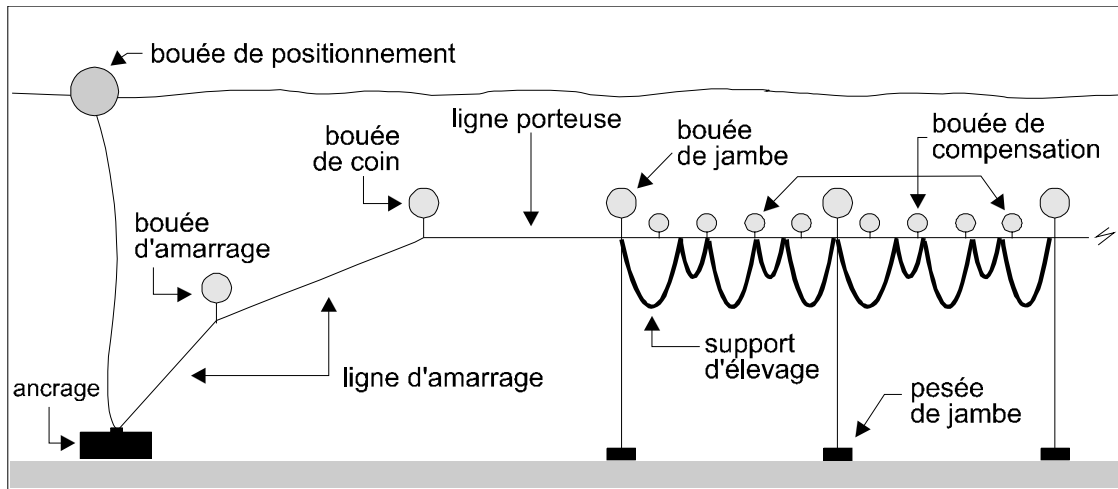


Figure 1. Schéma illustrant les principales composantes d'une filière flottante. Croquis non à l'échelle.

Ligne porteuse. Corde tendue horizontalement sur laquelle sont suspendus les supports d'élevage.

Lignes d'amarrage. Cordes tendues entre les extrémités de la ligne porteuse et les ancres et qui transmettent à ces derniers les forces de traction générées sur la ligne porteuse et les supports d'élevage par les courants, les vagues et les opérations maricoles. Il existe trois types d'amarrage (Figure 2) :

- 1) amarrage par bout : constitué d'une simple corde qui réunit l'extrémité de la ligne porteuse et l'ancrage;
- 2) amarrage à deux brins : une bouée submergée ou une pesée libre est attachée au centre de la ligne d'amarrage de façon à former un angle sur cette ligne;
- 3) amarrage à trois brins : une bouée submergée et une pesée libre sont attachées sur la ligne d'amarrage de façon à former deux angles sur cette ligne.

Ancrages. Systèmes installés sur le fond offrant une résistance aux tractions des lignes d'amarrage et permettant ainsi d'assurer la stabilité horizontale de la filière.

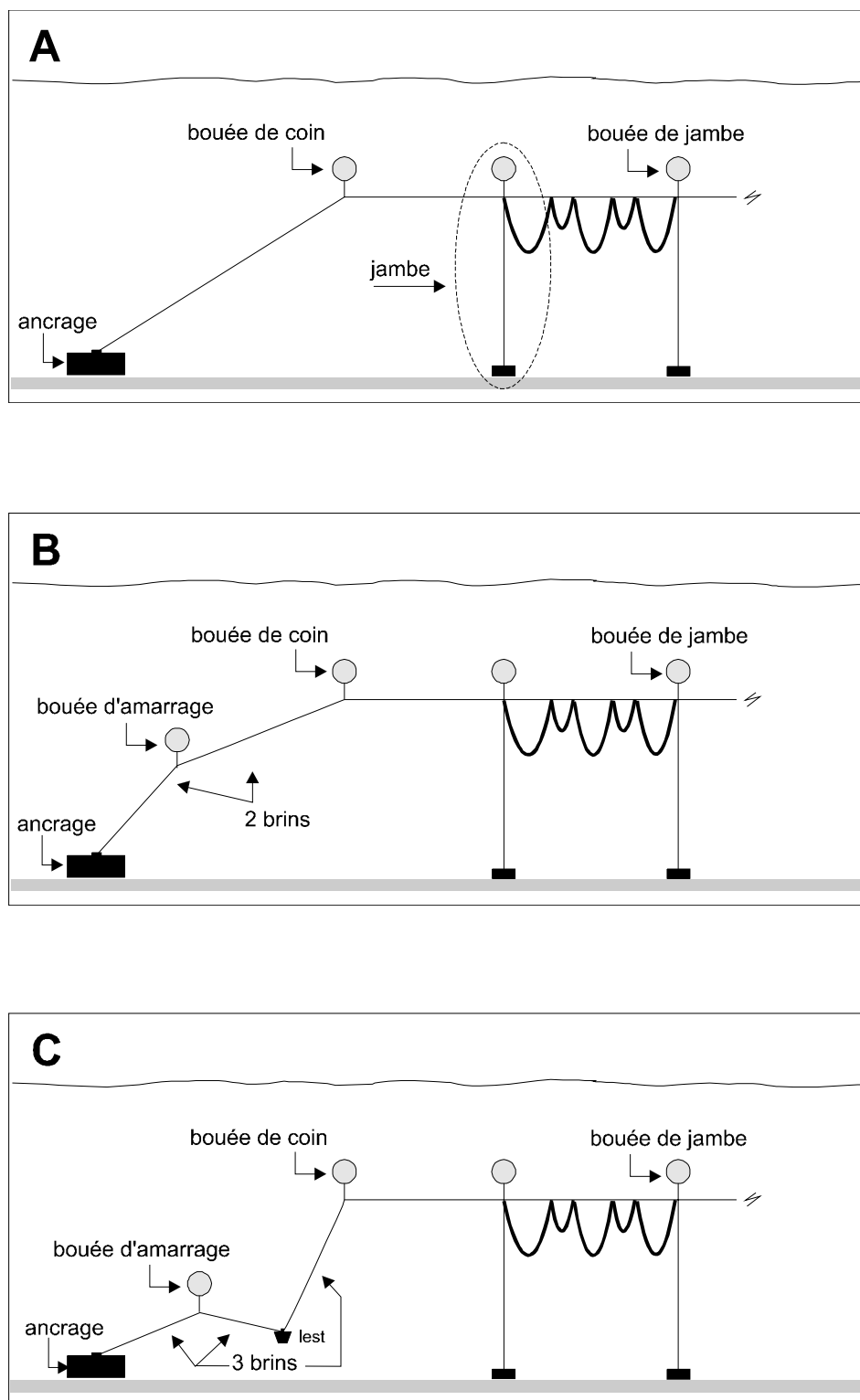


Figure 2. Schéma illustrant les trois types d'amarrage utilisés sur les filières flottantes. A : amarrage par bout; B : amarrage à deux brins; C : amarrage à trois brins. Croquis non à l'échelle.

Bouées. Flotteurs attachés à la ligne porteuse, aux lignes d'amarrage ou aux ancrages servant à contrecarrer le poids de la filière, tendre les lignes ou à indiquer la position et permettre la récupération de la filière. Les principales caractéristiques des différents types de bouées utilisées par les mariculteurs québécois et des Maritimes sont présentées dans le rapport intégral.

Du point de vue structurel, on peut distinguer cinq types de bouées (Figures 1 et 2) :

- bouées de coin;
- bouées de jambe;
- bouées de compensation;
- bouées d'amarrage; et
- bouées de positionnement.

Les bouées de coin sont des flotteurs installés aux deux extrémités de la ligne porteuse qui ont comme principale fonction de maintenir cette dernière sous tension. Elles sont utilisées sur les filières submergées (voir la section 2.2).

Les bouées de jambe sont des flotteurs attachés à intervalles réguliers à la ligne porteuse lors de l'installation de la filière et dont la principale fonction est d'assurer la stabilité verticale de cette dernière pendant tout le cycle d'élevage (grande flottabilité de réserve) ou pendant seulement une partie du cycle (flottabilité de réserve moins élevée). Ce type de bouée est utilisé sur les filières semi-submergées et submergées (voir la section 2.2). Une jambe est définie comme un flotteur attaché à la ligne porteuse sous lequel est fixé une pesée qui repose sur le fond (Figure 2A).

Les bouées de compensation sont des flotteurs ajoutés sur la ligne porteuse en cours d'élevage lorsque requis pour contrecarrer l'augmentation avec le temps du poids supporté par cette dernière. Une bouée de compensation n'est pas jumelée à une pesée attachée sur la ligne porteuse.

Les bouées d'amarrage sont des flotteurs submergés attachés à la ligne d'amarrage pour aménager un amarrage à deux ou trois brins.

Les bouées de positionnement sont des flotteurs de surface le plus souvent attachés aux ancrages et dont la fonction est d'indiquer la position de la filière, de permettre de tendre la filière en éloignant les ancrages l'un de l'autre ou de permettre le relevage des ancrages.

Pesées. Corps-morts attachés à la ligne porteuse, aux lignes d'amarrage ou aux supports d'élevage servant à tendre les lignes et supports.

Supports d'élevage. Dispositifs attachés à la ligne porteuse qui supportent les mollusques dont on réalise l'élevage. Il peut s'agir de boudins de moules, de cordes ou sacs de captage du naissain ou de cages en filet de formes et de dimensions variées (« pearl-nets », lanternes, etc.).

Accastillage. Quincaillerie utilisée pour joindre les différentes composantes de la filière. Cela inclut les nœuds et épissures dans les cordes, les manilles, mailles rondes, cosses-cœurs, etc. Seuls les nœuds sont utilisés sur les filières québécoises.

2.2. TYPE DE FILIÈRES FLOTTANTES

On peut distinguer trois types principaux de filières flottantes. Ce sont (Figure 3) :

- la filière de surface;
- la filière semi-submergée; et
- la filière submergée.

Filière de surface. Les deux principales caractéristiques structurelles de ce type de filière sont les suivantes :

- la ligne porteuse est maintenue à la surface de l'eau ou à quelques centimètres sous la surface de l'eau;
- lorsqu'il y a un marnage important créé par les marées, l'amarrage de la filière doit être à deux brins ou à trois brins pour maintenir la tension dans les lignes à marée basse.

Les filières de surface sont celles qui sont les plus faciles à manipuler et celles dont la gestion de la flottabilité est la plus simple. Par contre, ce sont celles qui sont les plus exposées aux forces générées par les courants, les vagues, les vents, les glaces et les marées ainsi qu'aux interactions indésirables avec les humains. Les filières de surface sont utilisées dans les milieux bien abrités.

Au Québec, mis à part les filières utilisées pour le captage du naissain, les filières de surface ne sont exploitées qu'à un seul site d'élevage soit le havre des Belles-Amours sur la Basse-Côte-Nord.

Filière semi-submergée (ou de sub-surface). Les deux principales caractéristiques structurelles de ce type de filière sont les suivantes :

- la ligne porteuse est maintenue à plusieurs mètres sous la surface de l'eau;

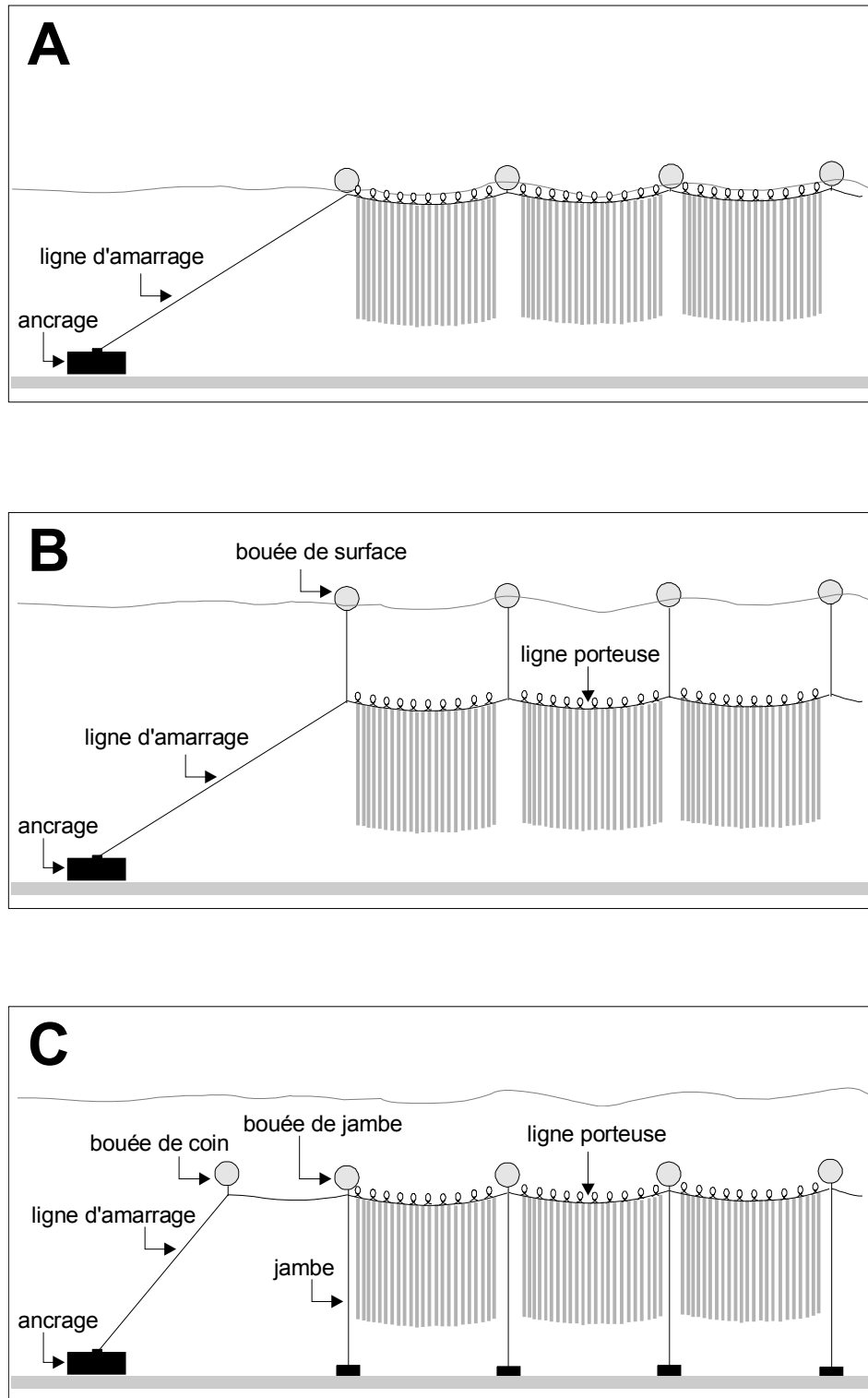


Figure 3. Schémas non à l'échelle illustrant les trois types de filières flottantes.
A : Filière de surface; B : Semi-submergée; C : Submergée.

- la stabilité verticale de la ligne porteuse est assurée par la tension dans les lignes et, en début d'élevage, par des bouées de surface reliées à la ligne porteuse par des cordes dont la longueur est égale à la profondeur désirée. En cours d'élevage, des bouées de compensation sont ajoutées sur la ligne porteuse si requis pour contrecarrer l'augmentation avec le temps du poids supporté par cette dernière.

Les filières semi-submergées sont utilisées lorsqu'il est nécessaire de réduire les forces exercées par les vagues, les courants et les vents sur les supports d'élevage et les ancrages (i.e. en milieu exposé), pour réduire les salissures marines qui s'accumulent sur la filière en cours d'élevage ou pour optimiser les processus biologiques de l'espèce élevée (captage, croissance, survie, etc.). La présence de bouées de surface facilite la gestion de la flottabilité en cours d'élevage. Par contre, la ligne porteuse doit être remontée de plusieurs mètres pour avoir accès aux supports d'élevage, ce qui augmente la tension dans les lignes, la traction sur les ancrages et les forces exercées sur les équipements et les bateaux maricoles. Ce type de filière ne peut pas être utilisé en présence de glaces dérivantes et n'est donc pas utilisée au Québec.

Filière submergée. Les trois principales caractéristiques structurelles des filières submergées sont les suivantes :

- la ligne porteuse est maintenue à plusieurs mètres sous la surface de l'eau;
- la stabilité verticale des supports d'élevage est assurée par la tension dans les lignes et, en début d'élevage, par des pesées reposant sur le fond reliées à des bouées sur la ligne porteuse. La corde qui relie les pesées aux bouées a une longueur égale à la hauteur au-dessus du fond désirée. La bouée, la corde verticale sous tension et la pesée forment ce qu'on appelle une « jambe ». En cours d'élevage, des bouées de compensation sont ajoutées sur la ligne porteuse si requis pour contrecarrer l'augmentation avec le temps du poids supporté par cette dernière; et
- l'amarrage de la filière peut être un simple amarrage par bout même lorsque le marnage est important.

Les filières submergées sont celles les moins faciles à manipuler et dont la gestion de la flottabilité peut être la plus complexe parce qu'elle ne comprend pas de repères (bouées) en surface. Par contre, il s'agit du type de filière le moins exposé aux forces générées par les vagues, les courants, les vents, les glaces et les marées. Ce type de filière a été conçu pour une utilisation dans les milieux exposés, en période de glaces dérivantes ou lorsque des considérations environnementales font qu'il n'est pas possible d'utiliser des bouées de surface.

Il existe plusieurs variantes des trois principaux types de filières décrits ci-dessus. La principale variante est associée aux réseaux multilignes décrits à la section suivante.

La plupart des filières flottantes exploitées au Québec, à l'île-du-Prince-Édouard et au Nouveau-Brunswick sont des filières submergées.

2.3. DISPOSITION DES FILIÈRES À L'INTÉRIEUR DES SITES MARICOLES

Il y a quatre façons principales de disposer des filières flottantes à l'intérieur d'un site maricole :

- individuellement;
- en parallèle;
- en série;
- en réseau.

Individuellement. Les filières flottantes sont rarement disposées indépendamment les unes des autres sur les sites maricoles parce que cette approche n'utilise pas efficacement l'espace disponible et augmente les risques d'emmêlement entre les filières. Au Québec, cet agencement n'est adopté que sur la Basse-Côte-Nord où le nombre de filières flottantes exploitées à chaque site maricole est nettement plus faible qu'ailleurs. Une partie des filières de captage de pétoncles sur le Fond du Sud-Ouest aux îles-de-la-Madeleine sont également ancrées individuellement.

En parallèle. Dans certains pays, les filières de surface sont constituées de 2 à 6 lignes porteuses parallèles reliées à un flotteur horizontal unique à chaque extrémité qui est lui-même amarré à un ancrage unique (Figure 4A). Dans d'autres cas, la ligne d'amarrage de chacune des filières parallèles est attachée à un rail de chemin de fer.

En série. Les filières peuvent être disposées en série en les amarrant aux ancrages bout à bout (Figure 4B). Ainsi chaque ancrage sert à deux filières contiguës. Plusieurs séries peuvent être aménagées côte à côte en s'assurant d'une distance minimale entre les séries. Dans les cas où les ancrages sont des corps-morts, ceux-ci sont parfois reliés entre eux par des ralingues longitudinales et latérales.

Cette disposition est la plus répandue au Québec aussi bien dans les lagunes des Îles-de-la-Madeleine que le long de la péninsule gaspésienne. La méthode de mise en place des filières en série est décrite en détails à l'annexe 10 du rapport intégral.

En réseau. Des réseaux complexes de lignes porteuses peuvent être aménagés en reliant des séries de filière parallèles avec des ralingues et des amarrages latéraux. La Figure 4C donne un exemple d'un tel réseau. Un tel aménagement permet d'augmenter la tension dans les lignes porteuses de sorte que le nombre de jambes requis pour assurer leur stabilité verticale peut être considérablement réduit. Cet agencement a été développé pour l'élevage du pétoncle au

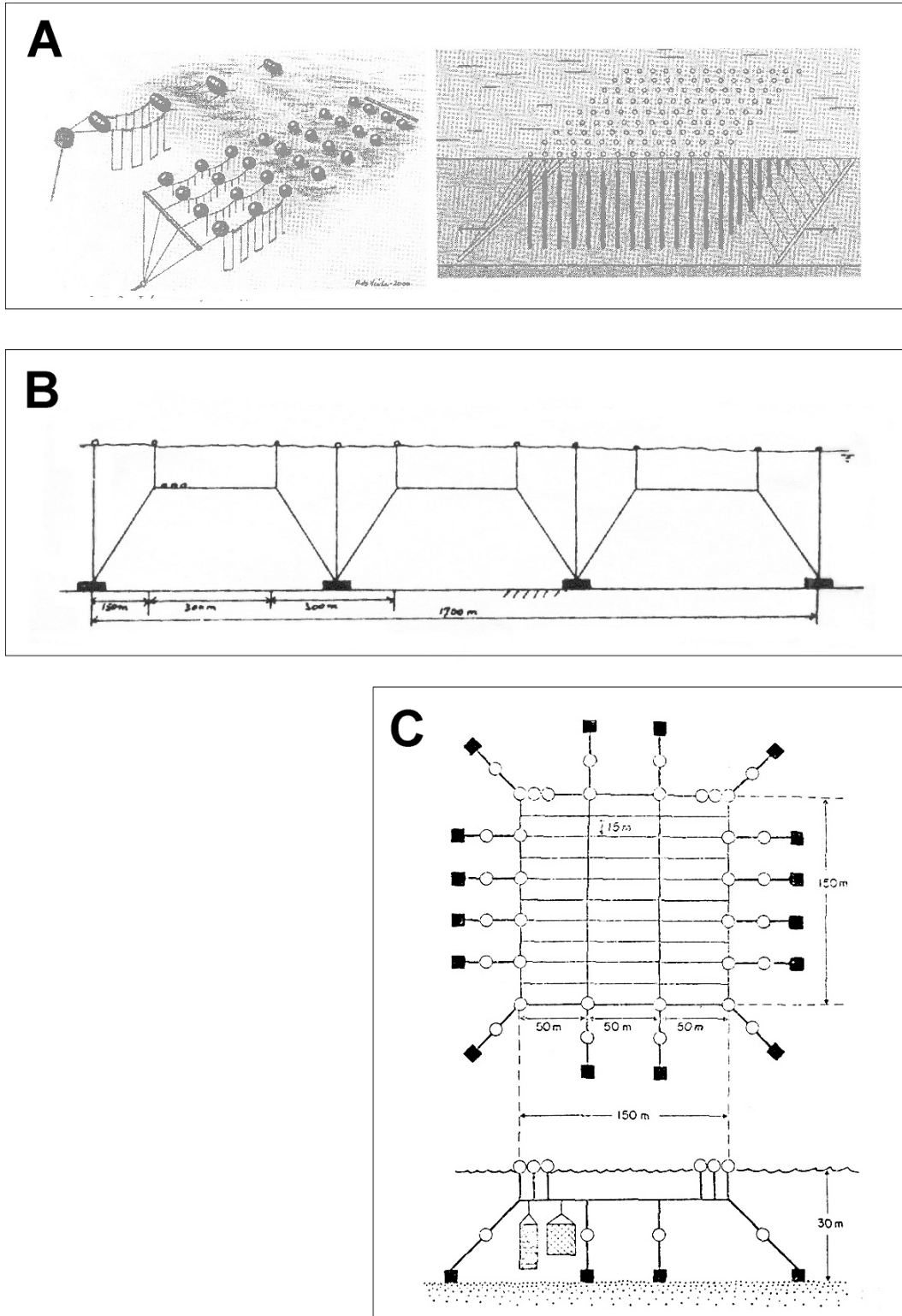


Figure 4. Trois types d'agencement des filières flottantes sur un site d'élevage.
 A: En parallèle; B: En série; C : En réseau

Japon en 1972 et permet de maximiser l'utilisation de l'espace puisque les lignes porteuses ne sont séparées que de 15 m.

Aucun mariculteur québécois n'exploite des filières flottantes agencées de cette façon.

3. FORCES EN JEU

Les principales forces externes qui agissent sur les filières sont générées par :

- la gravité et la poussée d'Archimède;
- la pression hydrostatique;
- les courants;
- la houle (i.e. les vagues);
- le vent;
- les glaces dérivantes; et
- le marnage causé par les marées.

Ces forces externes génèrent dans les filières des forces internes dont les principales sont :

- la tension dans les lignes;
- la résistance des ancrages à la traction;
- les couples de torsion autour des axes de rotation;
- la résistance du support de relevage, des poulies étoilées et du bateau aux forces générées lors du relevage de la filière en surface.

Comme les courants sont l'un des agents externes qui génèrent le plus de force sur les filières, il est important de préciser comment ils affectent les filières submergées et comment les forces de traînée et de torsion générées peuvent être minimisées.

3.1. FORCE DE TRAÎNÉE

- Les courants exercent sur les corps immergés une force de traînée dirigée dans la même direction que celle du courant. La force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse du courant, c'est-à-dire qu'un courant d'une vitesse donnée exerce sur un corps une force neuf fois plus grande que ne le fait un courant trois fois moins rapide et quatre fois plus grande qu'un courant deux fois moins rapide;
- La force de traînée est directement proportionnelle à la section de l'objet qui est perpendiculaire à la direction du courant. Dans le cas des filières flottantes, la force de

traînée exercée par les courants provient en grande partie de la friction de l'eau sur les bouées et les suspensions d'élevage ayant un volume important (boudins, collecteurs de pétoncles, lanternes);

- Les salissures marines peuvent augmenter la force de traînée en augmentant le diamètre des cordages. Dans le cas des supports d'élevage, on a évalué que la force de traînée exercée par le courant sur une lanterne chinoise est quatre fois plus élevée lorsque cette dernière est recouverte de salissures;
- La traînée exercée par un courant sur une bouée dépend de la forme de cette dernière. Par exemple, la force exercée sur une bouée ellipsoïdale est trois fois moins élevée que sur une bouée sphérique de même volume (i.e. de même flottabilité) et 15 fois moins grande que sur une bouée cylindrique de même volume.

3.2. TORQUE PRODUIT PAR LE COURANT

Un torque¹ n'est pas une force mais plutôt la capacité d'une force à produire une rotation autour d'un axe. Le principal torque dans une filière est celui produit par le courant. Dans le cas des filières submergées, ce torque a comme conséquence d'incliner les lignes d'amarrage et de coucher la ligne porteuse vers le fond. Cette inclinaison de la filière varie selon l'élasticité des lignes et le type de bouées.

Effet de l'élasticité des lignes. L'élasticité de la ligne d'amarrage fait que cette dernière est allongée par la force exercée par le courant. Cet étirement ne change pas l'angle d'inclinaison de l'amarre ni la traction exercée par cette dernière sur le corps-mort. Conséquemment, plus la ligne d'amarrage est élastique moins la ligne porteuse sera couchée vers le fond par un courant.

Effet de la taille des bouées. Pour un courant de vitesse donnée, l'augmentation du diamètre des bouées diminuera l'inclinaison de l'amarre. En effet, la flottabilité d'une bouée submergée est proportionnelle à son volume ($\pi D^3/6$ pour une sphère) alors que la force de traînée exercée sur la bouée est proportionnelle à sa section normale au courant ($\pi D^2/4$). L'inclinaison de l'amarre est donc inversement proportionnelle au diamètre (D) des bouées.

Plus le diamètre de la bouée augmente, plus l'angle θ augmente (i.e. l'inclinaison de l'amarre diminue). Ceci signifie qu'une filière submergée sera moins couchée vers le fond par les courants lorsqu'on utilise des bouées de grand diamètre plutôt qu'un nombre plus élevé de petites bouées. Cette règle ne s'applique pas aux filières de surface ou semi-submergées.

¹ La traduction française de « torque » est couple mais n'est pas utilisée dans le présent document car elle est peu connue. Le terme anglais « torque » est plus fréquemment utilisé et permet de mieux saisir le phénomène mécanique dont il est question.

Effet de la forme des bouées. La force de traînée exercée sur une bouée d'un volume donné dépend de sa forme (voir la section 3.1 ci-dessus). Une bouée ellipsoïdale sera moins couchée vers le fond par les courants qu'une bouée sphérique de même volume.

Renversement des corps-morts. Un autre torque important dans les filières est le torque produit par la traction horizontale des amarres sur les corps-morts sous l'effet des courants. Cette force a tendance à faire renverser le bloc. La Figure 5 montre qu'on peut réduire les risques de renversement des corps-morts en changeant la forme du bloc de façon à ce que le rapport B/A soit le plus grand possible.

4. GÉOMÉTRIE DES FILIÈRES SUBMERGÉES

La géométrie des filières submergées détermine quelles forces internes seront générées par les forces externes (courants, houle, relevage de la ligne en surface, etc.). La Figure 6 présente les variables qui permettent de caractériser la géométrie de base d'une filière submergée. Ces variables doivent nécessairement être considérées lorsque l'on cherche à déterminer les critères de conception d'une filière optimale. Il s'agit de :

- la longueur de la ligne porteuse (L_p);
- la longueur des lignes d'amarrage (L_a);
- l'élasticité de L_p et L_a ;
- la hauteur de la ligne porteuse par rapport au fond en absence de forces externes (H);
- la flottabilité des bouées de coin (F_b);
- la distance horizontale entre les jambes (J);
- la flottabilité des bouées de jambe (F_j);
- le poids dans l'eau des pesées de jambe (P_j); et
- la profondeur du site (Z).

Si on assume que le poids de la ligne porteuse et des supports d'élevage est compensé par la flottabilité des bouées de jambe et de compensation, ces neuf variables déterminent quatre autres variables déterminantes de l'efficacité des filières flottantes soit :

- la tension dans la ligne porteuse au repos;
- la longueur utile de la ligne porteuse;
- la stabilité verticale de la ligne porteuse face aux courants longitudinaux;
- l'angle de traction des amarres sur les ancrages.

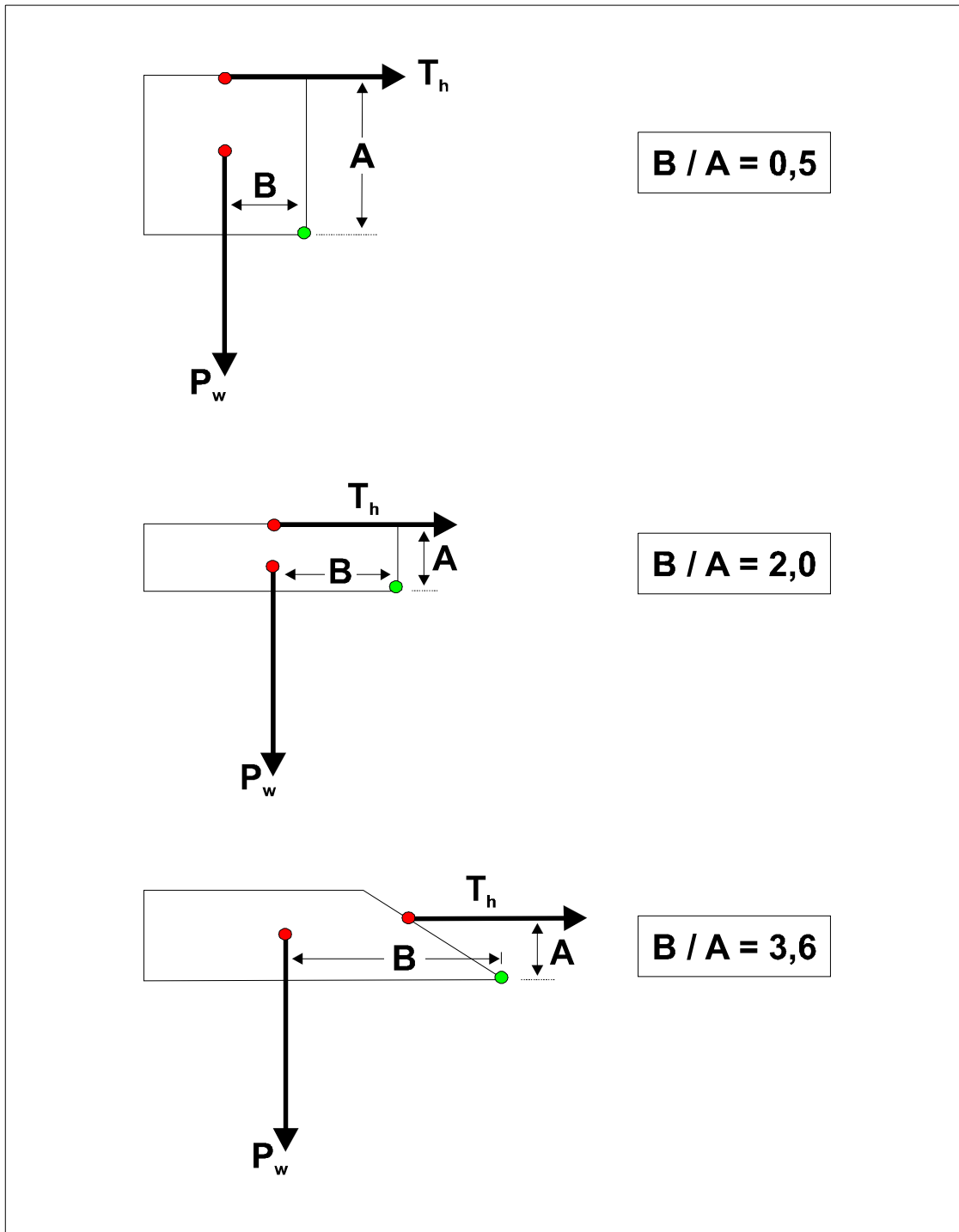
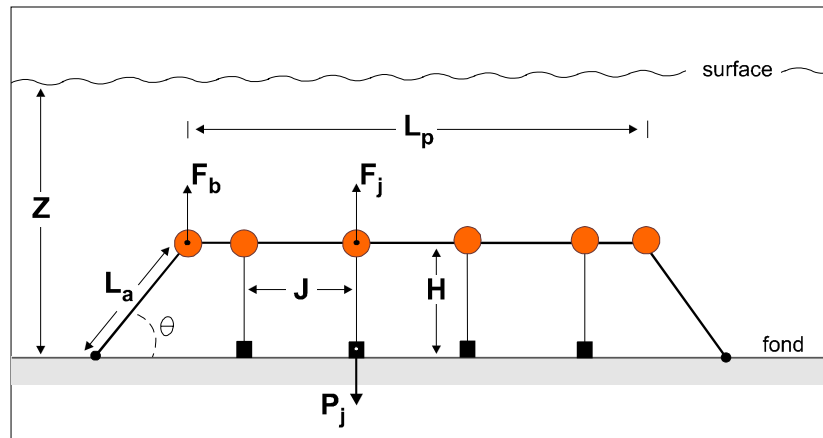


Figure 5. Stabilité relative (B/A) de trois blocs de béton de même poids par rapport à la force de renversement exercée par la traction horizontale d'une amarre.



L_p : longueur de la ligne porteuse	F_b : flottabilité des bouées de coin
L_a : longueur des lignes d'amarrage	J : distance entre les jambes
H : hauteur de la ligne porteuse	F_j : flottabilité des bouées de jambe
Z : profondeur du site	P_j : poids dans l'eau des pesées de jambe

Figure 6. Variables de base permettant de caractériser la géométrie d'une filière submergée.

Plusieurs principes qui découlent de la géométrie d'une filière peuvent être énoncés afin de mieux comprendre les forces internes qui régissent le comportement d'une filière sous l'effet des forces externes.

4.1. TENSION DANS LA LIGNE PORTEUSE AU REPOS

- La tension dans la ligne porteuse en absence de forces externes (courants, houle, relevage) est déterminée par la flottabilité des bouées de coin (F_b) et par l'angle (θ) que les lignes d'amarrage forment avec le fond (voir la Figure 6);
- La tension dans la ligne porteuse est nulle lorsque la longueur des lignes d'amarrage est égale à la hauteur de la ligne porteuse ou lorsque la bouée à l'extrémité de la ligne porteuse est reliée par une jambe à une pesée dont le poids (dans l'eau) est plus grand que la flottabilité de la bouée;
- La tension dans la ligne porteuse au repos augmente au fur et à mesure qu'on écarte les deux ancrages (i.e. en augmentant le rapport R entre la longueur des lignes d'amarrage (L_a) et la hauteur de la ligne porteuse (H); i.e. en diminuant l'angle θ) et lorsqu'on augmente la flottabilité de la bouée de coin. Il faut donc augmenter le rapport R (diminuer l'angle θ) ou augmenter la flottabilité des bouées de coin si on veut maximiser la tension dans la ligne porteuse au repos;

- L'accumulation progressive de salissures marines sur les bouées de coin a pour effet de diminuer progressivement la tension dans la ligne porteuse et la hauteur de cette dernière. En effet, les salissures sur les bouées diminuent leur flottabilité (F_b).

4.2. LONGUEUR UTILE DE LA LIGNE PORTEUSE

La longueur utile d'une filière est la longueur de la portion de la ligne porteuse accessible hors de l'eau et sur laquelle il est possible de travailler à partir d'un bateau maricole. La longueur utile d'une filière peut facilement être estimée en utilisant la méthode décrite dans les exemples de calcul n^{os} 1 et 2. Il est nécessaire de consulter le rapport intégral pour prendre connaissance des trois équations requises pour effectuer ces calculs.

- Lorsqu'on exerce une traction verticale sur un point de la ligne porteuse (pour tenter de le remonter jusqu'en surface), la hauteur maximale que ce point peut atteindre par rapport au fond dépend de la longueur de la ligne porteuse (L_p), de la hauteur de la ligne porteuse au repos par rapport au fond (H), de l'angle θ que les lignes d'amarrage forment avec le fond (c'est-à-dire du rapport R), de l'élasticité des lignes, du poids net de la partie de la filière qui est décollée du fond et de la position du point relevé par rapport aux ancrages;
- Le pourcentage utile d'une filière dans un site donné (i.e. une profondeur Z donnée) augmente avec l'augmentation de la longueur de la ligne porteuse (L_p), la diminution de la longueur des amarres, c'est-à-dire avec l'augmentation de l'angle que les amarres forment avec le fond, et l'augmentation de la hauteur de la ligne porteuse par rapport au fond (H). Par ailleurs, la longueur utile d'une filière d'une géométrie donnée diminue considérablement avec l'augmentation de la profondeur du site;
- Bien que la diminution de la longueur des amarres augmente la longueur utile d'une filière, elle a aussi pour effet de réduire la tension dans la ligne porteuse au repos. Lorsque la longueur et la hauteur des filières sont limitées par des contraintes propres au site et au type d'élevage, il y a avantage à diminuer la longueur des amarres et à augmenter la flottabilité des bouées de coin de façon à maximiser la longueur utile de la filière sans réduire la tension dans la ligne porteuse;
- Un amarrage à deux brins créé par l'ajout d'une bouée submergée sur la ligne d'amarrage est une solution moins efficace que l'augmentation de la flottabilité des bouées de coin. En effet, pour une même tension dans la ligne porteuse, un amarrage à deux brins avec bouée nécessite des ancrages plus écartés qu'un amarrage par bout avec la même flottabilité totale. Ce plus grand écartement des ancrages a pour effet de réduire la longueur utile de la filière;

EXEMPLE DE CALCUL N° 1 — LONGUEUR UTILE

Une filière a les caractéristiques suivantes :

- longueur de la ligne porteuse (Lp): 180 m
- longueur des amarres (La): 20 m
- hauteur de la ligne porteuse par rapport au fond (H): 10 m

Quelle est la longueur utile de cette filière si elle est installée à un site où la profondeur est 20 m ?

- Selon l'équation 24 :

$$R = \frac{La}{H} = \frac{20m}{10m} = 2,0$$

- Selon l'équation 25, la hauteur maximale (H_{\max}) qu'il est possible de relever le point central de la filière en assumant que les lignes n'ont aucune élasticité ni poids net est :

$$H_{\max} = 24,1 m$$

- Selon l'équation 26 :

$$A = 110,0 m$$

$$C = 107,32 m$$

$$X_{\max} = 61,37 m$$

$$\% \text{ utile} = 66,5 \%$$

Donc, la longueur utile théorique de cette filière est :

$$= 0,665 \times 180 m$$

$$= 120 m$$

EXEMPLE DE CALCUL N° 2 — LONGUEUR UTILE

Quel est l'impact d'une diminution et d'une augmentation de 50 % de la longueur des lignes, de la hauteur de la ligne porteuse et de la profondeur du site pour la filière de l'exemple de calcul 5 (Lp= 180 m; La= 20 m; H= 10 m; Z= 20 m) sur le pourcentage utile de cette filière ?

- Longueur de la ligne porteuse (Lp) :

- 50 % :	Lp = 90 m	% utile = 0 %
+ 50 % :	Lp = 270 m	% utile = 80,9 %
- Longueur des amarres (La):

- 50 % :	La = 10 m	% utile = 88,8 %
+ 50 % :	La = 30 m	% utile = 24,9 %
- Hauteur de la ligne porteuse (H):

- 50 % :	H = 5 m	% utile = 0 %
+ 50 % :	H = 15 m	% utile = 97 %
- Profondeur du site (z):

- 50 % :	Z = 10 m	% utile = 100 %
+ 50 % :	Z = 30 m	% utile = 0 %

- Un amarrage à deux brins créé par l'ajout d'une pesée sur la ligne d'amarrage aura comme conséquence de diminuer la longueur utile de la ligne porteuse pour une tension dans la ligne porteuse donnée. Ce type d'amarrage n'est donc pas recommandé pour les filières submergées;
- Un amarrage à trois brins créé par l'ajout d'une pesée et d'une bouée sur la ligne d'amarrage, aura comme effet d'augmenter la longueur utile de la ligne porteuse pour une tension donnée si la flottabilité de la bouée ajoutée est égale à ou est plus grande que la flottabilité de la bouée de coin (en assumant que le poids de la pesée ajoutée est égal à la flottabilité des deux bouées). Par contre, il diminue la longueur utile par rapport à un ancrage par bout avec une bouée de coin ayant une flottabilité égale au total de la flottabilité de la bouée d'amarrage et de coin de l'amarrage à trois brins. De plus, ce type d'amarrage est complexe et difficile à manipuler;
- Enfin, l'ajout d'un V au centre de la ligne porteuse par l'installation d'une pesée libre entre deux bouées n'est théoriquement pas une solution pour augmenter la longueur utile d'une filière. En effet, pour maintenir la tension dans la ligne porteuse avec un tel système, il faut installer de très grosses bouées et pesées, ce qui revient pratiquement à faire deux petites filières avec la filière initiale.

4.3. STABILITÉ VERTICALE DE LA LIGNE PORTEUSE FACE AUX COURANTS

- Dans une filière submergée soumise à un courant longitudinal (dirigé dans l'axe formé par les ancrages), la tension dans la ligne porteuse diminue de l'amont vers l'aval;
- Le torque qui s'exerce sur la bouée amont est beaucoup plus grand que sur la bouée aval et il en résulte que la ligne porteuse adopte une position en pente (Figure 7). La présence de jambes sur la ligne porteuse n'a pour effet que d'empêcher la partie aval de la filière de s'élever au-dessus de la hauteur qu'elle avait au repos;

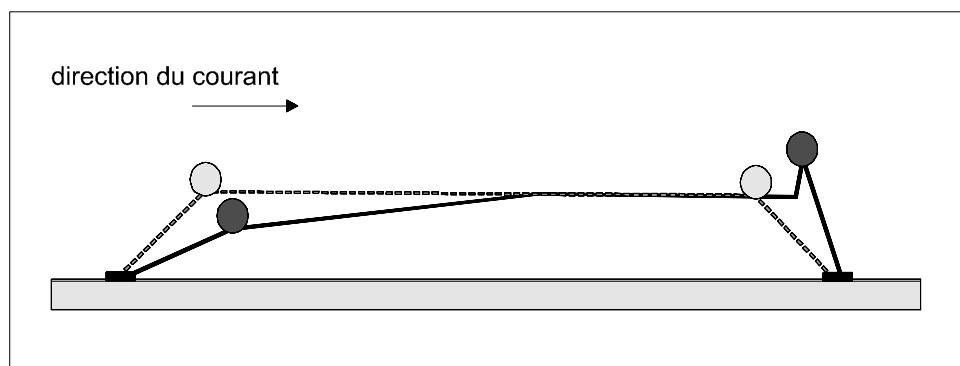


Figure 7. Profil longitudinal d'une filière submergée soumise à un courant longitudinal (les jambes et les supports d'élévation ne sont pas représentés).

- On remarquera aussi que plus l'angle que les amarres forment avec le fond au repos est petit, plus l'inclinaison de l'amarre amont par rapport à son inclinaison initiale sera faible et plus le redressement de l'amarre aval par rapport à son inclinaison initiale sera grande. Donc, l'inclinaison vers le fond d'une filière submergée dans un courant longitudinal diminue avec l'augmentation du rapport R;
- L'augmentation de la flottabilité des bouées de coin aura aussi comme effet de réduire l'inclinaison de la ligne d'amarrage amont dans le courant (voir la section 3.3);
- Dans le cas d'une filière submergée soumise à un courant latéral (dirigé perpendiculairement à l'axe formé par les ancrages), la tension dans la ligne porteuse augmente en se déplaçant du centre de la ligne porteuse vers les bouées de coin et la traction sur les deux bouées de coin est la même. Le point de la ligne porteuse qui atteint la hauteur maximale par rapport au fond et qui est le plus déporté latéralement par le courant latéral est le point central de la ligne porteuse (Figure 8);

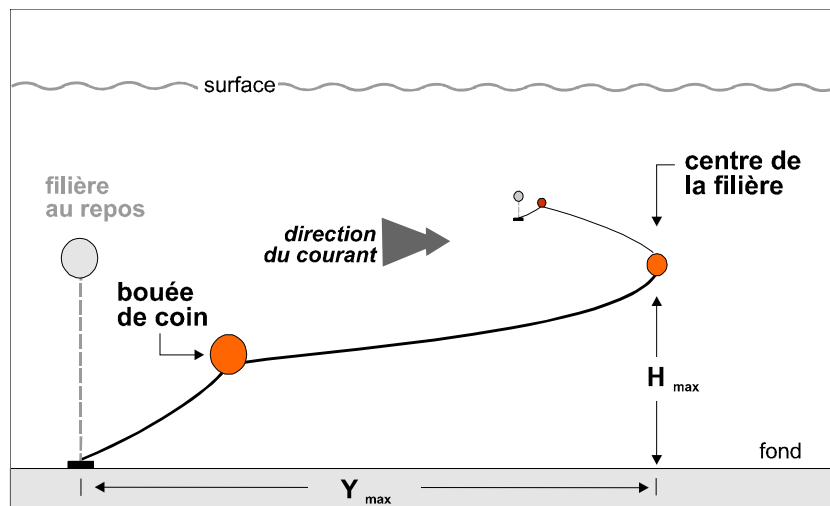


Figure 8. Profil latéral d'une filière submergée soumise à un courant latéral (les jambes et les supports d'élevage ne sont pas représentés).

- Les filières submergées ont donc une plus grande stabilité verticale face à des courants longitudinaux que latéraux et c'est pourquoi on recommande de positionner les filières en séries parallèles à l'axe principal des courants ou encore de les disposer en réseau avec des ralingues et amarres latérales.

4.4. ANGLE DE TRACTION DES AMARRES SUR LES ANCRAGES

- En présence de courants importants, les forces horizontales sur une filière submergée sont beaucoup plus importantes que les forces verticales et d'autant plus élevées que l'angle de traction sur les ancrages (angle que forment les amarres avec le fond) est petit. La

résistance des ancrages des filières submergées dépend donc en grande partie de leur résistance aux tractions horizontales.

La résistance à la traction d'un corps-mort peut être estimée à l'aide de la méthode décrite dans l'exemple de calcul n° 3. Cet exemple fait appel à des équations et des tableaux apparaissant dans le rapport intégral mais qui n'ont pas été inclus dans le présent document pour ne pas alourdir le texte. Le rapport intégral devrait être consulté pour de plus amples détails.

5. FLOTTABILITÉ DE LA FILIÈRE

5.1. NOTIONS DE BASE

La gestion de la flottabilité fait intervenir deux nouvelles variables : la flottabilité de réserve et le poids net de la filière.

La flottabilité de réserve est la force verticale nette dirigée vers le haut qui est exercée par la flottabilité des bouées de jambe, des bouées de compensation et de la ligne porteuse moins le poids (dans l'eau) des supports d'élévation et des salissures sur les lignes et les bouées.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Flottabilité} \\ \text{de réserve} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Flottabilité des} \\ \text{bouées de jambe} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Flottabilité des bouées} \\ \text{de compensation} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Flottabilité de la} \\ \text{ligne porteuse} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Poids des supports} \\ \text{d'élévation} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Poids des salissures} \\ \text{sur les lignes et bouées} \end{array} \right]$$

La flottabilité de réserve ne comprend pas la flottabilité des bouées de coin ni celle des lignes d'amarrage dont le rôle n'est pas de supporter la ligne porteuse.

Le poids net d'une filière est la force verticale nette dirigée vers le bas qui est exercée par le poids des pesées de jambe moins la flottabilité de réserve.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Poids net de} \\ \text{la filière} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Poids des} \\ \text{pesées de jambe} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Flottabilité de} \\ \text{réserve} \end{array} \right]$$

La méthode de calcul de la flottabilité d'une bouée est décrite dans l'encadré n° 4. L'encadré n° 5 est un exemple de calcul de la flottabilité de réserve et du poids net d'une filière. Les tableaux mentionnés dans ces deux exemples de calcul peuvent être consultés dans le rapport intégral.

EXEMPLE DE CALCUL N° 3 — RÉSISTANCE À LA TRACTION

À partir de quelle traction de l'amarre un bloc de béton de 1,5 x 1,2 x 0,8 m commencera-t-il à glisser sur un fond de sable limoneux dense si cette traction s'exerce à un angle de 20° par rapport au fond ? et si cette traction s'exerce à 60° ?

1) Le bloc commencera à glisser lorsque la composante horizontale de la traction (T_h) de l'amarre dépassera la force de friction statique (F_f). On recherche donc la traction critique (T_c) pour laquelle :

composante horizontale de la traction (T_h) = force de friction statique (F_f)

2) Composante horizontale de la traction (T_h)

- Pour un angle de 20° : $T_{h_{20}} = T_{c_{20}} \cos 20^\circ$
 $= 0,95 T_{c_{20}}$
- Pour un angle de 60° : $T_{h_{60}} = T_{c_{60}} \cos 60^\circ$
 $= 0,59 T_{c_{60}}$

3) Force de friction statique (F_f) (Équation 14) :

$$F_f = (\text{poids dans l'eau du bloc } (P_w) - \text{traction verticale de l'amarre } (t_v)) f$$

- Poids dans l'eau du bloc (P_w) :
 $= (1,5 \times 1,2 \times 0,8) m^3 \times 2\,300 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ (Tableau 15)
 $\times 0,55$ (Tableau 15) $\times 9,81 \text{ m} \cdot s^{-2}$
 $= 17\,870 \text{ N} (1,8 \text{ t})$
- Traction verticale de l'amarre (T_v) :
 - Pour un angle de 20° : $T_v = T_{c_{20}} \sin 20^\circ$
 $= 0,31 T_{c_{20}}$
 - Pour un angle de 60° : $T_v = T_{c_{60}} \sin 60^\circ$
 $= 0,81 T_{c_{60}}$

• Force de friction, selon 3) :

- Pour un angle de 20° :
 $F_f = (17\,870 - 0,31 T_{c_{20}}) 0,58$ (Tableau 22)

$$F_f = 10\,365 - 0,18 T_{c_{20}}$$

- Pour un angle de 60° :

$$F_f = (17\,870 - 0,81 T_{c_{60}}) 0,58$$
 (Tableau 22)

$$F_f = 10\,365 - 0,47 T_{c_{60}}$$

4) Traction critique, selon 1) :

- Pour un angle de 20° :

$$0,95 T_{c_{20}} = 10\,365 - 0,18 T_{c_{20}}$$

$$T_{c_{20}} = 9\,173 \text{ N} (935 \text{ kg})$$

- Pour un angle de 60° :

$$0,59 T_{c_{60}} = 10\,365 - 0,47 T_{c_{60}}$$

$$T_{c_{60}} = 9\,778 \text{ N} (997 \text{ kg})$$

EXEMPLE DE CALCUL N° 4 — FLOTTABILITÉ DES BOUÉES

Combien de bouées ABS gonflables de 30 cm de diamètre sont requises sur une filière submergée pour compenser le poids de 5 t (poids dans l'air) de boudins de moules ?

- À l'équilibre :

flottabilité des bouées = poids dans l'eau des boudins

- Poids dans l'eau des boudins :

$$= 5\,000 \text{ kgf} \times 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \times 0,25 \text{ (Tableau 15)}$$

$$= 12\,263 \text{ N (1\,250 kg)}$$

- Flottabilité d'une bouée :

$$= 0,95 \text{ kg}\cdot\text{l}^{-1} \text{ (Tableau 16)} \times \text{Volume}^1 \text{ (l)} \times 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$= 0,95 \text{ kg}\cdot\text{l}^{-1} \times \frac{\pi D^3}{6} \times 10^3 \text{ l} \times 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$= 0,95 \text{ kg}\cdot\text{l}^{-1} \times 14,1 \text{ l} \times 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$= 131,4 \text{ N (13,4 kg)}$$

- Nombre de bouées requis :

$$= 12\,263 \div 131,4$$

$$= 93,3 \text{ bouées}$$

1 On assume que les bouées ne sont pas comprimées par la pression hydrostatique (voir la section 4.1.2 du rapport intégral).

EXEMPLE DE CALCUL N° 5 — FLOTTABILITÉ DE RÉSERVE ET POIDS NET DE LA FILIÈRE

Une filière submergée a les caractéristiques suivantes en fin d'élevage :

- 30 bouées en ABS gonflables de 30 cm (bouées de jambes et de compensation);
- 15 pesées de jambes en béton de 10 kg (poids dans l'air);
- 1,5 t de boudins de moules (poids dans l'air).

Quelle est sa flottabilité de réserve et son poids net si on ne considère pas le poids des salissures marines sur les lignes et les bouées, la flottabilité des lignes et l'effet de la pression hydrostatique sur les bouées ?

1) Flottabilité de réserve

- Flottabilité totale :

$$\begin{aligned} &= 30 \times 131,4 \text{ N (voir l'exemple de calcul n° 4)} \\ &= 3\,942 \text{ N (402 kg)} \end{aligned}$$

- Poids des supports d'élevage dans l'eau :

$$\begin{aligned} &= 1\,500 \text{ kg} \times 0,25 \text{ (Tableau 15)} \times 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \\ &= 3\,679 \text{ N (375 kg)} \end{aligned}$$

- Flottabilité de réserve :

$$\begin{aligned} &= 3\,942 - 3\,679 \\ &= 263 \text{ N (27 kg)} \end{aligned}$$

2) Poids net de la filière

- Poids total des pesées de jambe dans l'eau :

$$\begin{aligned} &= 15 \times 10 \text{ kg} \times 0,55 \text{ (Tableau 15)} \times 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \\ &= 809 \text{ N (82,5 kg)} \end{aligned}$$

- Poids net de la filière :

$$\begin{aligned} &= 809 \text{ N} - 263 \text{ N} \\ &= 546 \text{ N (56 kg)} \end{aligned}$$

La flottabilité de réserve positive et le poids net de la filière positif indiquent que les pesées de jambe reposent sur le fond, que les jambes sont tendues et que la ligne porteuse (en absence de courants et de houle) flotte à la profondeur désirée.

5.2. GESTION DE LA FLOTTABILITÉ

La gestion de la flottabilité d'une filière submergée peut se situer entre les deux approches extrêmes suivantes :

Filières sans jambes et ajustements fréquents de la flottabilité. Avec cette première approche, il n'y a pas de jambe sur la filière. La gestion de la flottabilité consiste à ajouter aux endroits appropriés sur la ligne porteuse et aux moments opportuns en cours d'élevage des bouées de façon à ce qu'il y ait en tout temps et sur toute la longueur de la ligne porteuse équilibre entre la flottabilité des bouées et le poids de la ligne et des supports d'élevage. Avec cette approche, la flottabilité de réserve et le poids net de la filière sont théoriquement nuls en tout temps.

Filière avec jambes sans ajustement de la flottabilité. La deuxième approche consiste à aménager dès le début de l'élevage toute la flottabilité qui sera requise jusqu'en fin d'élevage. Avec cette approche, la flottabilité de réserve est très élevée au début de l'élevage et diminue progressivement avec l'accumulation de salissures marines et la croissance des mollusques. De son côté, le poids net de la filière augmente au cours du cycle d'élevage et atteint une valeur maximale lors de la récolte.

La première approche comporte trois avantages et trois désavantages importants par rapport à la deuxième approche.

Premier avantage — La filière sans jambe permet de maintenir le poids net de la filière à un minimum. Dans le cas de la deuxième approche, puisque le poids total des pesées de jambes doit être supérieur à la flottabilité totale requise pour supporter toute la ligne en fin d'élevage, on augmente ainsi considérablement le poids de la filière lorsque celle-ci est remontée à la surface en fin d'élevage. Compte tenu de la capacité limitée des équipements utilisés par les mariculteurs, cette approche limite considérablement la longueur que les filières en eaux profondes peuvent avoir.

Deuxième avantage — La filière sans jambe minimise la force de traînée exercée par les courants et la houle sur la filière et la traction exercée sur les ancrages. En effet, avec la deuxième approche, le volume total de bouées est élevé dès le début de l'élevage.

Troisième avantage — La filière sans jambe maximise l'élasticité structurelle de la filière car la ligne porteuse se déforme plus facilement et l'effet de la houle se répercute sur toute sa longueur un peu comme une onde sinusoïdale. En présence de jambes, les points d'attache sont autant de « noeuds » qui réduisent la souplesse de la ligne porteuse et sa capacité à onduler sous l'effet de la houle. Dans ce cas, l'amplitude des mouvements verticaux de la ligne est maximale au centre de chaque tronçon et diminue à l'approche des points d'attache de

chaque pesée de jambe, ce qui entraîne des accélérations brusques des supports d'élevage et des coups de fouet qui sont d'autant plus prononcés que la distance entre les jambes est courte.

Premier désavantage — L'approche qui consiste à ajuster la flottabilité à intervalles réguliers, même lorsqu'elle est parfaitement réussie, n'a pour effet que d'assurer la flottabilité neutre de la filière et non pas sa position verticale dans la colonne d'eau. En effet, lorsqu'une ligne porteuse sans jambes a une flottabilité à peu près neutre (flottabilité de réserve égale à 0), sa position verticale en absence de houle et de courants dépend de la tension dans la ligne porteuse, c'est-à-dire de la flottabilité des bouées de coin et de l'angle d'amarrage (voir la section 4.1). Par ailleurs, en présence de courants, son inclinaison vers le fond ne dépend que de la flottabilité des bouées de coin. Si cette filière n'est pas munie de telles bouées, elle sera complètement couchée sur le fond par les courants. Par contre, avec la deuxième approche, on peut aménager sur les jambes suffisamment de flottabilité pour que la flottabilité de réserve demeure élevée en fin d'élevage. Une telle filière sera donc moins inclinée vers le fond par les courants qu'une autre filière munie de jambes et dont la ligne porteuse a une flottabilité neutre en fin d'élevage.

Deuxième désavantage — L'ajustement de la flottabilité au cours du grossissement laisse très peu de place à l'erreur dans la gestion de la flottabilité. En effet, les ajustements de la flottabilité doivent être exacts sinon les dommages possibles sont importants. Puisque, dans le cas des filières submergées, on ne dispose pas d'indicateurs tangibles de l'exactitude des ajustements de flottabilité réalisés (des bouées de surface par exemple) à moins de faire des observations en plongée, cette approche comporte un risque élevé pour la viabilité de la filière. Par contre, dans le cas de la deuxième approche, il est possible de surdimensionner les jambes (bouées et pesées) pour inclure un facteur de sécurité dans la gestion de la flottabilité.

Troisième désavantage — L'ajustement de la flottabilité à intervalles réguliers est coûteux en main-d'œuvre comparativement à une filière avec jambes qui ne requiert théoriquement aucun travail supplémentaire pour ajuster la flottabilité en cours d'élevage.

La gestion optimale de la flottabilité d'une filière submergée est probablement un compromis entre les deux extrêmes décrits ci-dessus, à savoir :

- une flottabilité de réserve en début d'élevage élevée mais plus petite que la flottabilité totale requise en fin d'élevage;
- l'ajustement de la flottabilité en fin d'élevage de façon à ce que la flottabilité de réserve demeure élevée jusqu'à la récolte.

6. LES ANCRAGES

Les trois types d'ancrage utilisés à l'heure actuelle par les mariculteurs québécois sont le corps-mort (en béton ou en granite), l'ancre japonaise et le pieu à hélice. Leurs caractéristiques (taille, type de matériau, résistance à la traction, mode d'installation, etc.) sont présentées dans le rapport intégral (voir la section 4.3). Les avantages et inconvénients de ces trois types d'ancrage sont décrits de façon sommaire au Tableau 1.

Les corps-morts sont le type d'ancrage le plus utilisé au Québec. Leurs principaux désavantages sont leur faible poids submergé et le fait que leur résistance à la traction horizontale dépend de l'importance de la traction verticale exercée sur eux. Par conséquent, il est difficile d'estimer leur résistance à la traction même lorsque la nature des sédiments est connue. Sur les concessions situés en milieu exposé, la masse des blocs de béton qui ancrent les filières submergées est de 2 à 3 t et la capacité hydraulique des équipements de levage à bord des bateaux n'est pas suffisante pour les manipuler. Les blocs doivent donc être remorqués sous les bateaux jusqu'au site d'élevage et une telle opération est longue, coûteuse et représente un risque à la sécurité des travailleurs.

L'ancre japonaise peut être fabriquée de façon artisanale à un coût relativement bas. Bien que peu documentée, sa résistance à la traction apparaît être particulièrement élevée lorsqu'elle est installée de façon convenable à au moins trois mètres sous la surface des sédiments. Son principal désavantage est qu'elle ne peut être enfouie que dans des sédiments meubles de sable ou de vase. La méthode d'installation (excavation du sol par un jet d'eau délivré à l'aide d'un tube rigide) nécessite que le bateau soit particulièrement stable de sorte que les conditions de vague sont un important facteur limitant l'utilisation de cette ancre en milieu exposé. L'importance de l'abrasion du câble d'amarrage au contact des sédiments n'est pas connue mais n'apparaît pas être une contrainte majeure.

Le pieu à hélice peut également être fabriqué de façon artisanale à un coût relativement bas. Cette ancre peut être installée dans des sédiments de texture variée et sa résistance à la traction peut être estimée à partir de la force de torsion générée lors de son insertion dans le substrat. Son principal désavantage est que son installation requiert un équipement hydraulique spécialisé. L'installation à partir de la surface de la glace est la méthode la plus répandue au Québec et dans les Maritimes. Dans le cas d'une installation effectuée à partir d'un bateau, elle ne peut être envisagée que dans les sites abrités peu profonds (profondeur de moins de 7-9 m) puisque l'embarcation doit être stable lors de l'installation.

Précisons enfin que le rapport intégral décrit trois autres types d'ancrage potentiellement intéressants pour fixer les filières flottantes qui ne sont pas traités dans le présent document.

Tableau 1. Avantages et inconvénients des trois types d'ancrage utilisés au Québec sur les filières flottantes submergées.

TYPE D'ANCRAGE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Corps-mort (en béton)	<ul style="list-style-type: none"> • Peu coûteux, facile à fabriquer et les matériaux sont facilement disponibles. • La filière n'est pas perdue même si le bloc est délogé. 	<ul style="list-style-type: none"> • La résistance à la traction est surtout fonction de la masse du corps-mort qui, dans l'eau de mer, n'est plus que 55 % de sa masse dans l'air. • La résistance horizontale à la traction horizontale dépend de l'importance de la traction verticale exercée sur eux. • La résistance à la traction peut difficilement être estimée. • La capacité des équipements hydrauliques est dépassée lorsque des blocs de 2-3 t sont manipulés.
Ancre japonaise	<ul style="list-style-type: none"> • Possible de fabriquer une ancre artisanale à un coût relativement bas (30 à 60 \$ l'unité). • Une ancre peut être conçue selon la force de traction à laquelle elle est soumise. • Une ancre légère, peu encombrante et facile à manipuler. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ancre non disponible actuellement sur le marché nord-américain. • La résistance à la traction verticale ou horizontale est peu documentée mais est élevée (entre 12 et 20 t pour une ancre enfouie à 3 m dans le sol). • La résistance à la traction ne peut être estimée autrement que par des tests de traction. • L'installation de l'ancre requiert un jet d'eau pour excaver les sédiments. • Ne convient que dans les fonds meubles de sable et de vase et n'est pas recommandée sur des fonds graveleux ou caillouteux. • Le bateau doit être très stable au moment de l'installation pour assurer que le tube d'insertion soit vertical. • Les dommages aux filières peuvent être élevés si une ancre cède. • Abrasion probable (mais non documentée) du câble d'amarrage à sa jonction à l'interface eau/sédiment.
Pieu à hélice	<ul style="list-style-type: none"> • Possible de fabriquer une ancre artisanale à un coût relativement bas (25-30 \$ l'unité). • L'ancre peut être conçue selon la nature des sédiments et la force de traction à laquelle elle est soumise. • Une ancre légère, peu encombrante, facile à manipuler et qui peut être réutilisée • Il est possible d'estimer la résistance axiale à la traction de l'ancre à partir de la force de torsion requise pour l'installer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiert un équipement hydraulique particulier. • L'installation sur l'eau est limitée à des profondeurs de moins de 7 à 9 m. • Les dommages à la filière peuvent être importants si un pieu cède. • Abrasion probable (mais non documentée) du câble d'amarrage à sa jonction à l'interface eau-sédiments.

TYPE D'ANCRAGE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
	<ul style="list-style-type: none">• La résistance axiale à la traction peut être estimée à partir des propriétés du sol et de la taille et du nombre d'hélices.• Des modèles en acier galvanisé sont disponibles sur le marché.• L'installation est possible dans différents types de substrat incluant les fonds graveleux ou caillouteux.	

Les constatations suivantes concernant le type d'ancrage des filières submergées peuvent être faites :

- Les corps-morts sont le type d'ancrage le moins performant pour maintenir les filières flottantes submergées puisque leur résistance à la traction horizontale dépend de l'importance de la traction verticale exercée sur eux, ce qui n'est pas le cas des ancres à enfouissement direct comme les pieux à hélice ou les ancres japonaises. En effet, la force de friction entre le corps-mort et les sédiments dépend de la pression exercée par le bloc sur les sédiments. Or, la traction verticale exercée par les amarres diminue cette pression. Dans le cas des ancres enfouies dans les sédiments, la pression exercée par le sol sur l'ancre est indépendante de la traction verticale des amarres, du moins jusqu'à ce qu'il y ait décollement de l'ancre;
- La surface de contact avec les sédiments (i.e. la résistance à la traction horizontale) peut être réduite par le décollement partiel du corps-mort ou le poinçonnement des sédiments par le corps-mort sous l'effet de la houle, ce qui n'est pas le cas des ancrages enfouis dans les sédiments;
- La résistance des corps-morts à la traction horizontale dépend de leur forme. Cette résistance augmente :
 - avec la diminution de la distance verticale entre le point d'attache de l'amarre et la base du corps-mort (distance A sur la Figure 5);
 - avec l'augmentation de la distance horizontale entre le centre de gravité du corps-mort et le périmètre de sa base (distance B sur la Figure 5).

En dépit du fait que la résistance à la traction des trois types d'ancrage en usage au Québec est peu ou pas connue, on peut affirmer que les ancres à enfouissement direct (pieu à hélice et ancre japonaise) sont plus performantes que les corps-morts et devraient être favorisées. Leur performance a toutefois été peu documentée jusqu'à maintenant de sorte que les données disponibles ne permettent pas d'optimiser leur configuration ni d'améliorer les méthodes d'installation. L'une des principales lacunes demeure sans contredit l'absence de données sur la nature et les propriétés des sédiments des sites maricoles exploités au Québec.

7. CRITÈRES DE CONCEPTION D'UNE FILIÈRE OPTIMALE

L'optimisation de la conception d'une filière submergée est le résultat de plusieurs compromis. En effet, il y a un compromis à faire pour choisir :

- la flottabilité des bouées de coin;
- la longueur de la ligne porteuse;

- la résistance et l'élasticité des lignes;
- la hauteur de la filière;
- le rapport (R) entre la longueur des lignes d'amarrage et la hauteur de la ligne porteuse;
- la distance entre les jambes;
- la flottabilité des bouées de jambe; et
- le poids des pesées de jambe.

La grande complexité des interactions entre les facteurs en jeu fait que le recours à des modèles mathématiques bien adaptés à la résolution de tels problèmes a été nécessaire. De tels modèles ont été développés spécifiquement pour les filières submergées dans le cadre de la présente étude. Ils ont fourni des résultats satisfaisants et permettent d'optimiser la conception des filières flottantes en autant que les valeurs de base utilisées dans ces modèles sont exactes et précises.

Les résultats des modélisations réalisées dans le cadre de la présente étude ne peuvent pas servir à l'optimisation de la conception des filières flottantes parce qu'ils comportent une grande marge d'erreur associée à des lacunes importantes dans les connaissances quant aux facteurs environnementaux et aux propriétés mécaniques de certaines composantes des filières. Les principales sources d'imprécision dans les résultats sont les valeurs choisies pour :

- la vitesse des courants;
- le coefficient de traînée de toutes les composantes de la filière avec des salissures marines;
- le poids volumique des différents types de support d'élevage;
- le poids des salissures marines sur les lignes et bouées;
- l'élasticité des lignes;
- la résistance des différents types d'ancrages à la traction.

8. RÈGLES DE BASE

Il est possible d'énoncer certaines règles à respecter pour la conception des filières submergées en usage au Québec, leur agencement sur les concessions et le choix de leurs composantes. Ces règles vont aider les mariculteurs dans le choix des améliorations à apporter aux filières flottantes pour accroître leur stabilité et leur rendement et faciliter leur manipulation.

Les règles applicables aux filières submergées disposées en série sont les suivantes :

- 1) Les courants et le relevage en surface sont les deux forces externes qui génèrent le plus de force sur les ancrages, les lignes et les supports de relevage.
- 2) Les forces exercées par un courant sur les ancrages et les lignes sont proportionnelles au carré de sa vitesse. Pour une vitesse donnée, ces forces augmentent :
 - avec l'augmentation de la flottabilité totale installée sur la filière;
 - avec la diminution du diamètre des bouées (pour la même flottabilité totale);
 - avec l'accumulation de salissures marines sur la filière.
- 3) L'inclinaison vers le fond d'une filière par les courants dépend du rapport entre la force horizontale exercée par les courants et la force verticale nette exercée par les bouées de coin et la flottabilité de réserve. Pour un courant de vitesse donnée, cette inclinaison diminue :
 - avec l'augmentation :
 - de la flottabilité de réserve sur la filière;
 - du diamètre des bouées (pour la même flottabilité totale).
 - en changeant la forme des bouées (de sphérique à ellipsoïdale);
 - en changeant l'orientation de la filière par rapport à l'axe principal des courants de normale à parallèle.

Cette inclinaison augmente avec le temps en raison de l'augmentation de la section et du coefficient de traînée des composantes de la filière (salissures marines) et de la diminution de la flottabilité de réserve (salissures marines et croissance des mollusques).

- 4) Les forces générées sur les ancrages, les lignes et les supports de relevage lorsqu'une filière est hissée à la surface diminuent et la longueur utile de la filière (%) augmente :
 - avec l'augmentation de :
 - la longueur de la ligne porteuse;
 - la hauteur de la ligne porteuse par rapport au fond;
 - l'élasticité des lignes; et
 - avec la diminution de :
 - la profondeur du site;
 - le rapport entre la longueur des amarres et la hauteur de la filière par rapport au fond (rapport R);

- le poids total des pesées de jambe; donc de la flottabilité de réserve qui est installée sur la filière en début d'élevage qui détermine le poids total des pesées de jambes qui doit être installé pour compenser cette flottabilité de réserve.

Ces forces augmentent avec le temps en raison de la diminution de la flottabilité de réserve (avec l'augmentation du poids des salissures marines et des mollusques).

- 5) L'augmentation de la flottabilité des bouées de coin augmente la tension dans la ligne porteuse au repos, permet de diminuer la longueur des amarres tout en maintenant cette tension et permet un espacement plus grand des jambes sur la ligne porteuse.
- 6) Les accélérations générées par une houle sur les supports d'élevage diminuent :
 - avec l'augmentation :
 - de la profondeur de la filière;
 - du diamètre des bouées (pour une même flottabilité totale).
 - avec la diminution :
 - de l'élasticité des lignes;
 - du volume total de flottabilité sur la filière;
 - du nombre de jambes sur la filière.
- 7) En absence d'autres forces externes, la traction horizontale des amarres sur les ancrages reliés à deux filières (disposition en série) est égale à la force de traînée exercée par le courant (horizontal) sur toutes les composantes de la filière (sauf les ancrages) plus la tension dans la ligne porteuse au repos. En présence de courants importants, la traction horizontale des amarres ne varie pas significativement en fonction de l'orientation de la filière par rapport à l'axe principal des courants ni en fonction de la géométrie des amarres. Cette composante horizontale de la traction diminue :
 - avec la diminution :
 - du volume total de flottabilité sur la filière;
 - de la quantité totale de salissures marines sur la filière; et
 - avec l'augmentation :
 - du diamètre des bouées (pour un même volume total);
 - en changeant la forme des bouées de sphérique à ellipsoïde.
- 8) En absence de houle et de traction de relevage, la traction verticale des amarres sur les ancrages reliés à deux filières (disposition en série) est égale au total de la flottabilité des bouées de coin et de la flottabilité de réserve sur la partie de la filière couchée vers le fond

par les courants (aucune tension dans les jambes). Cette composante de la traction diminue :

- avec l'augmentation :
 - du poids de salissures marines sur la filière;
 - du poids de la pesée d'un amarrage à deux brins; et
- avec la diminution :
 - de la flottabilité de la bouée de coin;
 - de la flottabilité de réserve sur la ligne porteuse;
 - de la flottabilité de la bouée d'un amarrage à deux brins.
- en changeant l'orientation de la filière par rapport à l'axe principal des courants de latérale à longitudinale.

9) Avec le temps, au cours du cycle d'élevage :

- la composante horizontale de la traction des amarres sur les ancrages augmente; et
- la composante verticale de la traction des amarres sur les ancrages diminue.

10) La résistance des corps-morts à la traction horizontale diminue avec l'augmentation de la traction verticale des amarres. Cela n'est cependant pas le cas pour les ancrages japonais et les pieux à hélice.

11) Lorsque la nature du substrat le permet, utiliser des ancrages à enfouissement direct (par exemple l'ancre japonaise ou le pieu à hélice) qui offrent une meilleure résistance à la traction particulièrement dans les sites exposés où les sollicitations sur les ancrages sont importantes.

12) La stabilité des bateaux face à la traction verticale exercée par le relevage d'une filière augmente :

- avec l'augmentation de :
 - son poids;
 - sa largeur.
- avec la diminution de :
 - la hauteur de son centre de gravité.