
Modélisation du surenfoncement des navires

Pierre DEBAILLON * — **Emmanuel LEFRANCOIS** **
— **Philippe SERGENT** * — **Gouri DHATT** **

* Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales, BP 60039,
F-60321 COMPIEGNE. e-mail : prénom.nom@equipement.gouv.fr

** Université de Technologie de Compiègne, BP 20529, F-60205 COMPIEGNE
e-mail : prénom.nom@utc.fr

RÉSUMÉ. Connaître le surenfoncement des navires revêt des considérations économiques importantes. Sa parfaite maîtrise permettrait de moins surdimensionner la profondeur des chenaux de navigation et aussi de réduire la fréquence des dragages. Les méthodes de calcul existantes se révèlent peu précises [BAR 01], [TUC 05], [HER 04], aussi un système de modélisation itératif basé sur la méthode des éléments finis a été mis en place. Il couple un modèle hydrodynamique tridimensionnel avec un modèle d'équilibre structurel. Un programme de mise à jour du maillage actualise celui-ci pour un nouveau cycle de calcul hydrodynamique et d'équilibre structurel.

ABSTRACT. Squat has always been a disturbing factor in ship navigation security. For many years empirical formulations have been established [BAR 01], [TUC 05], [HER 04]. However, they are not very precise. So a numerical approach has been investigated. A first model calculates the water velocity field around the hull, and pressure forces. Then the second model computes the under keel clearance thanks to a force and momentum balance. The finite element mesh is updated with a third model for a new hydrodynamic running.

MOTS-CLÉS : Surenfoncement, navire, Bernoulli, maillage, éléments finis

KEYWORDS: Squat, ship, Bernoulli, mesh, finite elements

1. La physique du squat mise en équation

Cette partie décrit le phénomène du squat et comment le traduire en équations mathématiques afin de le modéliser.

Les principaux facteurs influant le squat sont la vitesse du bateau, le confinement des eaux, la finesse de la carène, les effets d'hélices, la houle, les variations du fond.

Dans un premier temps les variations temporelles ne sont pas prises en compte. Pour simplifier encore le problème, les effets d'hélices ne sont pas pris en compte.

L'équation de conservation de la masse pour un fluide parfait s'écrit sous la forme d'un Laplacien, après introduction de la fonction potentielle φ :

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \Delta \varphi = 0 \quad [1]$$

avec V la vitesse du fluide, u, v, w ses composantes dans le repère cartésien.

La relation de Bernoulli permet de calculer la pression en fonction de la cote z du point, de la profondeur d'eau H et de la vitesse d'écoulement amont V_s .

2. Système de modélisation numérique

2.1. Couplage de modèles

Le système de modélisation numérique consiste en un couplage de trois modèles, traduisant numériquement ce qui se produit pour un navire évoluant à vitesse stabilisée par profil de fonds constant. Au préalable, un maillage aux éléments finis est constitué. Le domaine est limité par quatre plans verticaux et fermé par un plan horizontal, percé par la carène du bateau, représentant la surface libre, et un ou plusieurs plans représentant les fonds. Le modèle hydrodynamique calcule les composantes de vitesse et la pression aux nœuds du maillage. Le modèle d'équilibre structurel détermine alors, à partir des pressions aux nœuds matérialisant la carène, un déplacement vertical appliqué à l'ensemble des nœuds de la carène. Un dernier modèle met à jour l'ensemble du maillage pour le modèle hydrodynamique, si l'équilibre n'a pas été atteint. Le fonctionnement du système de modélisation peut ainsi être synthétisé par la figure 1 :

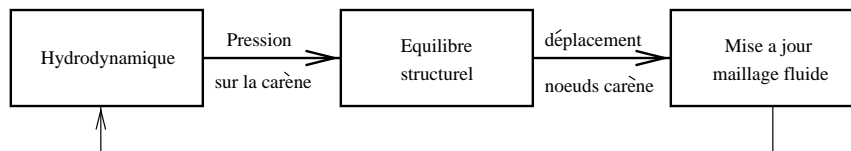


Figure 1. Principe du couplage.

2.2. Modèle hydrodynamique

Nous associons l'écriture faible suivante à l'équation 1, Γ désignant le contour du domaine Ω , \vec{n} la normale à l'élément de frontière $d\Gamma$, selon [BAT 02] :

$$W = - \int_{\Omega} \nabla \delta\psi \nabla \varphi \, d\Omega + \sum_{i=1}^7 \int_{\Gamma_i} \delta\psi \frac{\partial \varphi}{\partial n} \, d\Gamma_i = 0 \quad [2]$$

L'équation 2 ainsi obtenue fait apparaître des nouveaux termes fonction des conditions aux limites sur les frontières Γ_i (figure 2) :

- Frontière entrante Γ_1 condition de Neumann : $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -V_s$
- Frontière sortante Γ_2 condition de Dirichlet : $\varphi = 0$
- Autres frontières $\Gamma_{i>2}$ condition de Neumann : $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$

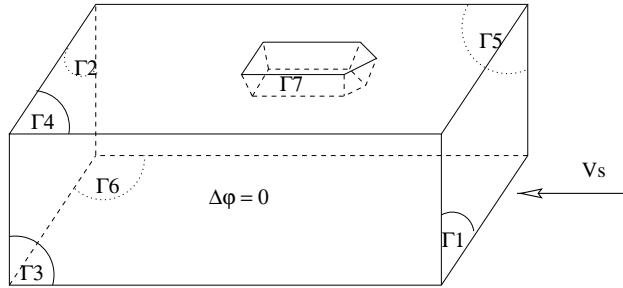


Figure 2. Domaine de calcul hydrodynamique.

2.3. Modèle d'équilibre structurel

Le modèle hydrodynamique fournit le champ de pression au niveau des nœuds matérialisant la carène du navire. Ce champ de pression est intégré par le modèle d'équilibre structurel pour obtenir Fpz , la résultante verticale des forces de pression hydrodynamique, \vec{k} étant le vecteur unitaire de l'axe vertical :

$$Fpz = \int_{carène} p \, d\vec{S} \cdot \vec{k} \quad [3]$$

En comparant Fpz avec W_b le poids du bateau, le modèle d'équilibre structurel génère un déplacement vertical des nœuds carène, Δz , fonction de la surface de flottaison S_f du bateau, Γ_f étant le contour de S_f , α un coefficient de relaxation :

$$\Delta z = \alpha \frac{W_b - Fpz}{\rho g S_f} \quad \text{avec} \quad S_f = \int_{x \in \Gamma_f} \int_{y \in \Gamma_f} dx \, dy \quad [4]$$

2.4. Modèle de mise à jour du maillage

Afin de préserver la qualité du maillage et éviter des croisements de mailles, il est nécessaire d'ajuster les coordonnées de l'ensemble des nœuds internes du domaine. Le modèle de mise à jour du maillage déplace d'abord les nœuds matérialisant la surface libre entourant le navire. Seules les coordonnées x et y des nœuds sont modifiées en fonction de leur proximité à la carène. Ainsi pour un nœud de la surface libre, le nœud de carène le plus proche est identifié. Soit r_1 la distance au nœud carène associé aux déplacements dx_1 et dy_1 . Le modèle calcule également la distance de prolongement r_2 jusqu'à la frontière verticale du domaine, comme le montre la figure 3.

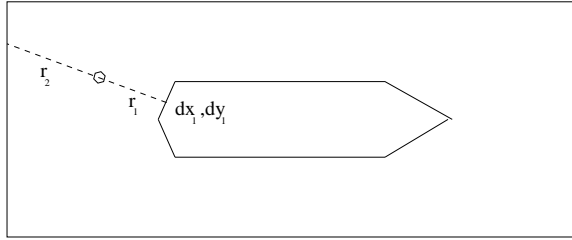


Figure 3. Déplacement des nœuds de surface libre.

Le modèle applique une pondération par les distances des déplacements de la carène, pour définir les déplacements dx_s et dy_s des nœuds surfaciques.

$$dx_s = \frac{\frac{1}{r_1} dx_1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \quad ; \quad dy_s = \frac{\frac{1}{r_1} dy_1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \quad [5]$$

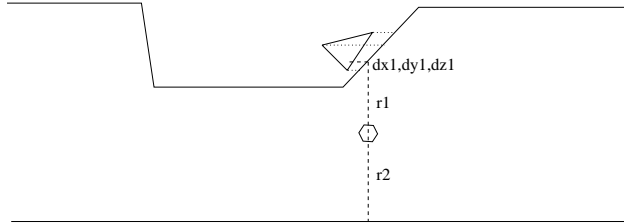


Figure 4. Déplacement des nœuds internes.

La figure 4 représente une coupe verticale du domaine. Le modèle repère l'élément appartenant à la frontière supérieure du domaine (surface libre ou carène) dont les nœuds entourent la projection verticale du nœud interne à actualiser. Les déplacements barycentriques supérieurs dx_1, dy_1, dz_1 sont déterminés et les distances r_1, r_2 calculées. Les déplacements du nœud interne sont analogues à ceux de la relation [5].

3. Application du système de modélisation

3.1. Configurations 2D verticales

Une solution analytique, donnant le surfoncement e , est obtenue en combinant la conservation des débits avec la relation de Bernoulli :

$$V_s = \sqrt{\frac{2 g e (H - T - e)^2}{H^2 - (H - T - e)^2}} \quad [6]$$

Deux configurations 2D verticales ont été étudiées. La profondeur H est de 10 m, un premier tirant d'eau T de 2 m (lège) et un second de 6 m (charge).

La solution analytique étant simplifiée puisqu'elle suppose constantes les vitesses sur une section verticale, deux calculs numériques ont été effectués. Un premier résultat, intitulé 'pression nodale', utilise la pression calculée aux nœuds de la carène par le modèle hydrodynamique. Le second, 'pression moyennée', remplace la pression nodale par une moyenne de pressions sur une verticale au nœud de la carène. Cette méthode permet de dégrader les résultats du modèle numérique afin de permettre la comparaison avec la solution analytique simplifiée. La figure 5 montre les comparaisons des résultats pour les deux configurations de tirant d'eau.

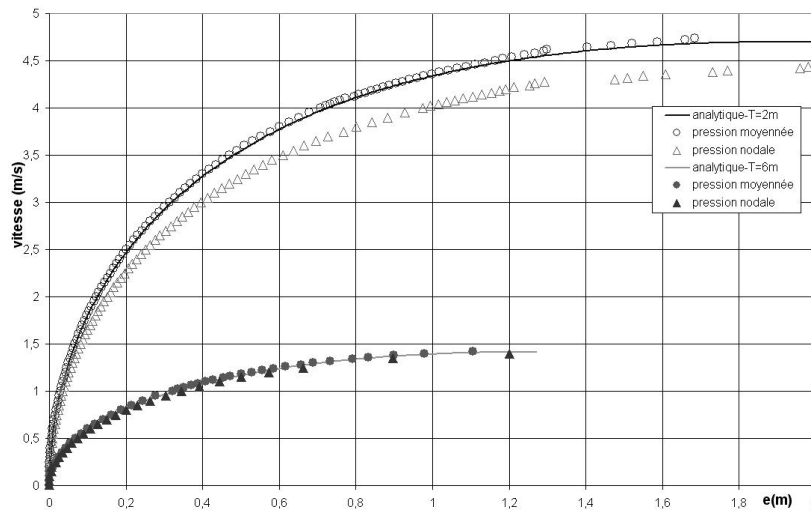


Figure 5. Comparaison des résultats.

Avec les pressions moyennées, les résultats du modèle numérique sont en bon accord avec la solution analytique. Avec les pressions nodales, des écarts logiques apparaissent pour $T = 2$ m. Pour l'autre configuration, les résultats sont très proches avec les deux méthodes de calcul de la pression. En effet, les vitesses sont plus faibles et la section plus réduite sous le bateau. Ainsi, l'écoulement est plus homogène sur une section verticale. La pression moyennée est proche de la pression nodale.

3.2. Etude paramétrique du confinement

Cette étude s'applique aux deux mêmes bateaux, de longueur 30 m, largeur 5 m, et les deux tirants d'eau. Pour chaque bateau, neuf nouveaux domaines sont maillés afin d'observer la prise en compte du confinement sur l'enfoncement dynamique e . La largeur du domaine est ainsi augmentée jusqu'à $B = 500$ m. La figure 6 montre l'évolution de e normalisée par l'enfoncement 2DV e_m , en fonction du confinement traduit par la largeur du bateau b rapportée à la largeur du domaine.

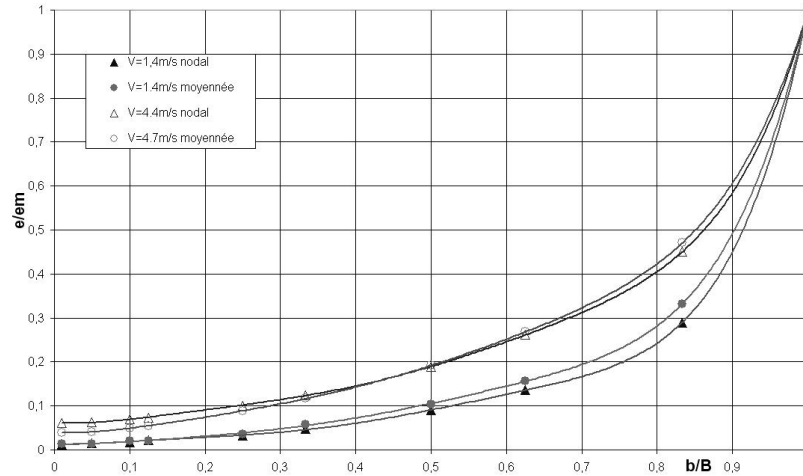


Figure 6. Etude paramétrique du confinement.

4. Conclusion

Un système de modélisation du surenfoncement de navires a été mis au point. Il consiste en un couplage de trois modèles, hydrodynamique, équilibre, mise à jour du maillage éléments finis. Les premiers résultats sont encourageants pour la suite.

5. Bibliographie

- [BAR 01] BARRAS C. B. "The phenomena of ship squat", *International Shipbuilding Progress*, N° 26, 1979.
- [BAT 02] BATOZ J. L., DHATT G. "Modélisation des structures par éléments finis", *Hermès*, Paris, 1990.
- [DEV 03] DEVAUCHELLE P. "Dynamique du navire", *Bibliothèque de l'Institut Français d'aide à la formation Professionnelle Maritime*, MASSON, 1986.
- [HER 04] HERVIEU R. "Le surenfoncement des navires", *Bibliothèque de l'Institut Français d'aide à la formation Professionnelle Maritime*, MASSON, 1993.
- [TUC 05] TUCK E. O. "Sinkage and trim in shallow water of finite width", *Schiffstechnik*, Vol. 14, 1967, 92-94.