

Amortissement de dérive et visqueux des corps flottants Application à l'aménagement côtier profond

Damien Trassoudaine et Mamoun Naciri Single Buoy Moorings Inc. 24, avenue de Fontvieille, PO Box 199 MC 98007 Monaco cedex

Le travail présenté concerne l'amortissement de dérive lente et l'amortissement d'origine visqueuse des corps flottants. Une formulation heuristique de l'amortissement de dérive a été confrontée à des données expérimentales et des résultats satisfaisants ont été constatés. Une étude bibliographique des théories actuelles traitant des effets de la viscosité du fluide sur la carène d'un flotteur a été effectuée. Par analogie avec les modèles de dynamique sédimentaire, une méthode de calcul de la force de frottement instantanée s'exerçant sur un flotteur ancré est proposée.

1 Introduction

La construction d'ouvrages de protection portuaire sur des zones côtières accores, se heurte à des profondeurs importantes à quelques dizaines de mètres de la côte. Des structures gravitaires paraissent alors difficilement réalisables d'un point de vue technique, d'autant que leur coût devient considérable. Il est donc souvent plus adapté et profitable d'opter pour des structures flottantes ancrées. Une estimation précise de l'amplitude des mouvements horizontaux d'un corps flottant est alors essentielle pour la conception des systèmes d'ancrage. L'amplitude de ces mouvements est dictée par l'importance de l'amortissement d'où l'intérêt qui est porté à mieux cerner la contribution de divers phénomènes à ces processus.

2 Amortissement de dérive

2.1 Formulation

Les efforts de dérive induits par la houle sur un corps flottant sont influencés par sa vitesse de dérive U. L'amortissement de dérive est défini comme la dérivée des efforts par rapport à la vitesse U. La formulation proposée par Clark *et al.* (1993) et Aranha (1991,1994,1996) permet de relier les fonctions de transfert quadratique d'amortissement de dérive en cavalement $B(\omega)$, et d'effort du second ordre $F_d(\omega)$ (appelée QTF, "Quadratic Tansfer Function"):

$$B(\omega) = -\frac{\partial F_d}{\partial U} = \frac{4\omega}{g} \cdot F_d(\omega) + \frac{\omega^2}{g} \cdot \frac{\partial F_d(\omega)}{\partial \omega}$$
(1.1)

2.2 Résultats expérimentaux

La formulation (1.1) est comparée avec des valeurs mesurées en bassin pour trois flotteurs différents. Dans la Figure 2.1.a, les valeurs expérimentales de $B(\omega)$ obtenues pour un tanker sont en accord avec les calculs, excepté pour les hautes fréquences où les valeurs mesurées sont plus faibles. La Figure 2.1.b montre pour une barge, que l'amortissement calculé de deux façons différentes est proche des valeurs expérimentales. La comparaison des valeurs d'amortissement mesurées et calculées pour une seconde barge, fait apparaître des écarts (cf. Figure 2.1.c) pouvant être dus à la précision du calcul des gradients $\partial F_d / \partial \omega$.



Bien que la formulation proposée par Clark *et al.* (1993) ne repose pas sur des fondements théoriques solides, elle n'en apporte pas moins des résultats encourageants au vu des comparaisons avec les mesures en bassin. Toutefois, il serait souhaitable d'étendre cette comparaison à d'autres flotteurs et de considérer des incidences de houle obliques par rapport à l'axe du flotteur.

3. Amortissement d'origine visqueuse

3.1 Introduction

Dans le cas d'un flotteur ancré et dérivant lentement, l'amortissement résultant des effets visqueux sur la carène peut être séparé en amortissement de friction (mouvement de cavalement) et amortissement de trainée (mouvement d'embardée et de lacet). Cet article abordera uniquement l'amortissement de friction.

3.2 Bibliographie

Les formulations existantes traitant de l'amortissement de friction (Jonsson (1967), Faltinsen (1990), Molin (1993)) ne s'appliquent pas aux flux couplés. Dans le cas présent, le régime est pratiquement toujours turbulent et le flux induit par la houle impose sa turbulence au flux induit par le courant. Ainsi, l'amortissement basse fréquence sera certainement affecté par la présence des vagues.

La couche limite se développant au voisinage d'un fond marin en présence de houle et courant est un sujet essentiel pour les sédimentologues car au coeur des modèles de prévision de transport sédimentaire. A ce titre de nombreux travaux existent : Jonsson (1980), Kajiura (1968), Myrhaug (1982), Hagatunk (1986), You et al. (1991), Tolman (1992), Soulsby et al. (1993).

Le frottement visqueux sur un flotteur est traditionnellement déterminé en assimilant la carène à une plaque plane de longueur et surface mouillée identique. La force de frottement qui s'exerce sur la carène est obtenue à l'aide d'un facteur de forme (1+k). Les valeurs typiquement admises de k se situent, pour un tanker, entre 0,2 et 0,4.

Il est ici proposé de faire une analogie entre la couche limite au voisinage d'un fond marin et celle existant à proximité d'une plaque plane verticale assimilée à une carène. Cette audacieuse analogie requiert en toute rigueur la vérification des deux conditions suivantes :

- la direction du gradient de vitesse dans la couche limite (verticale pour un fond marin et horizontale sur la carène) ne remet pas en cause le bien-fondé des modèles,
- la trajectoire des particules sous l'effet des vagues hors couche limite (monodirectionnelle près du fond et elliptique près de la surface) n'influe pas sur le bien-fondé des modèles.

Une réflexion est en cours à ce sujet.

3.3 Modèles paramétrés de couche limite houle-courant

3.3.1 Contrainte induite par le courant

Le profil de vitesse dans la couche limite est supposé logarithmique:

$$u(z) = u^* / \kappa \ln(z / z_0)$$
(2.1)

où $\kappa \approx 0.40$ désigne la constante de von Karman, u^* la vitesse de frottement et z_0 la longueur de rugosité. La contrainte de cisaillement τ_c est définie par : $\tau_c = \rho(u^*)^2 = \rho C_d U_c^2$ où U_c est la vitesse du courant à une distance z_c de la paroi. Le coefficient de frottement associé au courant s'exprime alors par :

$$C_d = \left(\kappa / \ln(z_c / z_o)\right)^2 \tag{2.2}$$

La longueur de rugosité z_0 peut s'exprimer en fonction du nombre de Nikuradse k_s par la formule : $z_0 = k_s / 30$. Dans les modèles de dynamique sédimentaire, le nombre de Nikuradse est lié à la taille des grains de sable ou des rides éventuelles. Dans notre cas on prendra, par analogie avec un fond sans rides, $k_s \approx 3D$ où D représente en dynamique sédimentaire, le diamètre des grains.

Le calcul de τ_c a été effectué en assimilant le diamètre D à la taille des excroissances pouvant se developper sur la coque. Deux états de rugosités sont ainsi considérés : D = 1 cm et D = 4 cm en plus du cas lisse.

3.3.2 Contrainte induite par la houle

La contrainte de cisaillement maximale générée par la houle τ_w est exprimée par :

$$\tau_w = 1/2\rho f_w (a\omega)^2 \tag{2.3}$$

où f_w est le coefficient de frottement associé à la houle et $a\omega$ la vitesse orbitale au voisinage de la surface libre. Dans le cas rugueux, le coefficient de frottement f_w est déterminé selon Soulsby *et al*, (1993) :

$$f_w = 1.39 \left(a \,/\, z_o \right)^{-0.52} \tag{2.4}$$

où *a* désigne l'amplitude du mouvement orbital des particules d'eau. Dans le cas lisse, l'approximation de Jonsson (1967) faisant intervenir un nombre de Reynolds est utilisée :

$$f_w = 0.09 \,\mathrm{Re}^{-0.2}$$
 avec $\mathrm{Re} = a^2 \omega / v$ (2.5)

3.3.3 Contrainte en flux couplés houle-courant

A partir des contraintes de cisaillement liée au courant τ_c et à la houle τ_w , l'influence relative houle-courant est déterminée par le rapport $x = \tau_c / (\tau_c + \tau_w)$. Les contraintes moyenne τ_m et maximale τ_{max} sont alors obtenues grâce à un des modèles paramétrés de couche limite (cf. Soulsby *et al.* (1993)). Un coefficient de frottement corrigé C_d^+ peut être calculé suivant :

$$C_{d}^{+} = \tau_{m}^{-} / \rho U_{c}^{2}$$
(2.6)

La contrainte corrigée due à la houle τ_w^+ s'écrit : $\tau_w^+ = \tau_{max} - \tau_m$. Le coefficient de frottement corrigé est alors déduit :

$$f_{w}^{+} = \tau_{w}^{+} / (\frac{1}{2}\rho(a\omega)^{2})$$
(2.7)

Connaissant les coefficients C_d^+ et f_w^+ , la contrainte instantanée est obtenue :

$$\tau(t) = \rho C_d^{+} |U_c| U_c + \frac{1}{2} \rho f_w^{+} |u(t)| u(t)$$
(2.8)

où U_c désigne la vitesse moyenne du courant à la hauteur z_c et u(t) la vitesse orbitale. Dans (2.8) le déphasage entre $\tau(t)$ et u(t) n'est pas pris en compte. Les Figures 3.1.a-b-c illustrent l'évolution des contraintes maximale et movenne normalisées en fonction de x en adoptant le modèle de Huynh-Thanh et Temperville (1991). Quand le flux est dominé par le courant, la contrainte moyenne tend vers la contrainte due au courant. A l'inverse quand la houle domine, la contrainte moyenne devient très importante par rapport à τ_c (voir Figure 3.1.a) le flux oscillatoire influe donc fortement sur le flux permanent. La Figure 3.1.b montre que $\tau_{max} / (\tau_c + \tau_w)$ est maximum quand le flux n'est ni dominé par la houle, ni par le courant ($x \approx \frac{1}{2}$). Or la quantité $\tau_c + \tau_w$ représente en fait la contrainte maximale si on suppose qu'il n'y a aucune interaction entre les deux flux. En terme de contrainte maximale, l'interaction la plus forte se produit quand les contraintes induites par la houle et le courant sont du même ordre. Quand la rugosité augmente, les contraintes normalisées diminuent. La rugosité atténue les interactions houle-courant (principalement en ce qui concerne la contrainte maximale).



<u>3.3.4 Evolution des coefficients de frottement</u> L'interaction houle-courant peut être mise en évidence en s'intéressant à l'évolution des coefficients corrigés par rapport à celle des coefficients déterminés pour des flux séparés (rapport C_d^+ / C_d et f_w^+ / f_w).

La figure 3.2 illustre l'évolution de C_d^+ / C_d et f_w^+ / f_w en fonction de $a\omega$.



Figure 3.2.a-b : Evolution des coefficents de frottement en fonction de la vitesse orbitale $a\omega(m/s)$ pour une rugosité de 1 cm.

Quand la vitesse orbitale des particules d'eau $a\omega$ augmente le rapport C_d^+ / C_d augmente quasi-linéairement alors que, comme prévu, f_w^+ / f_w tend rapidement vers 1. L'influence importante de la houle sur le courant, ainsi que le faible effet du courant sur f_w pour un flux dominé par la houle $(a\omega > U_c)$ sont mis en évidence. Il est vérifié que l'influence du courant sur le coefficient f_w^+ croît avec sa vitesse. Cette influence n'est vraiment sensible que pour des faibles valeurs de vitesse orbitale $a\omega$, et devient secondaire dès que $a\omega$ est de l'ordre de la vitesse du courant.

Les Figures 3.3.a-c montre, pour des vitesses de courant faibles, l'influence très importante de la houle sur le coefficient de frottement du courant.





3.4 Coefficient d'amortissement

3.4.1 Calcul de la force de frottement

La force de frottement instantanée est obtenue à partir de la contrainte de cisaillement $\tau(t)$.

$$F(t) = \tau(t) \times (1+k)S = F_m + f(t)$$
(2.9)

où $\tau(t)$ est défini par (2.8). F(t) comporte une composante moyenne F_m et une composante fluctuante F(t).

3.4.2 Evaluation d'un coefficient moyen

Une fois la force de frottement instantanée obtenue grâce à (2.9), le coefficient d'amortissement basse fréquence est évalué. En ne considérant que la composante moyenne de la force de frottement et en adoptant une formulation en vitesse relative, il vient :

$$F = \rho C_d^{+} | U_c - u_d | (U_c - u_d) \times (1 + k) S$$
(2.10)

où u_d désigne la vitesse de dérive lente du flotteur. Un coefficient d'amortissement basse fréquence B est assimilé au terme dans (2.10) proportionnel à u_d :

$$B = 2\rho C_{d}^{+} U_{c} \times (1+k)S$$
(2.11)

Ce coefficient est calculé pour une digue de longueur 300 m, largeur 46 m et tirant d'eau 16 m avec une houle d'amplitude 1,75 m et de période 12,5 s, et un courant de 0,8 m/s. La vitesse de dérive est évaluée pour une amplitude d'oscillation en cavalement de 5 m et une période de 2 minutes.

Les coefficients B sont comparés au coefficient proposé par Molin (1993) B_{Molin} relatif à un corps oscillant en l'absence de vagues.

Rugosité	lisse	1cm	4 cm	B _{Molin} (kN.s/m)
B(kN.s/m)	120	297	475	12

Les coefficients d'amortissement évalués en présence de houle et de courant sont beaucoup plus importants que le coefficient déterminé en l'absence de vagues. La rugosité augmente de façon notable la valeur du coefficient de frottement. Elle a ainsi une influence non négligeable sur l'amortissement.

3.5 Discussion

Une comparaison des différents modèles paramètrés existants est faite dans Soulsby *et al.* (1993) (cf. Figure 3.4). Des différences notables apparaissent entre modèles. Le modèle récent de Huynh-Thanh et Temperville (1991) a été utilisé pour les calculs présentés ici. Cependant, des modèles comme ceux de Bijker (1967) ou Grant et Madsen (1979) donnent des valeurs de τ_m et τ_{max} plus élevées. Les interactions jouent donc un rôle plus important, et le frottement ainsi que l'amortissement résultants devrait être plus élevés.



Figure 3.4 - Modèles paramètrés de couche limite houle-courant ; d'après Soulsby *et al.* (1993).



4. Conclusions

Deux sources d'amortissement ont été étudiées : l'amortissement de dérive et l'amortissement visqueux. La formulation heuristique de l'amortissement de dérive (1.1) a été validée par Clark *et al* pour le problème de diffraction de la houle par un réseau de cylindres verticaux. Cet article montre que cette formulation apporte des résultats satisfaisants pour un flotteur libre d'osciller, c'est à dire pour le problème de diffraction-radiation par un tanker et deux barges.

Le frottement visqueux sur un flotteur est calculé en prenant en compte les interactions entre le flux oscillatoire généré par la houle et celui induit par le courant, ainsi que la rugosité. L'influence importante du flux engendré par les vagues sur l'amortissement visqueux a été mise en évidence.

Toutefois, une analyse plus approfondie portant sur l'analogie faite entre la couche limite au voisinage du fond marin et celle se développant sur une paroi verticale serait souhaitable.

REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier Bernard MOLIN (ESIM) pour leur avoir suggéré l'étude de l'influence de la houle sur le frottement visqueux.

REFERENCES

Aranha, J.A.P. (1991) Wave groups and slow motion of an ocean structure. 6th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, MA 5-8, Woods hole.

- Aranha, J.A.P. (1994) A formula for wave damping in the drift of a floating body. J.Fluid Mech., 275, 147-155.
- Aranha, J.A.P. (1996) Second-order horizontal steady forces and moment on a floating body with small forward speed. J. Fluid Mech.
- Clark, P.J., Malenica S. & Molin B. (1993) A Heuristic approach to wave drift damping, *Applied Ocean Research* 15, 53-55.

Faltinsen, O.M. (1990) Sea loads on ships and offshore structures, *Cambridge University Press*. Hagatun, K. & Eidsvik, K.J. (1986) Oscillating turbulent boundary layer with suspended

sediments, Journal of geophysical research, vol. 91, NO. C11, pages 13,045-13,055.

- Huynh-Thanh, S. & Temperville, A. (1991) A numerical model of the rough turbulent boundary layer in combined wave and current interaction, *Sand Transport in Rivers, Estuaries and the Sea*, pp. 93-100.
- Jonsson, I.G. (1967). Wave Boundary Layers and Friction Factors, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., Tokyo.

Jonsson, I.G. (1980). A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers, Ocean Eng.

Molin, B. (1993) : Second-order Hydrodynamics Applied to Moored Structures, 19th WEGEMT School Nantes.

Myrhaug, D. (1982) On a theoretical model of rough turbulent wave boundary layers, *Ocean Eng.*, vol. 9, No 6, pp. 547-565.

- Sargeant, H. et al. (1974) Wave heights expressed in Engineering Terminology Proc. Int. Sym. on Ocean Wave Measurements and Analysis.
- Soulsby, et al. (1993) Wave-current Interaction within and outside the bottom boundary layer Coastal Eng., 21 41-69, MAST G6M.
- Tolman, H.L. (1992) An evaluation of expressions for wave energy dissipation due to bottom friction in the presence of currents, *Coastal Engineering*, 16 165-179.

Wichers, J. & Huijsmans, R. (1984) On the low frequency hydrodynamic damping forces acting on offshore moored vessels. Proc. Offshore Technology Conf., OTC 4813, Houston.

You,Z.-J.,Wilkinson D.L.,and Nielsen P.(1991) Velocity distributions of waves and currents in the combined flow, *Coastal Engineering*, 15 525-543.

Kajiura, K. (1968) A model of the bottom boundary layer in water waves, Bull. Earthq. Res. Inst. 46, 75-123.