

Prédiction numérique des aspects instationnaires du surenfoncement dynamique d'un navire dans des chenaux fortement confinés

Nasrine Mohamad-Alderf

Mécanique Acoustique et Matériaux (Roberval) - UMR 6253

Directeurs de thèse : Philippe Sergent et Emmanuel Lefrançois

Objectif

Le navire au repos a un certain enfoncement par rapport au niveau de l'eau c'est son tirant d'eau. Lorsque ce navire est mis en mouvement, sa vitesse donne naissance à un surenfoncement supplémentaire par rapport à son tirant d'eau c'est le surenfoncement dynamique.

Ce phénomène hydraulique expliqué par la loi de Bernoulli et dénommé squat en anglais, représente l'un des risques les plus courants pour le transport maritime. Il est le responsable principal d'un certain nombre d'échouages de navire par petits fonds, associés immanquablement à des risques à fort impact écologique (liés essentiellement aux navires pétroliers), un bilan économique lourd (montant de la restauration du navire, dédommagement,...) et parfois humain (le chavirement du Herald of Free Enterprise en 1987, où 193 personnes perdirent la vie).

Il y a plus d'une quarantaine d'années que les recherches scientifiques sur ce phénomène ont débuté, en aboutissant à des formules mathématiques permettant d'évaluer le squat en fonction des paramètres caractéristiques du navire, du milieu de navigation et de l'écoulement. En général, les approches actuelles pour prédire le surenfoncement des navires (théorique, empirique et numérique) partagent un point commun, celui de la définition d'un critère de stabilité lié à une vitesse dite critique que le navire ne doit pas atteindre sous peine de subir les effets d'un squat excessif. Outre des limitations liées aux domaines de validité de ces approches, la première restriction sévère que l'on peut noter pour la plupart d'entre elles est de ne pas prendre en compte des profils de fond variables (dunes, marche,...), ce qui peut, dans certains cas, conduire à des effets désastreux (Queen Elizabeth II, 1992). Enfin, tous ces modèles sont basés sur des conditions d'écoulement stationnaire et assument à chaque instant un équilibre quasi-statique du navire ne prenant donc absolument pas en compte les effets que la dynamique du navire peut induire sur le critère de stabilité.

En général, si un navire se heurte contre le fond d'une voie navigable, cela sera définitivement parce qu'il y aura la présence d'effets dynamiques mal connus et mal quantifiés. Malgré ce fait, il n'y a presque aucune étude théorique des effets dynamiques du surenfoncement (squat) des navires. Les travaux de ma thèse font les premiers pas pour répondre à ce besoin. Le principal but de cette thèse se focalise sur le développement d'une chaîne de traitement numérique ayant comme objectifs : La mise à jour du critère de stabilité classique d'un point de vue aussi bien dynamique qu'énergétique. Les résultats obtenus au cours de cette thèse contribuent à mieux définir et délimiter les risques potentiels de squat et assurer ainsi une meilleure sécurité de la navigation.

Méthodes et résultats

Dans le cadre de ma thèse, j'ai dans un premier temps, effectué une étude bibliographique sur le surenfoncement dynamique des navires. Cette étude présente une revue de littérature compréhensible du phénomène du squat et classe les modèles actuels selon leurs hypothèses. Cette revue est très bien équilibrée. Elle liste les accidents historiques reliés au squat et démontre un besoin de développer des outils pour l'analyse des effets dynamiques du squat.

Afin d'intégrer les effets dynamiques pour le calcul du squat, j'ai développé dans un premier temps, le modèle analytique d'équilibre dynamique. Ce modèle est basé sur le principe fondamental de la dynamique associé aux deux équations fondamentales de l'hydrodynamique : conservation des débits et conservation de l'énergie. D'un point de vue général, le modèle analytique d'équilibre dynamique m'a servi à montrer la coexistence de deux positions d'équilibre du navire : l'une stable, l'autre instable. La position d'équilibre stable est équivalente au squat stationnaire mentionné par les chercheurs dans ce domaine. En revanche, la position d'équilibre instable n'a pas été abordée dans les différents modèles stationnaires, ce qui constitue une originalité de ce travail. J'ai montré que le navire talonne lorsque sa position d'équilibre instable est atteinte. Cela m'a permis d'établir un critère de stabilité lié directement à cette position en montrant que cette dernière représente un fond virtuel pour le navire.

Le modèle analytique proposé a également été étendu de façon à prendre en compte les effets transitoires, ce qui m'a permis de développer les formulations mathématiques décrivant les comportements du navire pendant et après la phase d'accélération.



(a) Navire au repos

(b) Navire en marche

Cependant, il faut mentionner que ce modèle considère un fond constant et plat et une surface libre horizontale non-perturbée. Connaissant les effets importants entraînés par la variabilité du fond dans certaines conditions, j'ai été conduit à mettre en œuvre une simulation numérique du phénomène du squat. Le modèle numérique que j'ai proposé est construit autour d'une chaîne de traitement numérique modulaire et donc interchangeable. Il permet d'étudier l'interaction entre un écoulement potentiel à fond variable et à surface libre avec prise en compte de la dynamique d'un navire. Ce modèle numérique est articulé autour de cinq modèles indépendants :

- un modèle fluide : basé sur une approche d'écoulement potentiel par éléments finis linéaires.
- un modèle structure : basé sur la résolution de la dynamique d'un navire.
- un modèle de surface libre stationnaire.
- un modèle de déformation du maillage fluide (basé sur une approche de type pseudo-matériaux associée à la technique de sous mailles).
- un modèle de variation du fond.

Ces modèles sont couplés via un schéma de couplage décalé en temps.

Le critère de stabilité actuel imposé par le squat stationnaire montre que pour des vitesses d'avancement du navire inférieures à la vitesse critique le régime de navigation reste stable. Les applications que j'ai présentées pour les modèles analytique et numérique montrent qu'une instabilité du navire peut se produire à une vitesse inférieure à la vitesse critique à cause des effets instationnaires. Ce résultat remet donc en question le critère de stabilité défini par les modèles actuels.

Au cours de ces applications j'ai distingué deux types d'instabilité :

- Instabilité par vitesse critique : celle-ci est due à une réduction importante de la vitesse critique qui devient alors inférieure à la vitesse du navire, cette réduction résultant généralement d'une modification des conditions extérieures, par exemple, la variation de fond.
- Instabilité par perturbation initiale. Toute perturbation initiale comme une oscillation du navire se traduit par un apport supplémentaire d'énergie potentielle pouvant être convertie en énergie cinétique avec pour conséquence, le risque d'amplitudes suffisamment importantes pour atteindre la position d'équilibre instable. Le navire touche ainsi le fond même si sa vitesse reste inférieure à la vitesse critique. Parmi les cas possibles de perturbations initiales, j'ai traité :
 - le passage sur une série de dunes.

- la phase d'accélération et celle de décélération. J'ai montré qu'après la phase d'accélération, le navire se met à osciller autour de sa position d'équilibre stable associée à la vitesse du navire à la fin de cette phase. Ces oscillations peuvent conduire au talonnage à une vitesse inférieure à la vitesse critique.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse me permettent de proposer les recommandations suivantes pour les pilotes :

1. Il est important, pendant la phase d'accélération, de rajouter un surenfoncement supplémentaire au surenfoncement normal évalué par les formules actuelles (dans ma thèse, j'ai donné la formule mathématique de ce supplément au surenfoncement).
2. Tenir compte de la variation d'assiette (rotation autour de l'axe transversal du navire) lors de son passage en eaux peu profondes. Les navires les plus longs sont évidemment les plus concernés. Le navire risque de talonner à l'avant ou à l'arrière en fonction de sa forme. Dans ce cas, l'évaluation du squat par les formules qui négligent l'assiette n'est plus fiable.
3. Mise à jour de l'intervalle de sécurité entre la coque du navire et le fond du canal (pied de pilote brut) d'un point de vue dynamique en considérant que cette valeur est désormais donnée par la différence entre les deux positions d'équilibre (stable et instable).

Retombées et valorisation

Mes travaux de thèse ont été décrits par le Reviewer de l'International Journal for Numerical Methods in Fluids comme suit : results achieved in this paper are in very high scientific level and are the next step towards full numerical model of squat phenomenon analysis.

Mes résultats font l'objet des publications suivantes :

Reuves internationales à comité de lecture

1. Alderf N., Lefrançois E., Sergent P., Debaillon P. Dynamic ship response integration for numerical prediction of squat in highly restricted waterways. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2010.
2. Alderf N., Lefrançois E., Sergent P., Debaillon P. Transition effects on ship sinkage in highly restricted waterways. J. Engineering for the Maritime Environment, 2010, 224 (M2), 141-153. DOI 10.1243/14750902JEME170.
3. Alderf N., Sergent P., Lefrançois E., Debaillon P. Two virtual bottoms in unsteady squat, soumis.

Congrès international avec comité de lecture et actes

Alderf N., Lefrançois E., Sergent P., Debaillon P. Numerical prediction of ship squat by taking into account transient effects, SimHydro 2010, Sophia Antipolis, 2-4 Juin 2010.

Revue nationale à comité de lecture

Alderf N., Debaillon P., Sergent P., Lefrançois E., Aspects instationnaires du surenfoncement des navires. Revue Technique Maritime et Fluvial.

Congrès nationaux avec comité de lecture et actes

1. Alderf N., Lefrançois E., Sergent P., Debaillon P. Analyse de la réponse dynamique d'un navire pour la modélisation numérique du squat dans un canal. XIème Congrès Français de Mécanique, session 03 Hydrodynamique navale, Marseille, 24-28 Août 2009.
2. Alderf N., Lefrançois E., Sergent P., Debaillon P. Simulation numérique du phénomène de squat avec un modèle de couplage. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, 14-16 octobre 2008, Sophia Antipolis.

Communications dans les conférences nationales sans actes :

1. Séminaire PMB (Pôle Mécanique Brestois), 15 avril 2010, École Nationale Supérieure des Ingénieurs des Études et Techniques d'Armement, Brest (présentateur invité).
2. Séminaire annuel du laboratoire Roberval, 25 juin 2008, Centre Pierre Guillaumat, UTC, Compiègne, France.

