

VOIES NAVIGABLES SÉCURITAIRES

(GUIDE CONCERNANT LA CONCEPTION, L'ENTRETIEN
ET L'UTILISATION SÉCURITAIRE DES VOIES DE NAVIGATION)

Partie 1(a)

LIGNES DIRECTRICES POUR UNE CONCEPTION SÉCURITAIRE DE CHENAUX COMMERCIAUX



Publié par la division du Développement des voies navigables, GARDE CÔTIÈRE CANADIENNE

(Décembre 2001)



Fisheries and Oceans
Canada

Pêches et Océans
Canada

Canada

INTRODUCTION

Dans des voies navigables où l'on s'attend à ce que le trafic fasse usage de toute la disponibilité de profondeur et de largeur, il est nécessaire d'établir un équilibre entre le besoin des usagers (maximisation de la rentabilité économique pour l'industrie) et le besoin de première importance de suivre des normes de sécurité adéquates. Ceci demande des analyses et une description exhaustive des relations entre les paramètres relatifs aux navires, à la voie navigable et aux conditions climatiques. De plus d'autres facteurs comme le taux d'ensablement, les besoins d'entretien, la disponibilité d'aides à la navigation, le service de pilotage, les options d'évacuation des déblais de dragage (si le dragage est envisagé), les impacts d'ordre économique et environnemental doivent être pris en considération.

Ce document se veut un guide exposant une série de procédures à suivre pour évaluer les paramètres nécessaires à la conception d'une voie navigable permettant une navigation efficiente et un minimum adéquat de marges de sécurité.

Les procédures décrites servent à déterminer la largeur de la voie navigable, sa profondeur, la pente des parois, sa courbure et son tracé. Les présentes lignes directrices ont été élaborées pour des voies navigables où circulent des navires de charge, des navires-citernes et des vraquiers. Elles ne visent pas à remplacer une analyse plus approfondie pour la conception finale de la voie navigable. Toute application de lignes directrices demande un bon jugement, de l'expérience ainsi qu'un sens pratique certain.

Les méthodes sont basées sur les caractéristiques opérationnelles des navires; elles visent à exposer les exigences conceptuelles à satisfaire aux fins de la sécurité et de l'efficience de la navigation. La procédure de conception de chaque élément de la géométrie de la voie navigable est exposée, afin de permettre à l'utilisateur d'optimiser cette conception.

Pour les fins de ce document, les termes «voie navigable» et «chenal» sont utilisés indifféremment.

TABLE DES MATIÈRES

1 — Variables nécessaires à la conception du chenal.....	5
1.1 Navire	5
1.2 Voie navigable.....	5
1.3 Données des études de base	5
1.4 Niveau d'eau	6
2 — Largeur	10
2.1 Couloir de manoeuvre.....	10
2.2 Largeur d'interaction hydrodynamique	12
2.3 Effets du vent et du courant	13
2.4 Effet de berge (dégagement de la berge)	14
2.5 Aides à la navigation/Service de pilotes	15
2.6 Autres tolérances	15
3 — Profondeur	18
3.1 Tirant d'eau statique du navire «cible»	18
3.2 Assiette	20
3.3 Tolérance de marée	20
3.4 Squat (déjaugage)	20
3.5 Tolérance d'exposition	22
3.6 Correction pour eau douce	22
3.7 Tolérance de matériau de fond	22
3.8 Marge de manoeuvrabilité.....	23
3.9 Tolérance de surprofondeur.....	23
3.10 Transition de profondeur	23
4 — Inclinaison des parois.....	24
5 — Coudes.....	25
5.1 Rayon de courbure.....	25
5.2 Largeur.....	26
5.3 Transitions	26
5.4 Distance entre les courbes	27
6 — Dégagement de pont	30
6.1 Généralités	30
6.2 Passe marinière	30
6.3 Hauteur libre	30
7 — Conception économiquement optimale.....	31
BIBLIOGRAPHIE.....	32

LISTE DES FIGURES

figure 1: PARAMÈTRES - VUE GÉNÉRALE.....	7
figure 2: PARAMÈTRES - LARGEUR	8
figure 3: PARAMÈTRES - PROFONDEUR.....	9
figure 4: COMPOSANTES DE LA LARGUER D'UN CHENAL	11
figure 5: COMPOSANTES DE LA PROFONDEUR DE LA VOIE NAVIGABLE	19
figure 6: DÉTERMINATION DE LA PORTÉE DE L'AVANCE DU NAVIRE.....	28
figure 7: COURBE TYPE À ÉLARGISSEMENT PARALLÈLE.....	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Coefficients de manoeuvrabilité - divers types de navire	12
Tableau 2: Largeur de compensation pour la densité du trafic.....	13
Tableau 3: Compensation requise pour effets des vents de travers	13
Tableau 4: Compensation requise pour effets des transcourants	14
Tableau 5: Largeur de compensation requise pour effet de berge	15
Tableau 6: Compensation selon l'état des aides à la navigation.....	15
Tableau 7: Compensation selon le niveau de risque de la cargaison.....	16
Tableau 8: Compensation pour rapport profondeur/tirant d'eau	16
Tableau 9: Compensation selon le matériau du lit du chenal	16
Tableau 10: Tolérance d'exposition.....	22
Tableau 11: Tolérance selon le matériau de fond.....	23
Tableau 12: Pentés des parois recommandées	24
Tableau 13: Rayon de courbure du coude du chenal	25
Tableau 14: Zone de transition, rapports L_t/W_a	27

1 — VARIABLES NÉCESSAIRES À LA CONCEPTION DU CHENAL

Au moins les variables suivantes sont requises pour déterminer les dimensions minimales de la voie navigable nécessaires à la sécurité de la navigation :

1.1 NAVIRE

L'élément fondamental, dans la conception de la voie navigable, est le choix du navire «cible»¹. Les paramètres de la manoeuvre dans la voie navigable sont évalués en fonction du navire «cible», lequel est normalement le plus gros bâtiment devant pouvoir naviguer de façon sécuritaire et efficace dans la voie navigable. Les paramètres requis pour le navire «cible» sont les suivants :

- Longueur (L)
- Largeur (B)
- Tirant d'eau maximal (d)
- Vitesse (V)
- Manoeuvrabilité - détermination qualitative de la manoeuvrabilité du navire par comparaison à d'autres navires.
- Densité du trafic - niveau de trafic dans la voie navigable.

1.2 VOIE NAVIGABLE

Les paramètres de la voie navigable sont déterminés à partir des programmes de terrain ou des données dont on dispose à cette fin. Ces paramètres sont les suivants :

- Caractéristiques des matériaux du fond
- Profondeur
- Vitesse et direction du courant
- Vitesse et direction du vent
- Hauteur des vagues
- Aides à la navigation / service de pilotage

1.3 DONNÉES DES ÉTUDES DE BASE

Les données sont tirées des études de base qui consistent en l'analyse et l'évaluation des éléments suivants :

1. Navire «cible» et autres navires à fort tirant d'eau utilisant la voie navigable :
 - a) manoeuvrabilité et vitesse
 - b) nombre et fréquence d'utilisation du chenal
 - c) type de cargaison

¹ Il peut y avoir plus d'un navire cible pour une voie navigable. Il peut y en avoir un pour la circulation à sens unique et un autre pour la circulation à double sens, il peut également y en avoir un pour la largeur minimale et un autre pour la profondeur minimale.

2. Autres navires utilisant la voie de navigation :
 - a) types de navires plus petits et densité du trafic
 - b) navires traversiers

3. Conditions météorologiques :
 - a) vent (vitesse, direction et durée)
 - b) vagues (hauteur, période, direction et durée)
 - c) visibilité (pluie, smog, brouillard et neige, y compris la durée et la fréquence de ces éléments)
 - d) glace (fréquence, durée et épaisseur)
 - e) niveaux d'eau anormaux (élevés ou bas)

4. Caractéristiques de la voie navigable :
 - a) courants, de marée et/ou fluviaux (vitesse, direction et durée)
 - b) granulométrie et répartition des sédiments, mouvements et affouillements importants et hauts-fonds
 - c) type de lit et de berge (mou ou dur)
 - d) tracé et configuration
 - e) apport d'eau douce
 - f) marées
 - g) salinité
 - h) aires de déversement des déblais de dragage
 - i) température
 - j) qualité de l'eau
 - k) population faunique (type, densité, répartition et migration)
 - l) obstacles (tels qu'épaves de navires et structures abandonnées)
 - m) ponts et traverses de lignes électriques existants (emplacement, type et dégagements)
 - n) étranglements de la voie
 - o) câbles et pipelines immergés

Les paramètres d'entrée sont utilisés pour élaborer les exigences relatives à la largeur et à la profondeur, comme le montrent les diagrammes de la figure 1.

1.4 NIVEAU D'EAU

La profondeur de la voie navigable doit être établie en fonction du navire au tirant d'eau le plus fort devant y circuler. Il n'est toutefois pas nécessaire que cette profondeur soit assurée en tout temps. Le navire au plus fort tirant d'eau peut devoir planifier son passage de façon à ce qu'il se fasse durant les périodes de niveau d'eau élevé (marée haute). Le choix du tirant d'eau de référence doit être basé sur une analyse économique du coût des retards occasionnés aux navires, des opérations et du transport à faible charge par comparaison aux coûts de construction et d'entretien. (référence: 1)

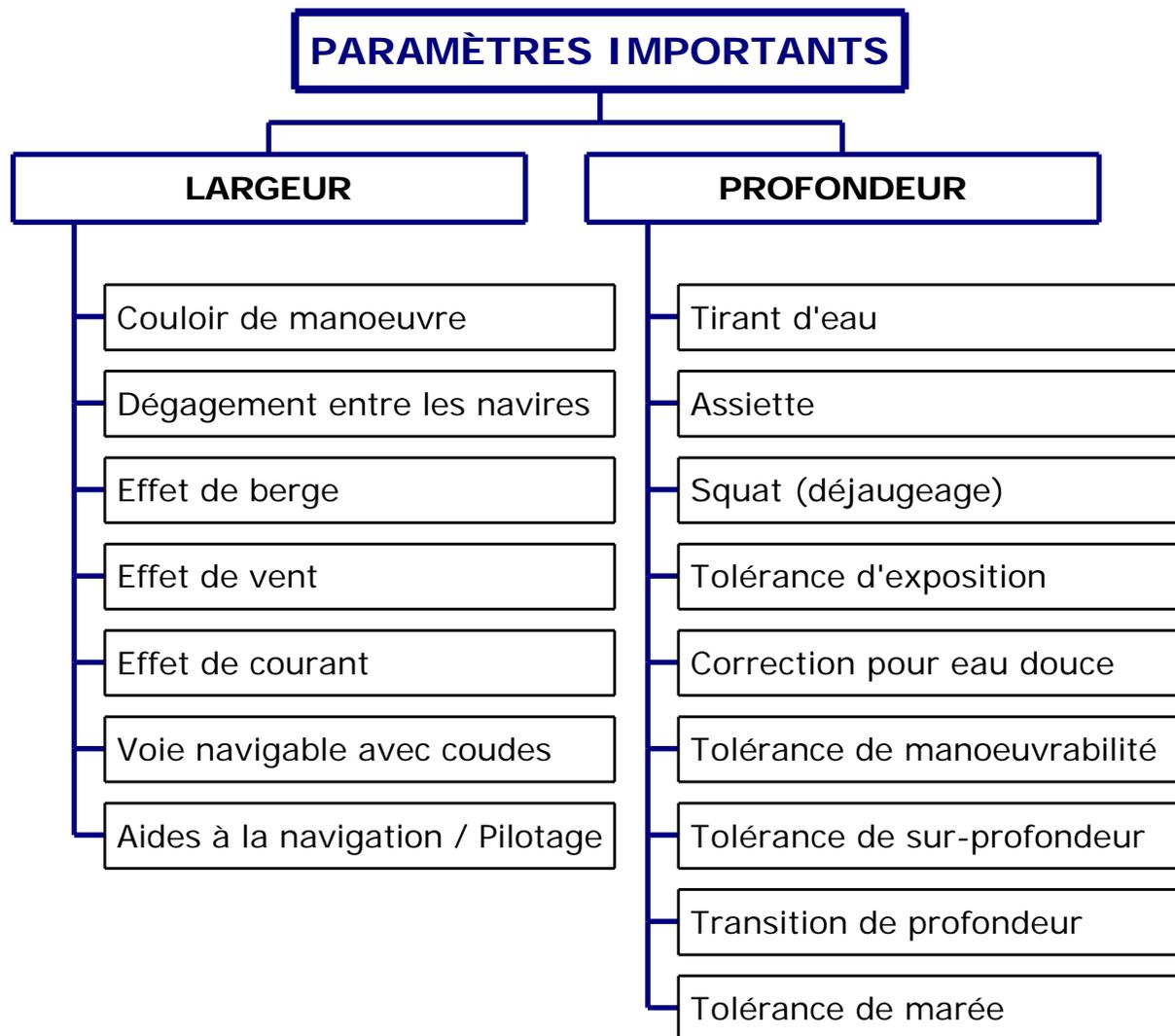


figure 1: PARAMÈTRES IMPORTANTS DANS LA CONCEPTION D'UNE VOIE NAVIGABLE - VUE GÉNÉRALE²

² Le terme anglais "squat" qui semble de plus en plus accepté dans le milieu technique, sera utilisé dans ce document en lieu de "déjaugage".

PARAMÈTRES - LARGEUR

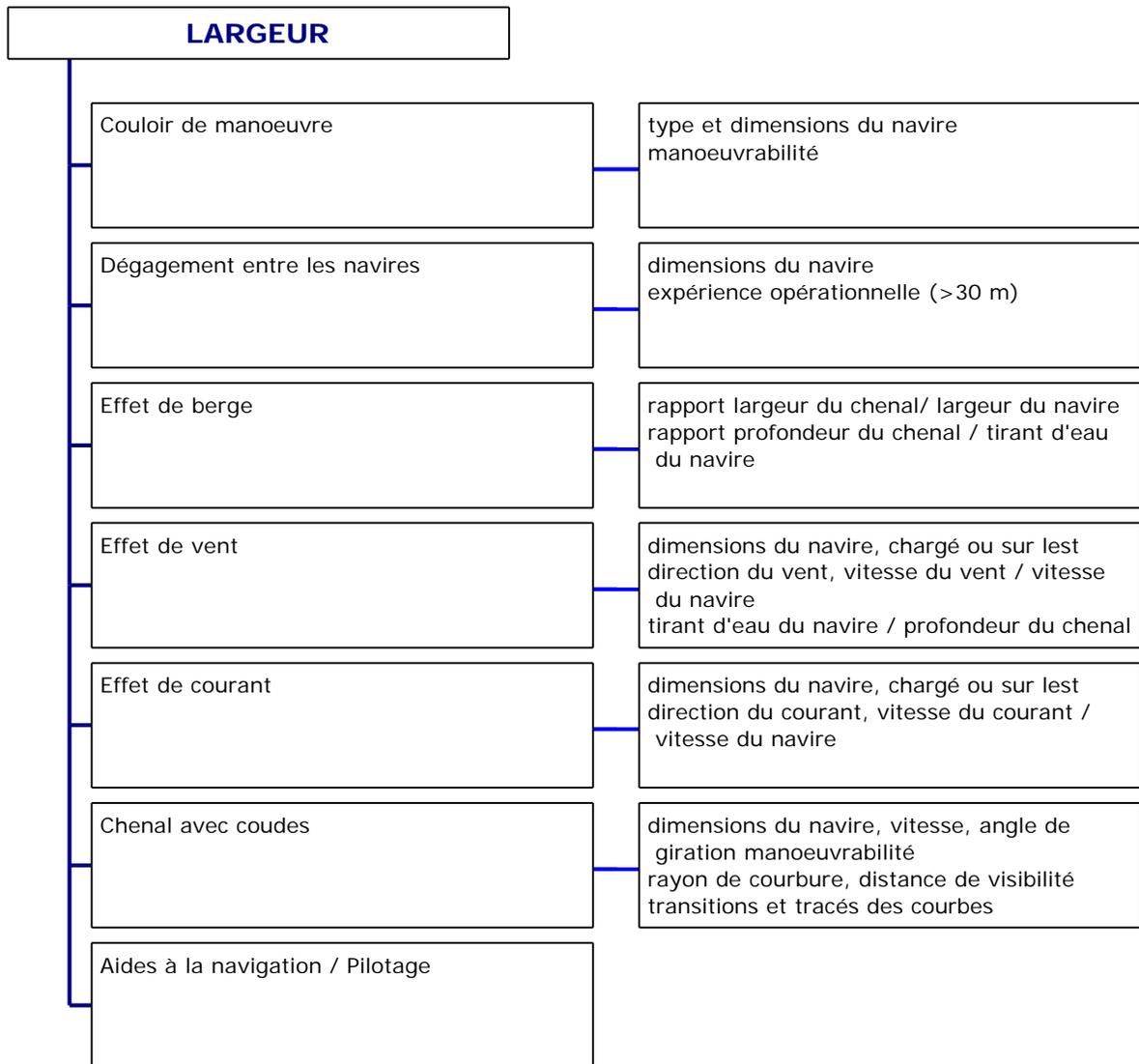


figure 2: PARAMÈTRES IMPORTANTS DANS LA CONCEPTION D'UNE VOIE NAVIGABLE - LARGEUR

PARAMÈTRES - PROFONDEUR

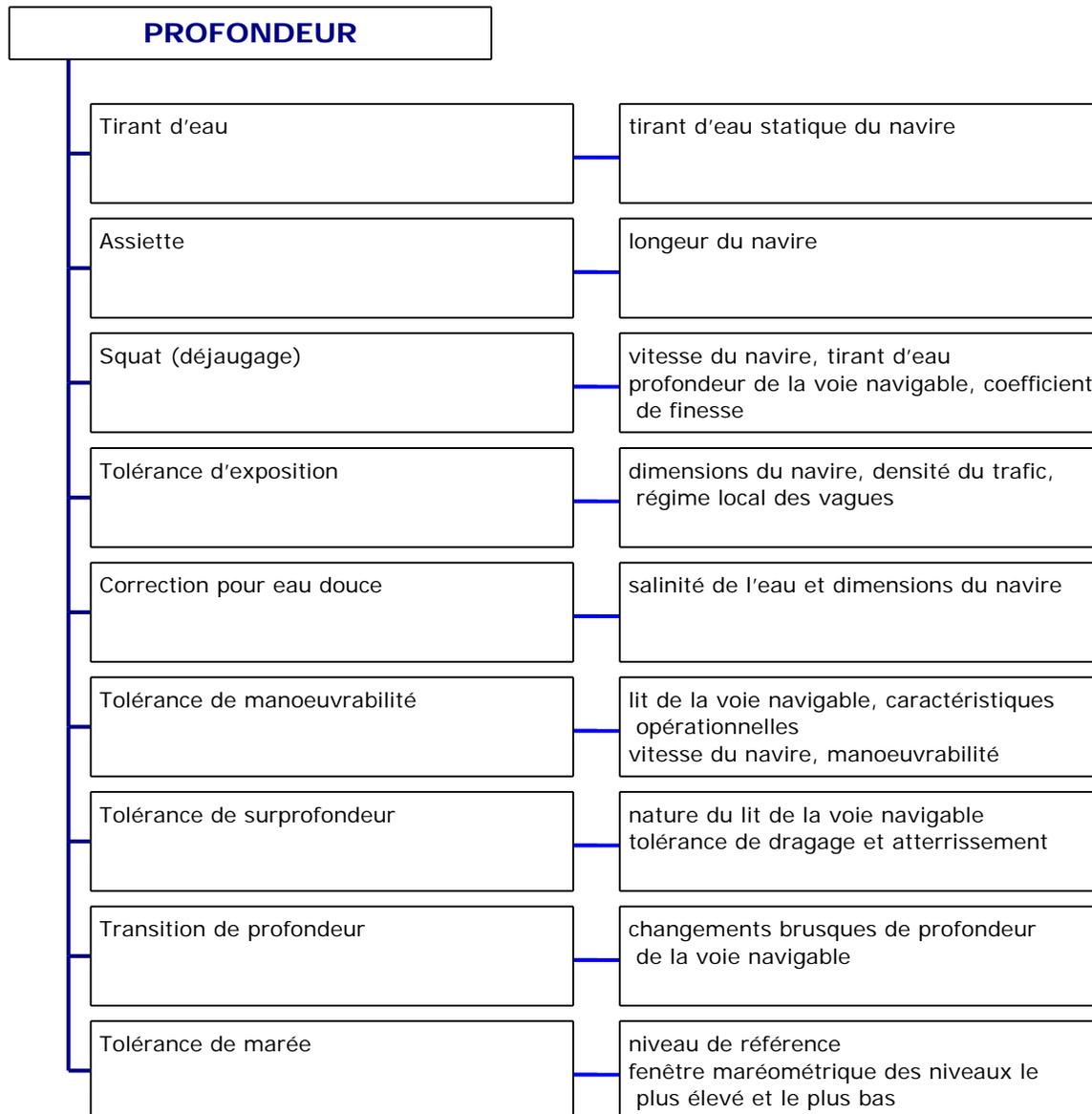


figure 3: PARAMÈTRES IMPORTANTS DANS LA CONCEPTION D'UNE VOIE NAVIGABLE - PROFONDEUR

2 — LARGEUR

Cette section décrit la marche à suivre pour déterminer la largeur requise dans une section droite du chenal. Le calcul pour les courbes se trouve à la section 5, page 24.

Les variables incluses dans les équations sont basées sur le navire «cible» de la voie navigable. La largeur totale de la voie navigable est la distance horizontale séparant les bases des deux parois à la profondeur établie. Elle est exprimée sous la forme de l'équation suivante :

$$\text{largeur totale} = \text{largeur de conception} + \text{tolérances}$$

La largeur de conception est la somme des largeurs nécessaires pour tenir compte des éléments suivants :

- 1) manoeuvre normale du navire;
- 2) interactions hydrodynamiques entre les navires qui se croisent et se dépassent dans un chenal à double sens;
- 3) compensation pour vents de travers et transcourants;
- 4) compensation pour la succion de la berge; et
- 5) aides à la navigation (comprenant le service de **pilotes**).

Les tolérances sont les largeurs additionnelles nécessaires pour tenir compte du glissement et de l'érosion de la berge, du transport et du dépôt de sédiments et du type de matériau dont est composée la berge. (voir figure 4) (référence: 1)

2.1 Couloir de manoeuvre

La couloir de manoeuvre est la largeur requise pour tenir compte du mouvement oscillatoire produit par la combinaison du balancement et du mouvement de lacet (embardée) du navire. L'oscillation est en partie causée par les forces agissant sur un navire en mouvement, comme par exemple l'instabilité de direction et la réponse à la barre ainsi que la réaction humaine aux déviations de route.

La largeur du couloir de manoeuvre doit être calculée pour le plus grand des types de navire attendus le plus souvent, et la voie résultante la plus large doit être adoptée à titre de largeur de couloir de manoeuvre requise. Dans certains cas, selon le type de trafic, la largeur du chenal peut permettre la circulation à double sens pour une certaine fourchette de tonnages de navire et la circulation à sens unique pour des navires plus gros.

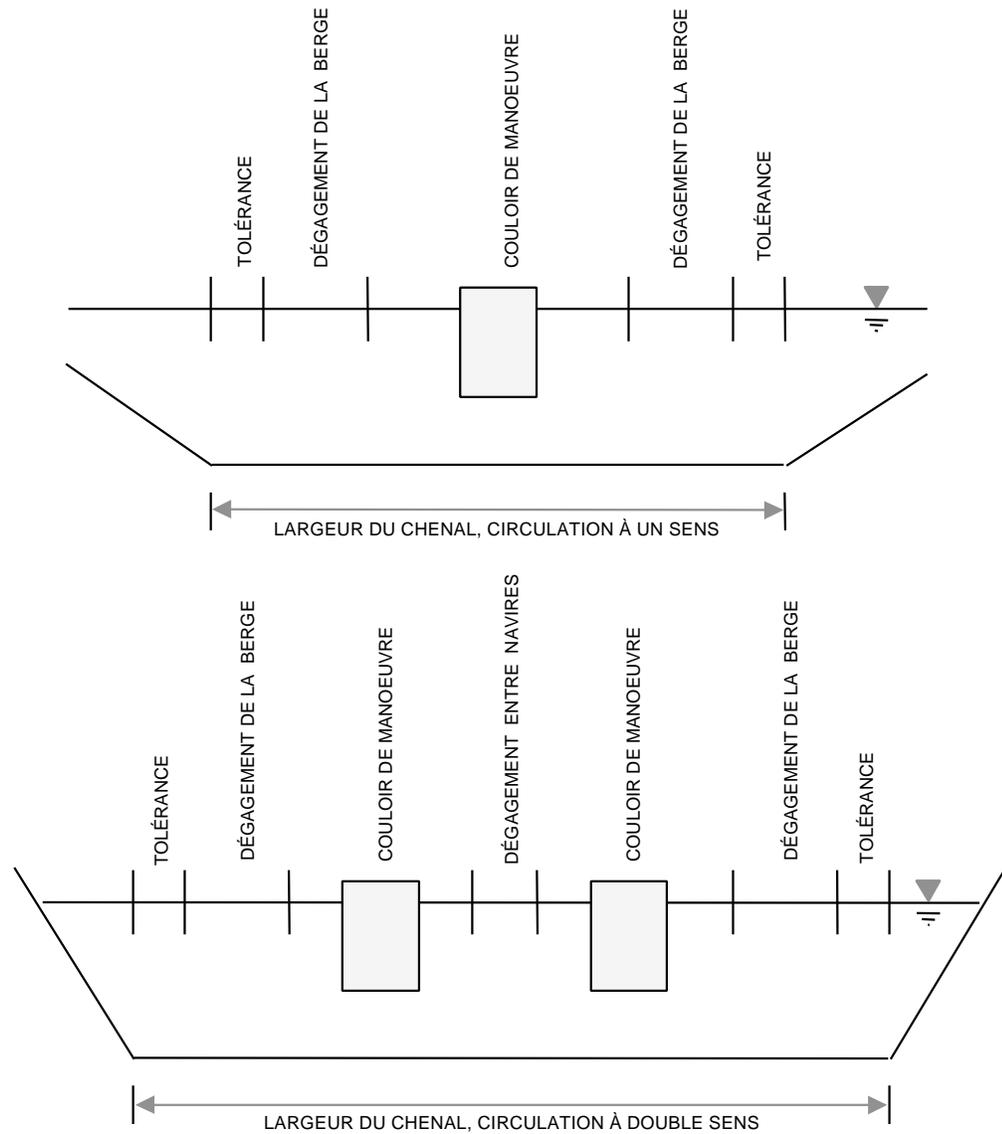


Figure 4: COMPOSANTES DE LA LARGEUR D'UN CHENAL

Selon le type de trafic, la largeur du chenal peut permettre la circulation à double sens pour une certaine fourchette de tonnages de navire et la circulation à sens unique pour des navires plus gros. De plus, les Services du trafic maritime ainsi qu'une bonne organisation des horaires peuvent aider dans la détermination de la largeur optimale du chenal.

L'établissement du couloir de manoeuvre nécessite une évaluation des caractéristiques de manoeuvre du navire. Le **Tableau 1** montre les hypothèses utilisées pour évaluer la manoeuvrabilité du navire et les exigences qui en résultent en ce qui a trait au couloir de manoeuvre. Selon le type de navire «cible», un «coefficient de manoeuvrabilité» est multiplié par la largeur (B) du navire «cible» afin de déterminer la largeur du couloir de manoeuvre.

Tableau 1: Coefficients de manoeuvrabilité - divers types de navire³

Navire	Manoeuvrabilité	Coefficient de Manoeuvrabilité	Largeur du couloir
Navires de guerre, cargos de classe Victory	Excellente	1,6	1,6 B
Pétroliers, nouveaux minéraliers, cargos de classe Liberty	Bonne	1,8	1,8 B
Vieux minéraliers, navires endommagés	Médiocre	2,0	2,0 B

B = largeur du navire «cible»

(Réf. : 1, 5, 8, 9, 12)

2.2 Largeur d'interaction hydrodynamique

Lorsque deux navires passent en même temps, il s'exerce d'importantes forces d'interaction entre ceux-ci, causant des déviations de route et des changements de cap. Bien que ces forces d'interaction soient très importantes, l'ampleur des déviations de route et des changements de cap qui surviennent au cours du croisement proprement dit est faible. Le véritable danger apparaît une fois que les navires se sont croisés, lorsque les perturbations dynamiques causées au moment de la rencontre se combinent avec les effets de la rive pour entraîner des mouvements oscillatoires divergents à défaut de mesures compensatoires suffisantes.

L'espacement minimal souhaitable pour tenir compte de l'interaction dynamique est de 30 mètres (100 pieds). L'approche recommandée est la suivante :

ou **dégagement entre les navires = 1 B, si B > 30 m**
dégagement entre les navires = 30 m, si B < 30 m
 (références: 1,5,7,9,12)

³ Aux fins de la majorité des calculs préliminaires pour lesquels les présentes lignes directrices ont été rédigées, le navire est réputé avoir une "bonne" manoeuvrabilité.

La densité du trafic sera aussi une considération importante pour un chenal à deux sens. La largeur sera augmentée selon la densité du trafic, tel que montré au **Tableau 2**.

Densité du trafic*	Largeur de compensation
Léger (0 - 1,0 navire/heure)	0,0 B
Modéré (1,0 - 3,0 navires/heure)	0,2 B
Lourd (>3,0 navires/heure)	0,4 B

* Les navires considérés n'incluent pas les petits navires tels que navires de plaisance et de pêche. Le nombre de navires à l'heure n'est pas nécessairement une moyenne journalière. Les périodes de pointe doivent être prises en considération lorsque l'on analyse la structure du trafic.

2.3 Effets du vent et du courant

Les forces du vent produisent deux effets sur un navire, soit une dérive latérale et un moment giratoire. La dérive latérale se compense par l'adoption d'un cap approprié, et le moment giratoire se compense par l'action de la barre. La compensation de la dérive entraîne une embardée du navire, ce qui rend nécessaire un élargissement du chenal.

L'ampleur des effets du vent sur un navire dépend de la direction relative du vent, du rapport entre la vitesse du vent et la vitesse du navire, du rapport entre la profondeur et le tirant d'eau et du fait que le navire soit chargé ou sur lest.

Les vents provenant de l'avant ne sont généralement pas à craindre si leur vitesse est moins de dix fois celle du navire. Ils posent toutefois plus de problèmes lorsqu'ils soufflent par le travers. L'effet maximal se produit lorsqu'ils sont perpendiculaires à l'axe longitudinal du navire.

L'angle de l'embarquée causée par le vent est plus grand si le navire est sur lest. Par conséquent, c'est la condition «sur lest» qui est utilisée pour déterminer la largeur additionnelle de chenal requise pour compenser les effets du vent. La largeur de compensation pour cet effet est montrée au **Tableau 3**.

Intensité du vent	Largeur de compensation pour Manoeuvrabilité du navire		
	Excellente	Bonne	Médiocre
Léger (<15 noeuds)	0,0 B	0,0 B	0,0 B
Modéré (15 - 33 noeuds)	0,3 B	0,4 B	0,5 B
Sévère (> 33 noeuds)	0,6 B	0,8 B	1,0 B

B = largeur du navire «cible»

(Réf. : 5, 8, 13)

Les effets des transcourants sur un navire sont à peu près les mêmes que ceux des vents de travers ; les compensations nécessaires se trouvent au **Tableau 4**.

Tableau 4: Compensation requise pour effets des transcourants

Intensité du courant	Largeur de compensation pour Manoeuvrabilité du navire		
	Excellente	Bonne	Médiocre
négligeable (< 0,2 noeud)	0,0 B	0,0 B	0,0 B
Léger (0,2 - 0,5 noeud)	0,1 B	0,2 B	0,3 B
Modéré (0,5 - 1,5 noeud)	0,5 B	0,7 B	1,0 B
Sévère (> 1,5 noeud)	0,7 B	1,0 B	1,3 B

B = largeur du navire «cible»

(Réf. : 5, 8, 13)

2.4 Effet de berge (dégagement de la berge)

Lorsqu'un navire se déplace dans l'eau, celle-ci est transportée de l'avant vers l'arrière du navire, le long de la coque, où elle remplit le vide qui s'est créé derrière celui-ci. Les pressions latérales produites par l'écoulement de l'eau sont équilibrées lorsque le navire se déplace en eaux libres ou sur la ligne de centre d'un chenal symétrique. Cependant, lorsqu'il se déplace parallèlement à la ligne de centre du chenal mais à côté de celle-ci, les forces sont asymétriques, ce qui entraîne un moment d'embarquée. Le moment d'embarquée est produit par la formation d'un système de vagues entre l'avant du navire et la berge du chenal la plus proche. Derrière cette lame d'étrave, l'élévation de l'eau entre le navire et la berge est inférieure à celle entre le navire et le centre du chenal, ce qui produit une force qui tend à déplacer l'arrière vers la berge la plus proche. L'ampleur de cet effet, appelé effet de berge, est directement proportionnelle à la distance séparant la route du navire du centre du chenal.

L'ampleur de cet effet de succion de la berge varie en fonction d'un certain nombre de facteurs :

1. La distance entre le navire et la berge : la théorie et les tests indiquent que l'ampleur de la force latérale est approximativement fonction du cube de la distance.
2. Plus le rapport profondeur / tirant d'eau est faible et plus la vitesse est grande, plus les forces sont grandes.
3. Les études indiquent en outre que le rapport hauteur de la berge / profondeur du chenal a une incidence considérable sur les effets de la berge. Les forces de succion de la berge diminuent rapidement à mesure que ce rapport diminue. Les effets de la berge sont en outre moins grands lorsque les pentes de la berge sont faibles.

Comme dans le cas de l'évaluation de la largeur du couloir de manoeuvre, l'évaluation de la largeur de compensation requise pour tenir compte de l'effet de berge est fonction de la manoeuvrabilité du navire, de sa vitesse, du vent et du courant. Cette largeur varie en

outre selon le matériau dont est formée la berge. Le **Tableau 5** est un guide pour l'établissement de la largeur à prévoir pour compenser l'effet de berge.

Tableau 5: Largeur de compensation requise pour effet de berge			
Manoeuvrabilité du navire	Largeur requise - degré de l'effet		
	Faible	Moyen	Élevé
Excellente	0,5 B	0,75 B	1,0 B
Bonne	0,75 B	1,0 B	1,25 B
Médiocre	1,0 B	1,25 B	1,5 B

B = largeur du navire «cible»

(Réf. : 1, 9, 12)

2.5 Aides à la navigation/service de pilotes

La largeur de compensation requise pour tenir compte des aides à la navigation est fonction de la complexité du chenal et des aides à la navigation qui sont mises en place le long de celui-ci. Si, par exemple, les aides à la navigation sont espacées de telle sorte que le capitaine du navire ou le pilote peut déterminer visuellement les dimensions du chenal en se guidant sur les alignements et les bouées, aucune largeur de compensation n'est requise. C'est pourquoi, l'établissement des dimensions du chenal et le positionnement des aides devraient se faire concurremment. Le **Tableau 6** donne des valeurs de compensation selon l'état des aides à la navigation. Bien sûr, ce tableau inclut aussi la **disponibilité de pilotes** qui aura une influence certaine sur la largeur de compensation.

Tableau 6: Compensation selon l'état des aides à la navigation	
État des aides à la navigation	Largeur requise
Excellent	0,0 B
Bon	0,1 B
Modéré avec périodes de visibilité réduite peu fréquentes	0,2 B
Modéré avec périodes de visibilité réduite fréquentes	0,5 B

2.2.6 Autres tolérances

Les éléments qui précèdent sont les principaux facteurs dont il faut tenir compte pour déterminer la largeur d'un chenal. Il y a toutefois d'autres éléments qui doivent être pris en considération à cet égard.

Cargaisons des navires

À notre époque de préoccupations environnementales, le concepteur doit tenir compte de la cargaison du navire dans l'évaluation de la sécurité de la voie navigable et des risques potentiels qu'elle comporte. Ainsi, si la plus grande part du trafic est composée

de pétroliers de brut plutôt que de céréaliers, le concepteur doit établir une largeur de chenal qui fasse en sorte que les échouements ou les interactions soient rares et que leur probabilité annuelle soit de 1×10^{-5} . Les largeurs de compensation selon le type de cargaison, pour un chenal à un couloir, sont indiquées au **Tableau 7**.

Tableau 7: Compensation selon le niveau de risque de la cargaison	
Niveau de risque de la cargaison	Largeur requise
Faible	0,0 B
Moyen	0,5 B
Élevé	1,0 B

Profondeur de la voie navigable

La profondeur doit être suffisante pour pouvoir manoeuvrer le navire. Un moyen simple de régler la question est d'assigner une valeur minimale au rapport profondeur/tirant d'eau. À plusieurs endroits à travers le monde, 1,10 est une valeur acceptable, quoique on trouve aussi 1,15. Plus la valeur du rapport se rapproche de l'unité, plus le navire devient directionnellement stable, c'est-à-dire que les changements de cap sont plus difficiles et, conséquemment, la réponse à la barre est de plus en plus molle. Habituellement, on compense en élargissant le chenal. Les largeurs de compensation pour le rapport profondeur/tirant d'eau se trouvent au **Tableau 8**.

Tableau 8: Compensation pour rapport profondeur/tirant d'eau	
Rapport profondeur/tirant d'eau (D/d)	Largeur requise
D/d > 1,50	0,0 B
1,15 = D/d = 1,50	0,2 B
D/d < 1,15	0,4 B

Matériau du lit du chenal

Le type de matériau du lit est important seulement dans des voies navigables peu profondes. Si la profondeur est plus de 1,5 fois le tirant d'eau du navire cible, aucune compensation n'est nécessaire. Le **Tableau 9** donne un aperçu des largeurs de compensation liées au type de matériau du lit.

Tableau 9: Compensation selon le matériau du lit du chenal		
Type de matériau du lit	Largeur requise	
	D/d > 1,5	D/d < 1,5
Lisse et mou	0,0 B	0,1 B
lisse ou en pente et dur	0,0 B	0,1 B
accidenté et dur	0,0 B	0,2 B

Navigation de nuit et effets du brouillard

Les incidences du degré de visibilité du navire dans le chenal constituent un autre paramètre qui doit être évalué qualitativement par le concepteur. Ce dernier doit, au moment de calculer la largeur du chenal, tenir compte du nombre de jours sans brouillard. Cependant, ce paramètre peut revêtir une importance moindre aujourd'hui en raison du développement de systèmes de positionnement global ou de positionnement global différentiel, lesquels améliorent la fiabilité de la navigation maritime.

Vitesse du navire

La vitesse du navire est un autre paramètre à considérer dans la détermination de la largeur. Cependant ce paramètre est d'importance mineure puisque la largeur de compensation requise est de $0,1B$ pour des vitesses supérieures à 12 noeuds. Pour cette raison il n'a pas été inclus dans le logiciel de calcul de la largeur. Mais cela ne signifie pas que ce paramètre doit être systématiquement écarté; les conditions spécifiques à un site peuvent en décider autrement.

3 — PROFONDEUR

La profondeur minimale requise pour la sécurité de la navigation est calculée en faisant la somme du tirant d'eau du navire cible et d'un certain nombre de tolérances et d'exigences tel qu'indiqué ci-dessous :

Profondeur réelle de la voie navigable⁴ = tirant d'eau statique du navire «cible» + assiette + squat + tolérance d'exposition + correction pour eau douce + tolérance de matériau de fond + tolérance de surprofondeur + transition de profondeur - tolérance de marée (voir figure 5)

Profondeur disponible (annoncée) de la voie navigable = profondeur de la voie navigable - tolérance de surprofondeur

En plus des facteurs ayant une incidence sur la profondeur de la voie navigable qui sont mentionnés ici, il y en a d'autres, dont les suivants, qui doivent être pris en considération :

- l'effet du courant dans la voie navigable
- l'effet, dans le couloir de navigation et dans les nappes d'eau adjacentes, des niveaux d'eau attribuables par exemple à des changements dans le débit fluvial et les conditions de vent;
- les effets environnementaux;
- les limitations de profondeur, ailleurs dans la voie navigable.

Il faut comprendre, quand il s'agit de déterminer le tirant d'eau maximal pour le chenal, qu'il n'est pas nécessaire que la profondeur correspondante soit assurée à 100 pour cent du temps. Le navire au tirant d'eau le plus fort peut devoir planifier son passage dans le chenal de façon à ce qu'il ait lieu lorsque le niveau de l'eau est élevé. Le choix de la profondeur à assurer doit être basé sur une analyse économique du coût des retards occasionnés aux navires, des opérations et du transport à faible charge, par comparaison aux coûts de construction et d'entretien du chenal.

3.1 TIRANT D'EAU STATIQUE DU NAVIRE «CIBLE»

Le tirant d'eau du navire «cible» qui utilisera la voie navigable est basé sur le trafic maritime attendu dans la voie navigable projetée. Il est établi au moyen d'une évaluation économique de ce trafic.

⁴ Pour l'application de la formule, il faut décider si les valeurs de l'assiette et du squat doivent s'additionner l'une à l'autre. Dans le cas standard, seule la valeur du squat est utilisée pour déterminer la "profondeur réelle du chenal".

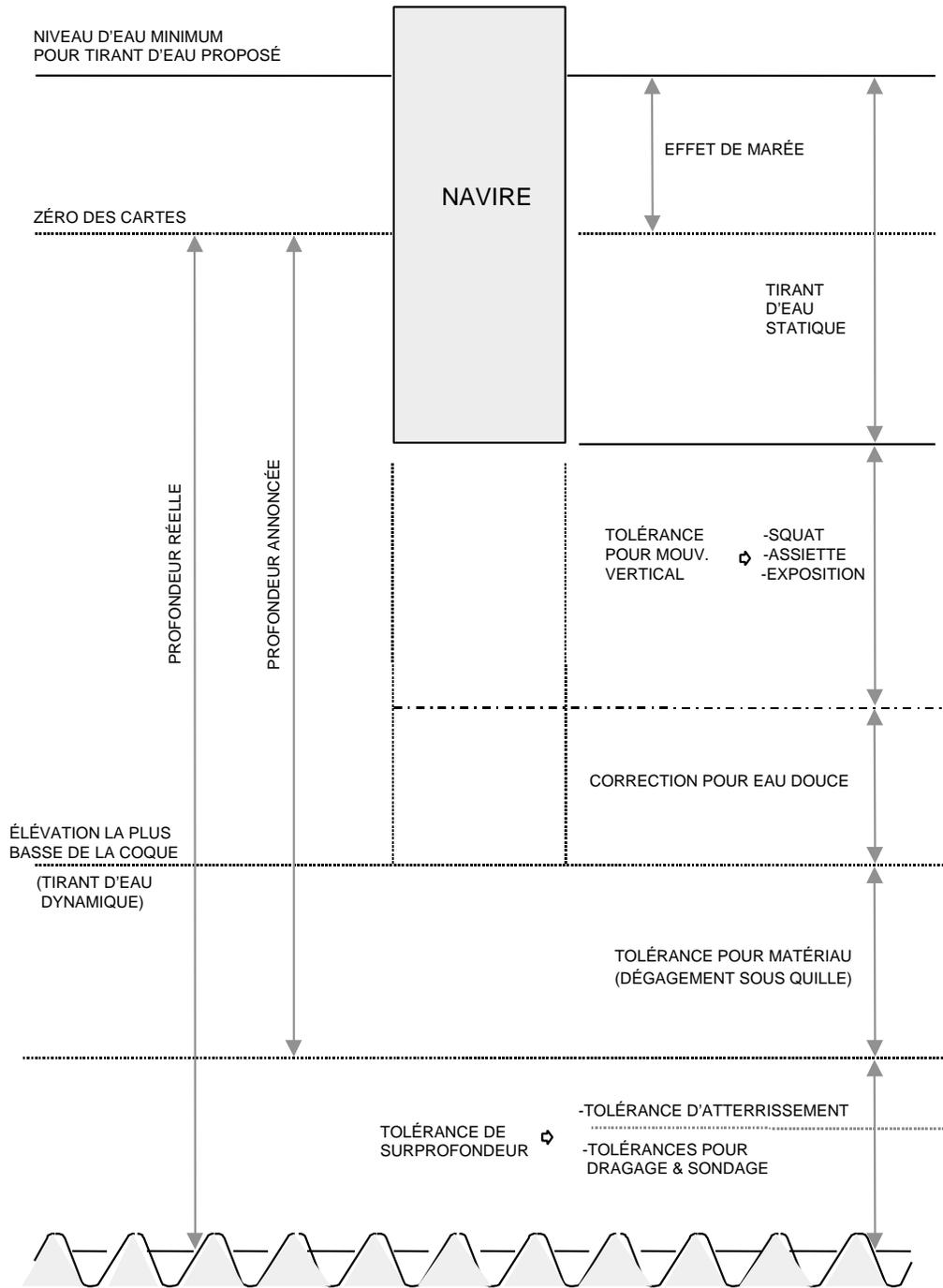


figure 5: COMPOSANTES DE LA PROFONDEUR DE LA VOIE NAVIGABLE

3.2 ASSIETTE

L'assiette est généralement définie comme l'inclinaison longitudinale d'un navire ou la différence entre le tirant d'eau de l'avant et le tirant d'eau de l'arrière. En général, à faible vitesse, un navire faisant route penche vers l'avant. La pratique de compensation de cette assiette consiste à charger l'arrière du navire. La règle pratique consiste à prévoir, dans la profondeur du chenal, une tolérance de 0,31 m pour tenir compte de l'assiette. (références: 5, 9)

L'approche normale pour un navire consiste à allouer une assiette de 3"/100 pi de longueur ou 0,25 m/100 m. (références: 3, 5, 9)

3.3 TOLÉRANCE DE MARÉE

L'établissement d'une tolérance pour l'effet des marées doit se faire en fonction d'un examen d'un échantillonnage statistiquement significatif des observations marégraphiques faites au cours de la saison de navigation, afin de déterminer dans quelle mesure la hauteur des marées au-dessus du zéro des cartes doit être incluse dans la profondeur «normalement disponible». La tolérance choisie doit permettre d'assurer le niveau de disponibilité de la voie navigable requis sur la base des horaires des marées, déterminé au moyen d'une analyse d'optimisation.

3.4 SQUAT (DÉJAUGEAGE)

Le squat est l'augmentation du tirant d'eau d'un navire résultant du déplacement de celui-ci dans l'eau. Il s'agit d'un phénomène hydraulique par lequel l'eau déplacée crée une augmentation de la vitesse du courant le long de la coque en mouvement, causant ainsi une réduction de pression qui, à son tour, a pour effet de produire une baisse locale du niveau d'eau, permettant au navire de s'enfoncer plus profondément dans l'eau.

Pour diverses raisons qui ont trait à la conception de la coque, à l'assiette et à d'autres facteurs physiques et opérationnels, le squat peut ne pas être le même à l'avant et à l'arrière.

Récemment, une nouvelle équation, résultat d'un vaste programme de recherche par Développement des voies navigables, a été développée en tenant compte de conditions et du type de trafic caractérisant la plupart des voies de navigation commerciales canadiennes. Cette équation tient compte de la relation entre la largeur du navire et la largeur de la voie navigable, contrairement aux équations précédentes qui supposaient une largeur de voie navigable infinie; cette nouvelle relation est des plus importantes puisque la plupart des voies commerciales canadiennes sont limitées en largeur. L'équation, appelée équation d'Eryuzlu no. 3, est donc recommandée comme celle donnant les résultats les plus fiables lorsqu'il s'agit de voies navigables restreintes. L'équation s'énonce comme suit:

$$Z(d/D^2) = a[v_s / \sqrt{gd}]^b [D/d]^c F_w$$

où :

Z = squat;
 d = tirant d'eau du navire «cible»;
 D = profondeur disponible du chenal;
 v_s = vitesse du navire «cible»;
 g = accélération due à la pesanteur;
 W = largeur du chenal;
 B = Largeur du navire;
 F_w = facteur de largeur du chenal,

Avec $F_w = 1$, lorsque $W > 9.61 B$

$$F_w = \frac{3.1}{\sqrt{W/B}}, \text{ lorsque } W < 9.61 B$$

et

a, b et c sont des coefficients communs
 a = 0.298, b = 2.289 et c = -2.972

Cette équation est non dimensionnelle; elle peut donc être utilisée avec tout système de mesure.

Applications⁵

Cette équation s'applique aux cas suivants :

1. Navires de 19 000 TPL à 227 000 TPL représentant des transporteurs de marchandises générales ou des pétroliers de brut (coefficient de finesse dépassant 0,80).
2. Chenal peu profond et relativement droit.
3. La largeur du chenal peut varier de largeur illimitée à quatre fois la largeur du navire.
4. Des vitesses variant entre 2 et 14 noeuds environ.
5. Assiette maximale d'environ 10% du tirant d'eau.
6. Le squat prédominant est à l'avant.
7. Le tirant d'eau à pleine charge du navire est égal ou supérieur à 80% du tirant d'eau réglementaire.

Finalement, il faut savoir que les équations ont tendance à généraliser une situation réelle; il faut donc faire preuve de discernement, de bon sens et se servir de son expérience lorsque l'on utilise cette-dernière ou toute autre équation.

⁷ Le concepteur doit tenir compte de ces limitations lorsqu'il entreprend de déterminer le squat pour le chenal projeté. Les navires ayant des caractéristiques différentes ont des valeurs de squat différentes.

3.5 TOLÉRANCE D'EXPOSITION

L'établissement de la tolérance d'exposition doit tenir compte des mouvements de pilonnement, de tangage et de roulis dus aux conditions locales et doit être basé sur les données disponibles relativement au régime des vagues local et sur les particularités du trafic.

La tolérance doit être déterminée de façon à réduire au minimum les délais d'arrivée et de départ en raison de considérations d'ordre économique. Si une tolérance substantielle est requise pour ne réduire les délais que dans une très faible mesure ou si les délais sont minimales lorsque le trafic est peu important, la tolérance peut être omise. Cependant, dans les autres cas, la profondeur additionnelle peut être basée sur l'information présentée au **Tableau 10**. (Des valeurs plus élevées peuvent être requises dans les voies navigables des côtes est et ouest.)

Tableau 10: Tolérance d'exposition ⁶	
Exposition	Tolérance
Exposition nulle	0 m
Exposition moyenne (faible pilonnement du navire)	0,15 m
Pleine exposition	0,30 m

3.6 CORRECTION POUR EAU DOUCE

Une augmentation de la salinité entraîne une augmentation de la densité de l'eau, ce qui a pour effet de réduire le tirant d'eau du navire dans la voie navigable. La profondeur à donner à la voie navigable doit tenir compte des variations de la salinité qui peuvent se produire dans un estuaire exposé aux effets des marées et aux débits fluviaux. La correction pour eau douce doit tenir compte de la diminution de la flottabilité du navire. Une méthode pratique pour déterminer la tolérance additionnelle de charge pour les navires en eau douce consiste à établir celle-ci à 2-3 % du tirant d'eau en eau salée. (références: 1, 5, 9)

3.7 TOLÉRANCE DE MATÉRIAU DE FOND

Cette tolérance, appelée également dégagement net sous quille, est définie comme la marge de sécurité minimale entre la quille du navire et la profondeur disponible (annoncée) de la voie navigable. Elle s'ajoute à celles pour le squat, l'assiette, l'eau douce et les effets des conditions de vent et de vagues attendues, afin d'assurer une marge de sécurité contre le risque de heurter le fond. La valeur est fonction de la nature du fond, des caractéristiques de manoeuvrabilité du navire et des caractéristiques opérationnelles de la voie navigable. Le **Tableau 11** indique les valeurs qui peuvent être utilisées selon les catégories de matériau de fond.

⁸ Ces valeurs représentent les tolérances types pour les voies navigables des Grands Lacs.

Tableau 11: Tolérance selon le matériau de fond

Matériau de fond	Tolérance
Mou	0,25 m
Moyen (sable)	0,60 m
Dur (roche)	0,90 m

(Réf. : 2,7,8,9)

3.8 MARGE DE MANOEUVRABILITÉ

La marge de manoeuvrabilité comprend la tolérance pour matériau de fond (ou dégagement net sous quille) et la tolérance d'exposition. Cette marge est une mesure du minimum requis pour permettre au navire de manoeuvrer de manière adéquate dans la voie navigable. Une marge minimale de 1,0 m est généralement utilisée pour les gros navires. Par conséquent, la somme de la tolérance de matériau de fond et de la tolérance d'exposition doit être d'au moins 1,0 m afin d'assurer la marge de manoeuvrabilité des navires de 250 000 TPL et plus. (référence: 10)

3.9 TOLÉRANCE DE SURPROFONDEUR

Il s'agit de la tolérance tenant compte de l'atterrissement de la voie navigable entre les dragages ainsi que du dragage et du sondage.

La tolérance d'atterrissement est habituellement basée sur les conditions prévues d'accumulation de limon. Elle sert à compenser l'atterrissement entre les opérations de dragage. La tolérance de dragage varie selon le type d'installation de dragage utilisée et les conditions du fond. La tolérance acceptable moyenne est de 0,3 m. Si le matériau du fond est mou et peut être déplacé par un navire, aucune tolérance n'est nécessaire. (référence: 1)

3.10 TRANSITION DE PROFONDEUR

Toutes les sections de la voie navigable doivent être examinées et les profondeurs doivent être établies en fonction des diverses conditions observées. Cette exigence ainsi que la bathymétrie naturelle du cours d'eau entraîneront l'établissement de profondeurs différentes dans des sections adjacentes de la voie navigable.

Si la transition entre des sections adjacentes est grande, le changement brusque de profondeur d'eau sous quille aura un effet sur les vitesses du courant et sur la pression hydrostatique exercée sur la coque; il en résultera un changement dans la performance, la manoeuvrabilité et le tirant d'eau du navire.

Pour ce qui est du squat du navire dans une zone de transition, la question est actuellement examinée par Développement des voies navigables. L'analyse préliminaire indique que le squat augmenterait de 15 % à 20 % dans le cas d'une transition d'eaux profondes à eaux peu profondes.

4 — INCLINAISON DES PAROIS

Le choix d'une inclinaison appropriée pour les parois est nécessaire pour réduire l'entretien de la voie navigable et pour assurer la protection des navires. Afin de réduire au minimum les dommages à la coque, une inclinaison maximale de 1:1 est recommandée pour permettre un certain mouvement du navire vers la berge en cas d'abordage. Le **Tableau 12** se veut un guide d'établissement des pentes, selon le matériau, nécessaires pour fins de stabilité. Des analyses de la stabilité des parois doivent être effectuées pour s'assurer que le coefficient de sécurité de celles-ci est supérieur à 1,25.

Tableau 12: Pentes des parois recommandées

MATÉRIAU	PENTE Horizontale: Verticale
Tous les matériaux, pente minimale requise	1:1
Pente souhaitable :	
• Roche ferme	1:1
• Roche fissurée, roche plus ou moins désintégrée, argile solidifiée dure	1:1
• Gravier aggloméré, sol d'argile rigide, argile solidifiée ordinaire	1:1
• Sol argileux ferme et graveleux	1:1
• Terreau moyen, terreau graveleux	3:2
• Argile ferme	3:2
• Terreau sableux meuble	2:1
• Sol très sablonneux	3:1
• Sable et gravier, sans ou avec petites fines	3:1 - 4:1
• Sable et gravier avec fines	4:1 - 5:1
• Sol organique et sol tourbeux	4:1
• Vase et limon mou	6:1 - 8:1

5 — COUDES

Un chenal ne devrait comporter des coudes que dans les cas d'absolue nécessité, en raison des conditions de navigation difficiles qu'entraîne le déséquilibre du débit et de la vitesse résultant des changements de direction du chenal. Cela crée des moments et des forces hydrodynamiques qui augmentent la difficulté de manoeuvre du navire qui passe dans le coude.

La conception d'un coude dans un chenal doit tenir compte du rayon de courbure correspondant aux qualités de giration du navire, d'une augmentation de largeur pour atténuer les difficultés de manoeuvre rencontrées, de zones de transition entre la section droite du chenal et le coude élargi, et du tracé approprié.

5.1 RAYON DE COURBURE

Le rayon de courbure du coude du chenal doit être établi en fonction du navire qui, parmi tous ceux attendus dans le chenal, a les qualités de giration les plus faibles. Les principaux facteurs des qualités de giration d'un navire sont la profondeur d'eau sous quille, le coefficient de finesse, la superficie relative du gouvernail et l'assiette.

Le **Tableau 13** donne, pour les coudes qui sont nécessaires dans un chenal, les rayons de courbure minimaux à assurer pour les navires qui se déplacent sans l'aide de remorqueurs à une vitesse de 10 noeuds, sans augmenter la largeur de la zone d'approche au coude.

Tableau 13: Rayon de courbure du coude du chenal	
Angle de giration	Rayon de courbure
Moins de 25°	3 L
25° - 35°	5 L
35° - 55°	8 L
Plus de 55°	10 L

L = longueur du navire «cible»

(Réf. : 5,7,8,11)

Cependant, pour des rayons de courbure inférieurs aux valeurs du **Tableau 17** et demandant plus de 20 % à la barre, l'utilisation d'un remorqueur devrait être envisagée.

Les coudes ayant un rayon de 10 L ou plus sont considérés comme «mineurs»; cela veut dire que sur le plan de la navigation, ils sont considérés comme des sections droites de chenal ne nécessitant aucun élargissement. (référence: 11)

5.2 LARGEUR

Lorsque le rayon de courbure n'est pas considéré mineur, une largeur additionnelle doit être ajoutée à la voie de circulation de la section droite du chenal, afin de tenir compte des difficultés de manoeuvre ainsi que de l'incertitude quant à la route du navire au moment de son passage dans le coude. Il se produit un glissement latéral qui dépend principalement du rapport profondeur/tirant d'eau (D/d). Ce glissement fait que le navire occupe une largeur de chenal supérieure à sa largeur; cet excédent varie approximativement de 0,3 B pour $D/d = 1.1$ à 1,6 B en eau profonde⁹. L'ampleur de cette largeur additionnelle est fonction de l'angle de giration du navire, du rayon de courbure, de la distance de visibilité, des conditions environnementales ainsi que de la longueur, de la largeur, de la vitesse et de la manoeuvrabilité du navire. L'équation suivante, servant à déterminer l'augmentation additionnelle de largeur dans les coudes, a été élaborée à partir des études sur modèle réduit au Dave Taylor Model Basin :

$$\Delta W = \frac{0.9144 f v_s^2 L^2 F}{R_t C_c S}$$

Où :

- ΔW = augmentation de la largeur du couloir de navigation, (m)
- f = angle de giration, (degrés)
- v_s = vitesse du navire dans le chenal par rapport au fond, (noeuds)
- L = longueur du navire, (m)
- R_t = rayon de giration, (m)
- C_c = coefficient de manoeuvrabilité (qualités de giration) du navire
(faible=1; bon=2; très bon=3)
- S = distance de visibilité non obstruée à partir de la passerelle du navire, (m)
- F = 1.0 pour le trafic à sens unique; 2.0 pour le trafic à double sens

La distance de visibilité minimale requise, S , a été établie à 1,52 mille terrestre (2 446 m) par les navigateurs au cours des études du canal de Panama. (références: 5, 9)

Comme il est difficile de prédire les forces hydrodynamiques qui s'exerceront sur un navire passant dans un coude qui s'élargit graduellement, en particulier lorsqu'il y a du courant, il est recommandé que la largeur du chenal demeure constante tout le long du coude.

L'augmentation de largeur dans un coude peut se faire de trois façons : a) par la méthode du raccourci, b) par la méthode des berges parallèles, et c) par la méthode des berges non parallèles (référence: 5). La méthode du raccourci a été utilisée pour la Voie maritime du Saint-Laurent; elle présente l'avantage de nécessiter moins de dragage que les autres méthodes. Il ressort toutefois des études du canal de Panama que, dans certains cas, cette méthode a produit des configurations de courants non souhaitables. (référence: 9)

⁹ *Approach Channels, A Guide for Designs; Final Report of the joint Working Group PIANC and IAPH; Supplement to Bulletin no 95, juin 1997; page 19.*

Dans les secteurs où le rayon minimal requis ne peut être assuré et où le chenal ne peut être agrandi, l'aide de remorqueurs est nécessaire.

5.3 TRANSITIONS

La zone de transition, qui va de la section droite du chenal à la section élargie du coude, doit parer des forces asymétriques plus grandes qui s'exercent sur le navire lorsqu'il commence à négocier le virage. Les extrémités des zones ayant des largeurs différentes doivent être jointes par des sections en ligne droite d'une longueur au moins égale à la portée du navire «cible» (référence: 11), mais ne présentant pas un rapport longueur/variation totale de largeur inférieur à 10:1 afin d'assurer le passage en douceur de la section droite à la section élargie du coude. L'élargissement du chenal doit se faire dans les sections droites de celui-ci et non dans le coude lui-même. La figure 6 explique les calculs relatifs à la portée du navire. La figure 7 résume les critères de dimensionnement d'un coude de chenal élargi en parallèle.

Transitions - exemple de conception

Déterminer la longueur de transition pour un coude de chenal élargi de 20 m, compte tenu des données suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Vitesse du navire, } v_s &= 8 \text{ noeuds (4,12 m/s)} \\ \text{Délai de giration, } T &= 30 \text{ secondes} \\ \text{Portée} &= T \times v_s \\ &= 30 \times 4,12 = 123,5 \text{ m} \end{aligned}$$

Comparer au rapport longueur de transition/largeur additionnelle (L_t/W_a)

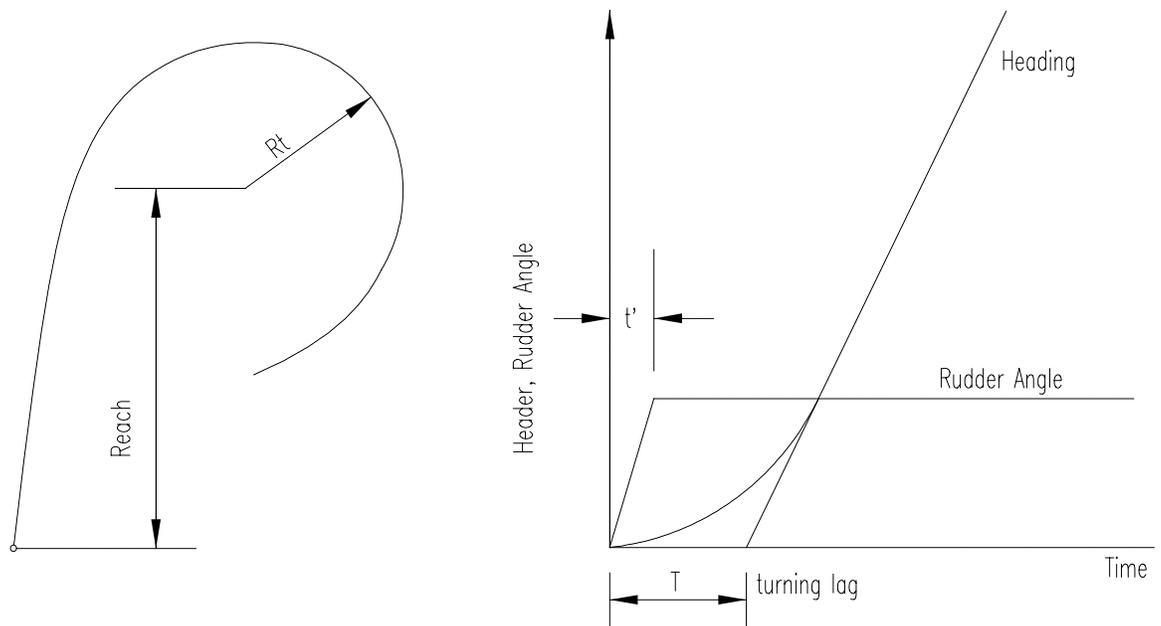
$$\begin{aligned} 123,5/20 &= 6:1 < 10:1 \\ \text{Portée} &= 20 \times 10 \\ &= 200 \text{ m} \end{aligned}$$

Par conséquent, la longueur de la transition est de 200 m, puisque le rapport minimal recommandé est de 10:1. Le **Tableau 14** tableau 14 présente quelques rapports de longueur de transition recommandés pour les navires selon leur manoeuvrabilité.

Tableau 14: Zone de transition, rapports L_t/W_a	
Manoeuvrabilité du navire	Rapport
Excellente	10:1
Bonne	10:1
Médiocre	15:1

5.4 DISTANCE ENTRE LES COURBES

Il doit y avoir, entre la fin d'une courbe et le début d'une autre courbe, une section droite égale à au moins cinq fois la longueur du navire «cible»; en outre, les contre-courbes doivent être évitées. (référence: 1)



Turning Lag = $T + t'/2 = T$ (since t' is small compared to T)

Reach = $t \times \text{ship's speed}$

Advance = $\text{Reach} + \text{turning radius}$

Légende

Heading: Cap

Reach: Portée

Header, Rudder Angle: Cap, angle de barre

Turning lag: Délai de giration

Advance: Avance

Turning radius: Rayon de giration

Ship's speed: Vitesse du navire

Tim(e): Temps

figure 6: DÉTERMINATION DE LA PORTÉE DE L'AVANCE DU NAVIRE

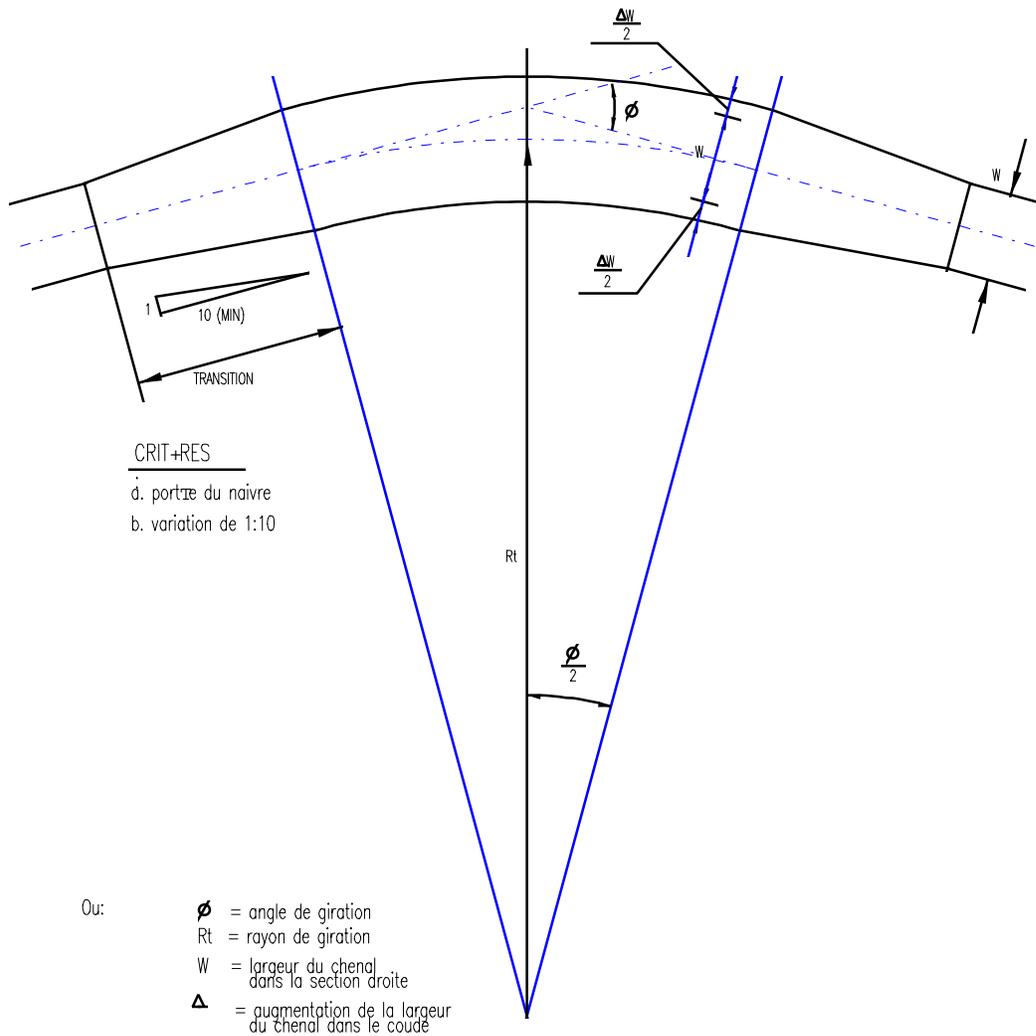


figure 7: COURBE TYPE À ÉLARGISSEMENT PARALLÈLE

6 — DÉGAGEMENT DE PONT

6.1 GÉNÉRALITÉS

Le dégagement de pont devrait être suffisant pour permettre le passage en toute sécurité du navire le plus gros pouvant utiliser le chenal.

6.2 PASSE MARINIÈRE

La largeur de la passe sous le pont doit être établie en tenant compte des éléments suivants :

1. La densité du trafic et si la circulation à double sens et/ou les dépassements seront permis ou non.
2. La direction et la vitesse du courant.
3. Le risque de collision
4. Les conséquences des collisions relativement aux marchandises dangereuses, aux dommages au pont et au navire et à l'interruption du trafic du pont et de la voie navigable.
5. Le coût de la protection des piles de pont contre les heurts : au cours des dernières années, la modélisation informatique a été utilisée pour déterminer les passes marinières sur la base de méthodes probabilistes employées pour mesurer la déviation du navire de sa route prévue. (référence: ,1)

6.3 HAUTEUR LIBRE

La hauteur libre est la distance entre la surface de l'eau et l'élément le plus bas de la structure du pont. Un niveau d'eau qui n'est dépassé que 2 pour cent du temps, au plus, au cours de la vie du projet constitue un critère de conception raisonnable pour déterminer la surface «quasi-maximale» d'un chenal à forte densité de trafic. La distance entre le haut du navire et l'élément le plus bas du pont varie selon les caractéristiques de mouvement du navire et doit être d'au moins 3 m.

7 — CONCEPTION ÉCONOMIQUEMENT OPTIMALE

Dans le cas de gros navires circulant dans des voies navigables à profondeur limitée, l'équilibre entre la sécurité et l'efficacité représente un défi complexe, à la fois pour les organismes de réglementation et les organismes opérationnels. Pour les organismes de réglementation, il est de la plus haute importance de s'assurer que la sécurité n'est pas compromise par l'efficacité. Pour les organismes opérationnels, il est également important de ne pas compromettre l'efficacité pour optimiser la sécurité.

La conception optimale d'une voie navigable nécessite des études des coûts et avantages estimatifs des divers plans et solutions de rechange en ce qui a trait à la sécurité, à l'efficacité et aux impacts environnementaux. Ces études servent à déterminer, pour le chenal, le tracé et la configuration les plus économiques et les plus fonctionnels, en tenant compte des coûts de dragage initial, d'entretien et de remplacement associés aux divers plans. (référence: 1)

L'optimisation économique d'un chenal requiert l'étude de plusieurs tracés et dimensions (largeur et profondeur) qui sont acceptables pour la sécurité et l'efficacité de la navigation. Des coûts sont calculés pour le tracé et les dimensions associés à chaque possibilité. Les avantages sont déterminés par les économies dans les coûts de transport associées aux temps de transport, aux tonnages, aux retards occasionnés par les marées, aux conditions météorologiques et aux effets de la réduction de la profondeur dans les voies navigables qui ont tendance à former rapidement des hauts-fonds.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) American Society of Civil Engineers, *Report on Ship Channel Design*, 1993
- (2) Department of the Army Detroit District, Corps of Engineers, *Study Report of Vessel Clearance Criteria for the Great Lakes Connecting Channels*, October 1979
- (3) Eisiminger, Col. Sterling K., *Widening and Deepening the Columbia and Willamette Rivers: Physical Problems of Maintaining a Navigation Channel*, US Army Corps of Engineers, The Dock and Harbour Authority, February 1963
- (4) Eryuzlu, N.E., Cao, Y.L., and D'Agnolo, F., *Underkeel Requirements for Large Vessels in Shallow Waterways*, PIANC Proceedings 28th International Congress, Section II, Subject 2, 1994
- (5) Hay, Duncan, *Harbour Entrances, Channels and Turning Basins*, Department of Public Works, Vancouver, The Dock and Harbour Authority, January 1968
- (6) International Oil Tanker Commission, *Working Group No. 2 Report*, PIANC Bulletin No. 16, 1973
- (7) Kray, C. J., *Harbors, Ports & Offshore Terminals: Layout and Design of Channels and Manoeuvring Areas*, PIANC Bulletin No. 21, 1975
- (8) Division de la mécanique navale, section de la conception, ministère des Travaux publics, "Manual, Part 1 Functional Standards, Chapter 1: Channels", mai 1969.
- (9) Per Brunn, DR., *Port Engineering*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1973
- (10) PIANC, *Underkeel Clearance for Large Ships in Maritime Fairways with Hard Bottom*, Report of a working group of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin No. 51, 1985
- (11) CODE TERMPOL, «Code des normes recommandées pour la prévention de la pollution dans les systèmes de transport maritime», Garde côtière canadienne, 1977.
- (12) Waugh, Richard G., *Problems Inherent In Ship Characteristics As They Affect Harbor Design*, Board of Engineers for Rivers and Harbors Department of the Army, Washington, D.C., 1971
- (13) PIANC, *Approach Channels, a Guide for Design*, Final Report of the Joint Working Group PIANC-IAPH, Supplement to Bulletin no 95, (June 1997).