



Protection contre l'affouillement des quais à l'aide de matelas coffrant en béton coulé *in situ*

Johann BRUHIER ¹, Martin HAWKSWOOD ²

1. Directeur Commercial, HUESKER France SAS, 67190 Gresswiller, France.

Info@HUESKER.fr

2. Director & Principal Engineer, Proserve Ltd, UK.

office@proserveltd.co.uk

Résumé :

La protection par enrochement contre l'affouillement des ouvrages d'amarrage, reste la plus fréquente. Cependant, avec l'augmentation récurrente de la taille des navires, la dimension des enrochements devient de plus en plus importante et par conséquent de moins en moins pratique. Les protections par matelas béton permettent des constructions moins épaisses ce qui permet de réaliser des économies sur la taille des structures de quai. Cet article présente les méthodes de conception des matelas de béton *in situ* par rapport aux directives de l'AIPCN. On distingue les performances des protections en matelas, qu'elles soient de type " fermées " ou " ouvertes ".

Des méthodes de conception pour l'aspiration et l'écoulement des hélices, concernant les protections en béton coulé *in situ* "fermées" sont présentées, ainsi que des dispositions constructives concernant les extrémités.

Mots-clés :

Quai, Protection anti-érosion, Matelas fermé, AIPCN, Conception.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

1. Introduction

Les matelas coffrant béton injecté in-situ sont de plus en plus utilisés contre l'affouillement des quais. Nous présentons ci-après, les méthodes de dimensionnement développées par l'AIPCN en 2015 et en 1997, ainsi que les recommandations développées par HAWKSWOOD *et al.*, (2018). Enfin deux projets : Le port du Havre et Port-au-Prince en Haïti illustreront ce système de protection et ces avantages.

Depuis une décennie, la taille des navires ne cesse d'augmenter. Cela nécessite des structures de quai plus profondes, et des protections anti-affouillement plus efficaces.

La mise en place d'une protection de matelas béton plus mince plutôt qu'un enrochement, réduit la taille des structures de quai, comme le montrent les figures 1 et 2.

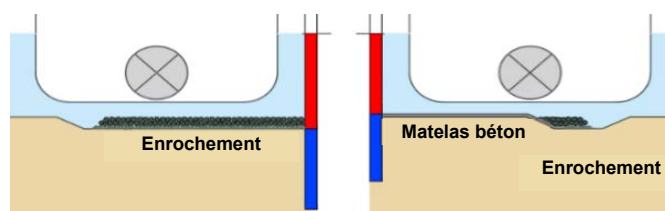


Figure 1. Quai en pieux /parois.

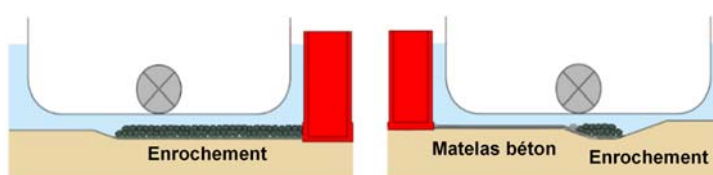


Figure 2. Quais en caissons ou en blocs.

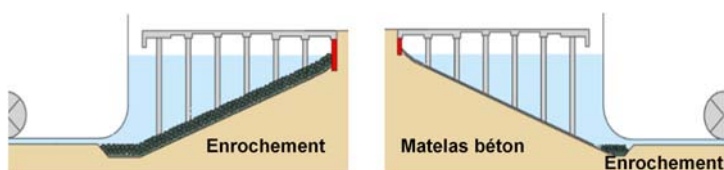


Figure 3. Quais à piliers ouverts.

De même, la protection des quais à piliers ouverts (figure 3) peut être construite grâce à des matelas coffrant béton injectés in-situ de manière terrestre. L'utilisation d'un matelas béton permet dans ces 3 cas d'économiser du temps et de l'argent.

2. Différents types de matelas de protection

2.1 Protection fermée et ouverte

La performance de la protection du matelas dépend largement du fait qu'elle soit *fermée* (figure 4) ou *ouverte* (figure 5) vis-à-vis des écoulements.

Les joints et bords *ouverts* génèrent des surpressions d'écoulement sous le matelas comme indiqué dans la recherche de HAWKSWOOD *et al.*, (2016).

Cet aspect affecte de manière significative les performances, l'épaisseur de protection nécessaire et les méthodes de conception à utiliser.

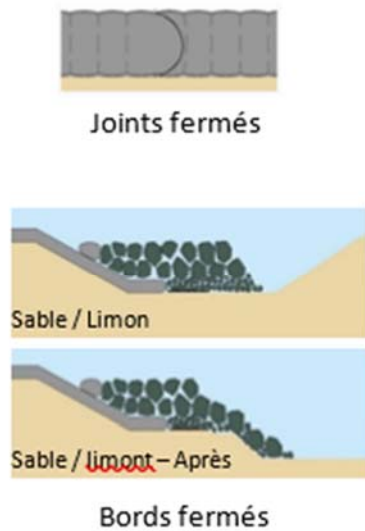


Figure 4. Protection « fermée ».

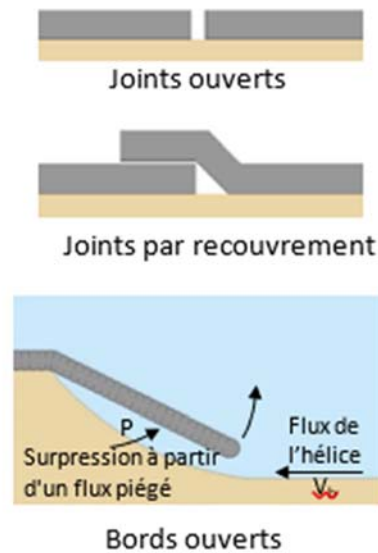


Figure 5. Protection « ouverte ».

2.2 Matelas coffrant en béton *in situ*

Avec un contrôle de qualité approprié, le matelas en béton *in situ* peut être installé de manière fiable comme une protection *fermée*. Il forme alors une couche homogène et cohésive de béton dont les performances sont fiables et dimensionnées par des méthodes de conception établies.

2.3 Matelas préfabriqué

Les matelas préfabriqués tels que les matelas en blocs de béton, les matelas en asphalte et les matelas en gabions ne constituent généralement pas une couche de matériau homogène et cohésive. Il est plus difficile d'obtenir des joints fiables lorsque l'on met en place des matelas lourds en conditions marines.

3. Action de l'hélice

Dans les calculs présentés par la suite, la nomenclature des symboles de chaque paramètre utilisé est la suivante :

V_o	Vitesse max. du jet de l'hélice	w	Largeur entre les ondulations
V_b	Vitesse du jet sur le lit	I_Q	Facteur d'ondulation de surface
(c)	Coefficient pour le type d'hélice	C_s	Coefficient de stabilité à l'aspiration
f	/ de la puissance du moteur à quai	C	Distance entre le bout de l'hélice et la

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

P	Puissance du moteur		protection contre l'affouillement
D_p	Diamètre de l'hélice	ρ	Densité
R	Rayon de l'hélice	Δ	Densité relative de flottabilité
D_{min}	Epaisseur de protection Min.	C_F	Coeff. de stabilité pour l'écoulement
u	Ondulation de surface	g	Accélération due à la gravité

3.1 Vitesse du jet de l'hélice

L'écoulement maximal du jet se produit derrière les hélices ouvertes où il se resserre. Dans les postes d'amarrage, la vitesse maximale du jet se produit normalement lorsque le navire est à l'arrêt ou se déplace lentement, généralement pendant le désarrimage. Elle peut être calculée à partir de la formule établie (1) :

$$\text{Vitesse max. du jet de l'hélice} \quad V_o = (c) \left(\frac{f P}{\rho D_p^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

avec :	Coefficient pour les hélices ouvertes	(c) = 1.48
	Coefficient pour les hélices carénées (avec buses de Kort)	(c) = 1.17
	Diamètre de l'hélice (m)	D_p
	Puissance du moteur (kW)	P
	Rapport de la puissance du moteur à quai	f
	Densité de l'eau, Eau de mer 1.03 t/m ³	ρ

Cette équation est couramment utilisée en considérant les recommandations pour le rapport de la puissance à quai (f) du document 180 de l'AIPCN (2015).

3.2 Vitesse du jet sur le lit

La vitesse maximale du jet sur le lit V_b dépend de la vitesse maximale du jet de l'hélice V_o , du type d'hélice, du rapport de dégagement de l'hélice C/R et de la présence ou non d'un gouvernail central derrière l'hélice. Un gouvernail central divise l'écoulement rotationnel en deux jets et crée une vitesse de lit plus élevée, comme l'illustrent les figures 6 et 7 de la modélisation CFD de Marin (HAWKSWOOD *et al.*, 2014).

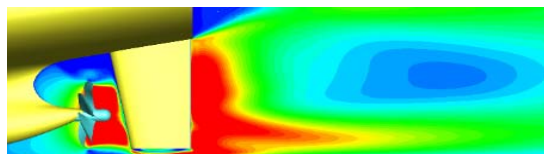


Figure 6. Vitesse avec gouvernail.

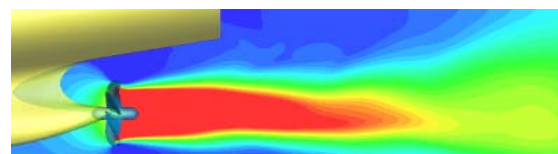


Figure 7. Vitesse sans gouvernail.

Pour les hélices simples, les vitesses du jet sur le lit peuvent être tirées de la figure 8 basée

sur les graphiques des travaux originaux de FÜHRER & RÖMISCH (1977) et du Bulletin PIANC 109 (RÖMISCH & HERING, 2002). Cette méthode prend en compte de manière adéquate l'effet significatif d'un gouvernail central (HAWKSWOOD *et al.*, 2016). Les jets des deux hélices se combinent et créent des vitesses de lit plus élevées que pour une seule hélice.

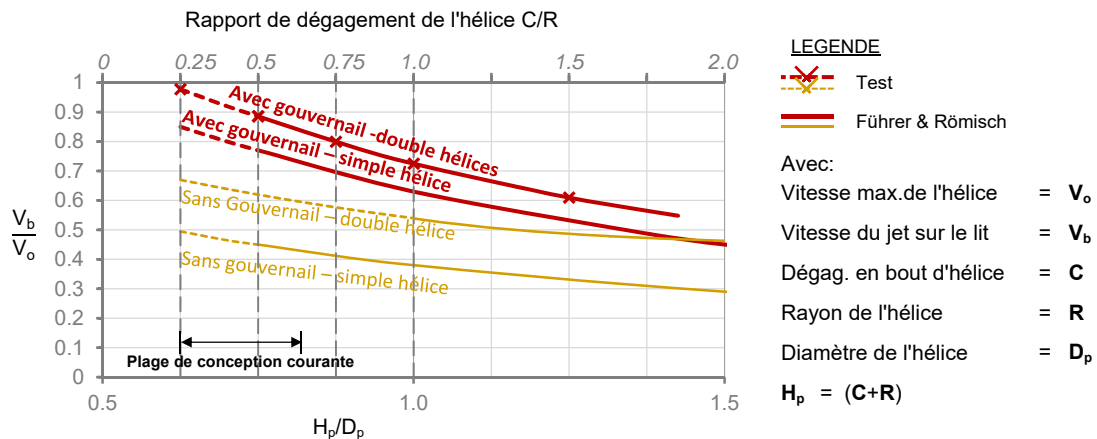


Figure 8. Vitesse du jet sur le lit, V_b graphique.

Des recherches récentes ont montré que la vitesse du jet sur le lit des Azipodes est similaire à celle des hélices avec un gouvernail. Pour les Azipodes multiples, courant pour les navires de croisière, des recommandations particulières se trouvent dans une note technique de HAWKSWOOD (2021).

3.3 Charges hydrodynamiques sur le lit

Des exemples de charges hydrodynamiques sur un lit sont illustrés à la figure 9 à partir d'essais sur modèle réduit effectués à Marin (HAWKSWOOD *et al.*, 2014). Une zone importante d'aspiration du lit se produit devant les hélices et des protections imperméables doivent être conçues pour cet effet.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

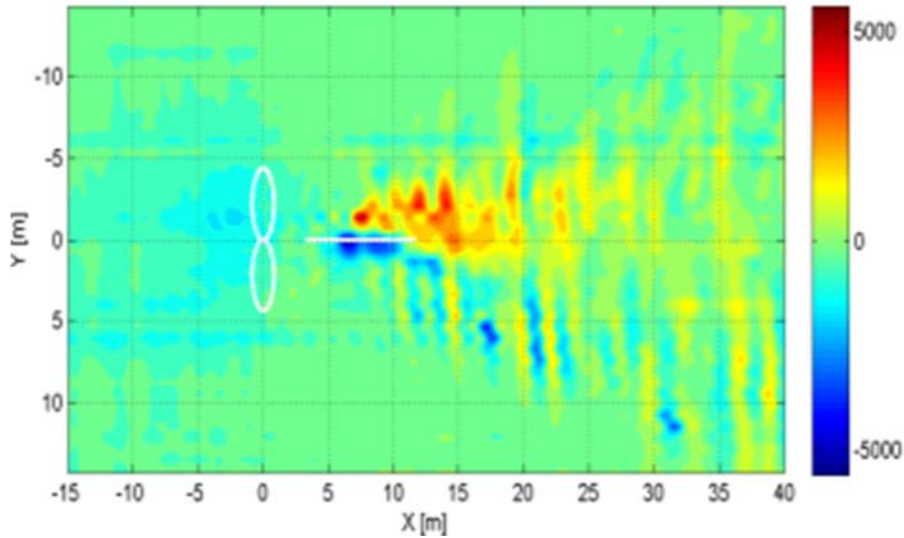


Figure 9. Avec gouvernail.

Derrière l'hélice, les charges hydrodynamiques (en Pa) sur le lit sont plus élevées mais plus variables. Dans le cas d'une hélice simple avec gouvernail, l'écoulement est divisé par le gouvernail et présente initialement une turbulence relativement faible qui augmente ensuite à mesure que la vitesse du jet diminue. Pour une hélice simple sans gouvernail, les vitesses atteignant le lit sont beaucoup plus faibles mais avec une turbulence et une rotation plus élevée.

4. Matelas de béton *in situ*

4.1 Introduction

Les matelas en béton coulé *in situ* résistent aux actions des navires. Un matelas à bord adaptable est souvent utilisé dans les couches érodables pour fournir un élément de bord *fermé* (figure 9). Un matelas d'épaisseur constante (Incomat[®]), comme le montre la figure 10, est normalement utilisé pour les fonds et les pentes immergés en permanence. Des matelas poreux sont nécessaires pour les zones de vagues, HAWKSWOOD & ASSINDER (2013).

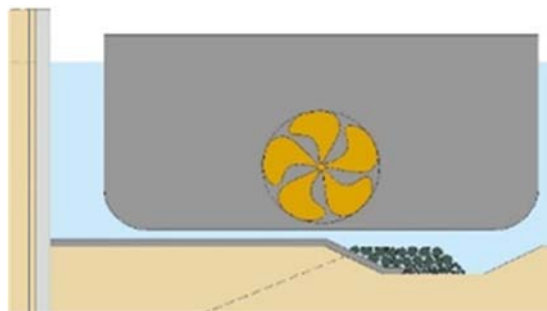


Figure 10. Section typique.

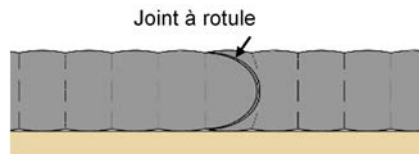


Figure 41. Matelas d'épaisseur constante (Incomat®).



Figure 12. Descente d'un matelas à dérouler par des plongeurs.

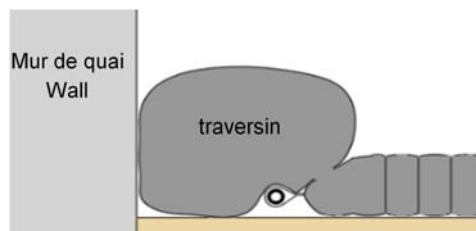


Figure 13. Etanchéité par traversin.

Des panneaux préfabriqués de matelas sont déroulés sous l'eau et assemblés entre eux par des plongeurs (figure 12), puis remplie par pompage d'un coulis de béton très fluide d'une résistance de 35 MPa. On obtient ainsi un tablier de dalles en béton lisse emboîtées sous l'eau.

Le coulis de béton est protégé du lessivage par l'enveloppe du matelas, qui est constituée de 2 couches de géotextile, interconnectées par des entretoises pour lui donner sa forme finale (figure 11). Les joints à rotule (figure 11) entre les panneaux de matelas sont assemblés par fermeture éclair ou couture. L'étanchéité aux quais est assurée par l'utilisation d'un "traversin" en béton (figure 13). Pour les murs en palplanches et les murs combinés, tous les espaces intérieurs sont remplis de béton trémie.

Le matelas en béton est généralement installé par des plongeurs travaillant depuis le quai sans équipement lourd, pour des courants inférieurs à 0,5 m/s. Le géotextile enveloppe du matelas étant perméable, le rapport eau/ciment à la surface est très faible, ce qui génère un béton ayant une très bonne résistance à l'abrasion. Une épaisseur minimale de 200 mm est recommandée pour les lits d'amarrage. Pour une protection dans des endroits plus critiques tels que les niveaux de fondation des murs de quai (voir figure 2), l'épaisseur est souvent portée à 300 mm.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

La plupart des postes d'amarrage sont dragués dans des strates de sol naturel où la couche de sol est surconsolidée et est donc généralement peu sujette au tassement. Dans les sols remblayés, ou dans d'autres cas où le tassement pourrait être un problème, la taille des panneaux du matelas peut être réduite pour augmenter la flexibilité.

Il est recommandé d'installer le matelas en béton coulé in situ en utilisant un système éprouvé de contrôle de la qualité maritime supervisé par des ingénieurs expérimentés.

4.2 Ondulation de la surface du matelas

Les matelas à faible ondulation de surface sont préférables et doivent être spécifiés car ils sont soumis à des charges d'aspiration hydrodynamiques plus faibles et répartissent mieux la charge. Les types de matelas présentant des taux d'ondulation plus élevés ($I_Q \geq 1.15$) sont moins efficaces et nécessitent une plus grande épaisseur.

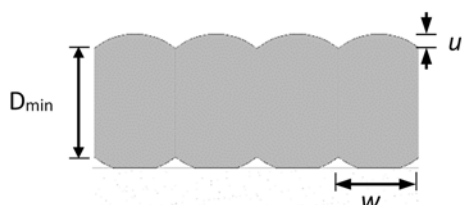


Figure 14. Ondulation de surface.

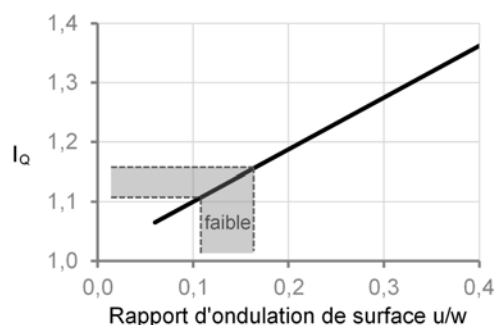


Figure 15. Facteur d'ondulation de surface I_Q .

Le facteur de surface d'ondulation I_Q pour la conception est issu de la figure 15 et est lié au rapport d'ondulation u/w .

5. Conception

5.1 Introduction

Le matelas de béton in situ sous les hélices doit être conçu pour :

- - l'aspiration dû à l'hélice
- - l'écoulement dû à l'hélice

Les méthodes de dimensionnement pour l'aspiration et l'écoulement de l'hélice sont tirées de HAWKSWOOD *et al.*, (2018) et concernent la protection *fermée*".

5.2 Dimensionnement pour l'aspiration dû à l'hélice

Le dimensionnement de l'aspiration dû à l'hélice est basé sur les travaux de WELLICOME (1981) repris dans HAWKSWOOD & ASSINDER (2013) et auxquels il fait référence dans le rapport 180 de l'AIPCN (PIANC, 2015). Pour des rapports de dégagement C/R plus faibles, l'aspiration est généralement la condition de dimensionnement pour les

actions du navire.

Le matelas en béton coulé in situ présente de bonnes propriétés de répartition des charges et est dimensionné pour la grande surface d'aspiration du lit qui se produit à côté de l'admission d'une hélice, comme indiqué à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.6** et illustré à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.9**.

La méthode de dimensionnement du poids mort est utilisée pour la protection fermée, basée sur la vitesse de sortie de l'hélice V_o , et est présentée dans un format simplifié par HAWKSWOOD *et al.*, (2018) ci-dessous :

$$\text{Dimensionnement simplifiée du poids mort} \quad D_{\min} = C_s \frac{V_o^2}{2 g \Delta} \times \frac{I_Q}{1.15} \quad (2)$$

avec C_s , coefficient de stabilité pour l'aspiration de l'hélice du matelas de béton *in situ* et I_Q , facteur d'ondulation de la surface du matelas (figure 15).

Le coefficient de stabilité pour l'aspiration d'une seule hélice C_s est tiré de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** L'aspiration de l'hélice sur le lit diminue lorsque le rapport de dégagement du lit augmente.

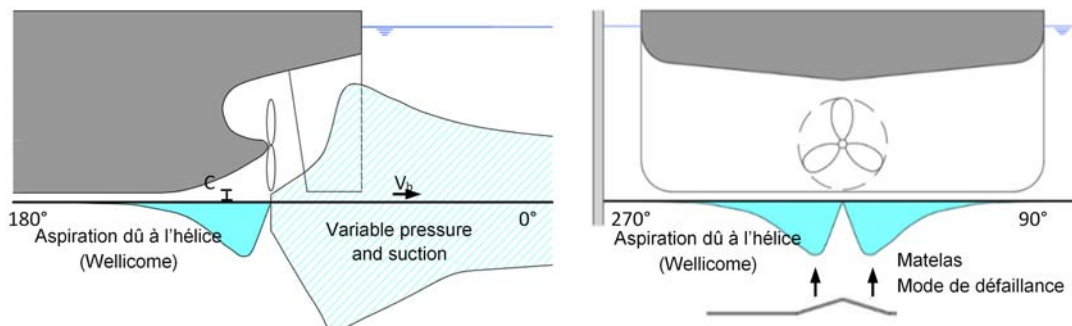
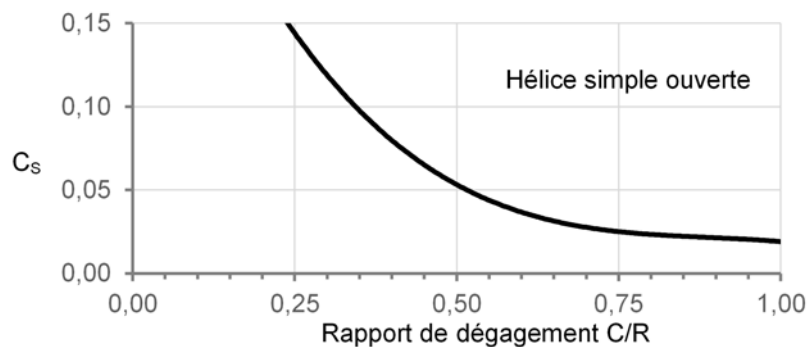


Figure 5. Aspiration due à l'hélice.

Cette méthode s'applique aux hélices ouvertes avec ou sans gouvernail. Pour les hélices doubles, la méthode de dimensionnement de HAWKSWOOD *et al.*, (2018) peut être utilisée.



Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Figure 17. Coefficient d'aspiration de l'hélice C_s .

5.3 Dimensionnement pour l'écoulement

La méthode de dimensionnement pour un matelas en béton *in situ*, "fermé" sous un écoulement par hélice, comme le montre la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, est basée sur la vitesse maximale du jet sur le lit V_b , comme indiqué ci-dessous :

$$D_{\min} = C_F \frac{V_b^2}{2g\Delta} \times \frac{I_Q}{1.15} \quad (3)$$

avec C_F , coefficient de stabilité du matelas en béton coulé *in situ* sous l'écoulement de l'hélice et I_Q , facteur d'ondulation de la surface du matelas (figure 14).

La vitesse du jet sur le lit peut être tirée de la figure 18 pour les hélices simples ou doubles et le coefficient d'écoulement de l'hélice C_F peut être tiré du tableau 1. Ceci est basé sur les exemples de performance de PILARCZYK (2000), HAWKSWOOD *et al.*, (2016) plus des essais pour les doubles hélices (HAWKSWOOD *et al.*, 2018). Un fond est supposé variable lorsque les ondulations du lit/les tolérances de construction dépassent 600 mm.

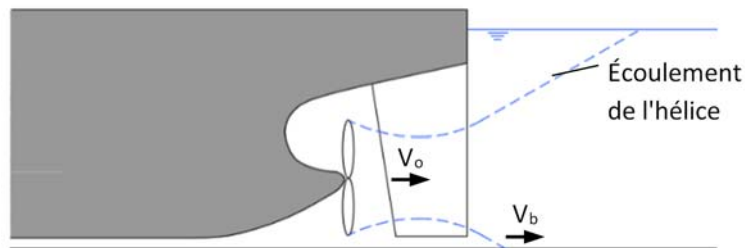


Figure 6. Écoulement de l'hélice.

Tableau 1. Coefficient d'écoulement du matelas C_F .

Condition de dimensionnement	C_F
Avec le gouvernail, lits plats	0.12
Avec gouvernail, Pentes + fond variable	0.16
Sans gouvernail, lits plats	0.19
Sans gouvernail, Pentes + fond variable	0.23

5.4 Écoulement du gouvernail dévié

Lorsque la protection est décalée par rapport à l'hélice, comme c'est le cas pour les quais ouverts sur pilotis (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), la protection doit être dimensionnée pour l'écoulement des gouvernails déviés, conformément à la norme PIANC (1997).

Une méthode pour calculer la vitesse du jet sur le lit V_b est présentée dans HAWKSWOOD *et al.*, (2018). L'épaisseur du matelas peut être dimensionnée pour un écoulement par le gouvernail dévié comme indiqué dans la section 6.3.

5.5 Écoulement du propulseur

L'écoulement du propulseur sur les lits d'accostage ou l'écoulement axial sur les pentes peut être calculé à partir des différentes méthodes de l'AIPCN (PIANC, 2015). L'épaisseur du matelas peut être dimensionnée pour l'écoulement à la section 6.3 comme précédemment.

5.6 Jetées ouvertes sur pilotis

Pour dimensionner un matelas en béton in situ autour des pieux, il faut calculer l'augmentation de la vitesse locale due au blocage des pieux et utiliser une vitesse moyenne prudente sur un panneau de matelas efficace dans l'équation (3) pour le dimensionnement de l'épaisseur. Lorsque les jets de navires impactent des pentes, une pression positive stabilisante est créée et un facteur de pente n'est pas nécessaire. Le matelas en béton doit être installé sur des pentes stables car il ne contribue pas à la stabilité du talus.

6. Dimensionnement de la protection des extrémités

6.1 Profondeur et type de protection des extrémités

L'affouillement des extrémités est le risque le plus important pour un matelas de protection. Il nécessite une évaluation de l'affouillement et le dimensionnement d'une protection efficace. Les meilleures estimations des profondeurs d'affouillement des extrémités sont celles issues par comparaison avec des navires et des sols de lit similaires. L'encastrement passif des extrémités présente la meilleure durabilité et est couramment proposé pour au moins 50 % de la profondeur d'affouillement estimé, comme le montre la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Une extrémité réactive peut être conçue pour le reste de la profondeur de dimensionnement de l'affouillement en utilisant soit un matelas de bord adaptable ou soit traditionnellement un enrochement.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

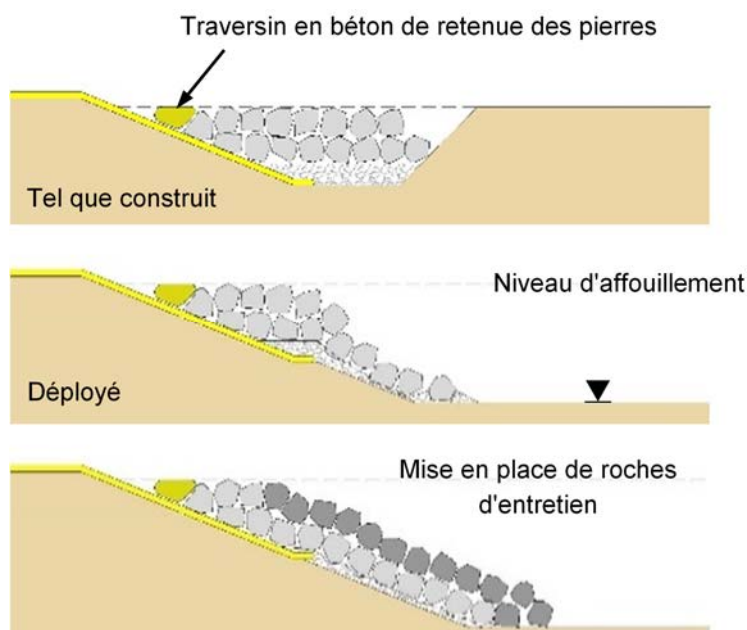


Figure 7. Entretien du matelas à bord adaptable.

6.2 Enrochement aux extrémités

Dans le cas d'un écoulement à hélice, la quantité de roches de protection nécessaire dans un matelas à encastrement passif doit permettre d'obtenir au moins une épaisseur d'enrochement sur une pente de 3H/1V et ce jusqu'au niveau d'affouillement final estimé (HAWKSWOOD *et al.*, 2016). Pour des performances plus pérennes, il est suggéré d'ajouter 50 % de roches supplémentaires, comme le montre la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, représentée par « Déployé ». Cela offre également une plus grande sécurité et robustesse, car les profondeurs d'affouillement des extrémités sont souvent difficiles à estimer, tout comme les caractéristiques des futurs navires.

Les matelas à bord adaptable peuvent être surveillés et entretenus. Dans les ports, il est courant de contrôler chaque année les performances de la protection du lit du quai.

7. Cas concrets

7.1 Le Havre Port 2000, France (Entreprise: Soletanche Bachy, Bureau d'étude: Proserve/IMDC/GPMH)

Les nouveaux quais à conteneurs 11 et 12 sont en cours de construction dans le port du Havre pour des porte-conteneurs de 18 m de tirant d'eau. Le mur de quai est formé par un mur de diaphragme avec une protection contre l'affouillement (figure 20) fournie par un matelas de béton in situ de 260 mm (Incomat[®]).

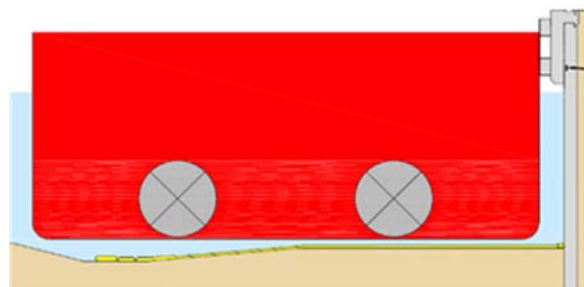


Figure 20. Le Havre.

7.2 Port-au-Prince, Haïti (Entreprise: GLF (USA), Bureau d'étude: Technital, 2015)

Le nouveau quai sur pieux remplace les postes d'amarrage pour conteneurs qui se sont effondrés en raison de la liquéfaction lors du tremblement de terre de 2010. La méthode de construction terrestre a été utilisée avec des pieux et des poutres de tablier construits sur un sol remblayé avant l'excavation de la pente entre ces poutres.

Un matelas de béton in situ de 150 mm (Incomat[®]) a été utilisé ainsi qu'un matelas poreux dans la zone de batillage (figure 21).

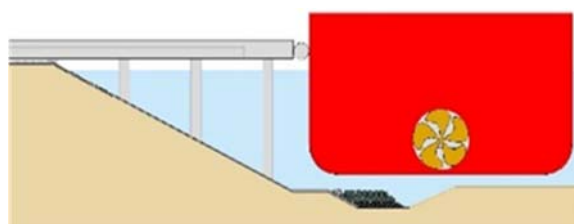


Figure 8. Port-au-Prince.

8. Conclusion

Les protections par matelas béton présentent des avantages indéniables en termes d'optimisation du phasage chantier, de rapidité d'exécution et de diminution globale du coût de l'ouvrage. Leur dimensionnement doit être effectué selon les règles de l'art, et les points singuliers de chaque projet regardé avec attention (extrémités, raccord aux ouvrages existants, zone de batillage, ...).

9. Références

FÜHRER M., RÖMISCH K. (1977). *Effects of modern ship traffic on inland and ocean waterways and their structures*, in proceedings of 24th International Navigation Congress, PIANC, Leningrad, Russia, pp. 236-244.

HAWKSWOOD M.G., ASSINDER P.J. (2013). *Concrete mattress used for berth scour protection*, GhIGS GeoAfrica 2013 Conference, Accra, Ghana, 18 – 20 November 2013, 10p., <https://proserveltd.co.uk/wp-content/uploads/2020/07/concre1.pdf>

HAWKSWOOD M.G., LAFEBER F.H., HAWKSWOOD G.M. (2014). *Berth scour protection for modern vessels*, PIANC World Congress 2014, San Francisco, USA, 20p.,

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

<https://proserveltd.co.uk/wp-content/uploads/2020/08/2014-Paper-Berth-Scour-Protection-for-Modern-Vessels.pdf>

HAWKSWOOD M.G., FLIERMAN M., DE HAAN R., KING M.G., GROOM J.A. (2016). *Propeller action and berth scour protection*, PIANC-COPEDEC IX, Rio de Janeiro, Brazil, 21p.,

HAWKSWOOD M.G., GROOM J.A., HAWKSWOOD G.M. (2018). *Berth protection for single & twin propellers*, PIANC-World Congress, Panama City, Panama, 20p.,

https://coms.events/pianc-panama/data/full_papers/full_paper_224.pdf

PIANC (1997). *Guidelines for design of armoured slopes under open piled quay walls*. Report of Working Group 22, Bulletin no 96, 38p.

PIANC (2015). *Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships*. MarCom Working Group 180, Report 180, 129p. ISBN 2872232230, 9782872232239

PILARCZYK K.W. (2000). *Correspondance 02/08/2011*.

RÖMISCH K., HERING W. (2002). *Input data of propeller induced velocities for dimensioning of bed protection near quay walls*, Engineering, PIANC Bulletin 109, pp. 5-11. ISSN 0374-1001

WELLICOME J.F. (1981). *Bottom suction loads due to propeller scour action and ship movements*, Technical report, University of Southampton, Department of ship science, 1981, pp. 1–41, https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/945/676/RUG01-002945676_2021_0001_AC.pdf