

SYNERGIE DE MODELISATIONS PHYSIQUE ET NUMERIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT D'ATTENUATEURS DE VAGUES D'UN CONVOI FLUVIAL

Synergy between physical and numerical modeling used for the development of ship waves attenuator

Théodora Cohen, Robin Amacher, Jean-Louis Boillat

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH),

Station 18, CH-1015 Lausanne

Tél: +41 (0)21 693, Fax: +41 (0)21 693 22 64,

e-mail: theodora.cohen@epfl.ch, robin.amacher@epfl.ch, jean-louis.boillat@epfl.ch

Le batillage résulte du déferlement des vagues générées par le passage d'une embarcation. Les effets qui en résultent sur le milieu aquatique sont l'érosion des berges et la destruction des habitats. Sur le canton de Genève, une grande partie des déchets ménagers est conduite à l'usine d'incinération par transport fluvial sur le Rhône. Le dispositif navigable, composé d'un pousseur fonctionnant au biocarburant et d'une barge pouvant contenir jusqu'à 170 tonnes de charge utile, génère des vagues qui altèrent les berges du Rhône en certains endroits. C'est pourquoi, une étude visant à développer des atténuateurs de vagues a été conduite en s'appuyant sur des mesures et observations in situ, sur la modélisation numérique 3D et sur la modélisation physique en bassin de carène. Le comportement du convoi a été analysé dans les conditions actuelles puis différentes solutions ont été testées et optimisées. L'analyse comparative des résultats numériques et physiques a fait apparaître des écarts significatifs liés en particulier au fait que la modélisation numérique considère le convoi comme un objet rigide. Le modèle physique s'est révélé plus consistant sur le développement du champ de vagues et sur la force de traînée. La complémentarité des approches numérique et physique a cependant confirmé son utilité dans la problématique traitée. Elle a contribué à l'interprétation réciproque des résultats pour l'évaluation de variantes. La solution retenue permet d'envisager une réduction de l'amplitude de la vague maximale de l'ordre de 23 à 41%, en fonction de la vitesse de navigation.

The waves generated by the passage of a boat break on the shore. The resulting effects on the aquatic ecosystem are the bank erosion and the habitat destruction. In Geneva, an important part of the domestic wastes is conveyed to the waste incineration plant by shipping on the Rhone River. The convoy, constituted of a tugboat and a barge, capable to carry 170 tons of waste, generate waves which deteriorate the banks of the river. Therefore, a study aiming to develop wave attenuator was conducted based on measurements and observations on field, on 3D numerical simulations and on physical modelling in a basin. The convoy behaviour was analysed in the actual conditions, then different solutions were tested and optimized. The comparative analysis of the physical and numerical results showed significant differences related to the fact that the convoy is considered as a fix object in the numerical simulation. The physical model is more consistent on the wave development and on the drag force. The complementarity of both approaches confirms however their utility for the study. They allow reciprocal interpretation of the results in order to evaluate variants. The final solution leads to a reduction of the maximum wave amplitude of 23 to 41% depending on the navigation speed.

I INTRODUCTION

Le batillage résulte du déferlement des vagues générées par le passage d'une embarcation. Les effets qui en résultent sur le milieu aquatique sont divers: érosion de berges [1], destruction d'habitats [2], augmentation de la turbidité de l'eau et de la sédimentation.

L'usine de traitement et de valorisation des déchets de Genève, aux Cheneviers, accueille depuis 1967 une partie des déchets ménagers genevois par transport fluvial sur le Rhône (environ 100'000 tonnes par an). Les convois sont chargés à la station de la Jonction, située à l'aval du lac Léman à la confluence du Rhône et l'Arve [3], et déchargés au pied de l'usine, juste en amont du barrage de Verbois (Figure 1). Le dispositif navigable, composé d'un pousseur fonctionnant au biocarburant et d'une barge pouvant contenir jusqu'à 170 tonnes de charge utile, génère des vagues qui altèrent les berges du Rhône au passage le plus étroit, situé entre les profils SIG 4 et 6 (Figure 2). Le cas critique est donc défini par les caractéristiques suivantes: vitesse relative du convoi 24 km/h, vitesse absolue du convoi 7 km/h, vitesse du courant 17 km/h, profondeur du Rhône 6.6 m et largeur du Rhône 60 m environ.

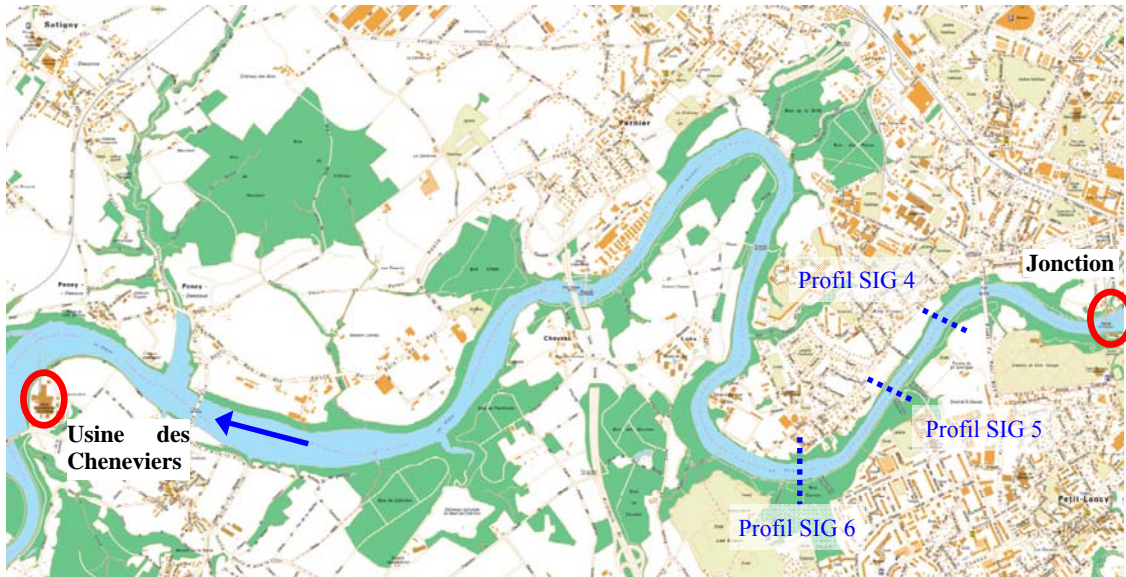


Figure 1: Carte du secteur de navigation sur le Rhône à Genève entre la Jonction et les Cheneviers



Figure 2: Convoi navigable (© SIG)

L’énergie (potentielle et cinétique) en Newton [$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$] contenue dans une houle ou vague est exprimée par (equ. 1):

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \Delta \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique du fluide [kg/m^3], g l’accélération gravitaire [m/s^2], Δ la longueur d’onde de la vague [m] et H l’amplitude de la vague [m].

Ainsi, pour abaisser l’énergie des vagues arrivant sur les rives, il faut réduire leur amplitude, qui elle-même dépend de la vitesse et de la géométrie du convoi. Comme la vitesse ne peut être réduite sur le trajet en raison de contraintes de manœuvrabilité, l’étude s’est concentrée sur des aménagements atténuateurs de vagues intégrés au convoi.

Les contraintes liées à la géométrie des aménagements proposés sont les suivantes (Figure 3): longitudinalement, le dispositif fixe ne doit dépasser ni les accroches de la barge au pousseur vers l’extérieur ni le point d’appui vers l’intérieur. Latéralement, il ne doit pas dépasser les bords de la barge. Verticalement, le dispositif fixe ne doit pas dépasser le dessous de la barge de plus de 0.4 m ni descendre en dessous de la coque du pousseur.

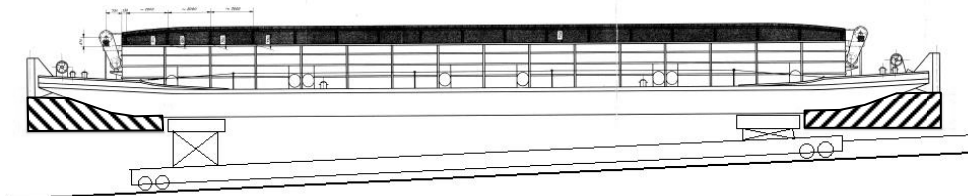


Figure 3: Schéma du treillage de la barge aux Cheneviers; les zones hachurées représentent la marge de manœuvre pour des modifications géométriques

Afin d’examiner le comportement du convoi dans les conditions actuelles puis de tester des solutions susceptibles d’atténuer les vagues générées, l’étude s’appuie sur des mesures et observations in situ, sur la modélisation numérique 3D et sur la modélisation physique en bassin de carène.

II MÉTHODOLOGIE

L'approche méthodologique est organisée en quatre étapes : le calage, la prospection, l'optimisation et la validation.

En premier lieu, un modèle numérique tridimensionnel du convoi a été implémenté et configuré de manière à reproduire le plus fidèlement possible les comportements observés et les vagues mesurées in situ lors de la campagne de 1972 [4]. Le logiciel utilisé, Flow 3D, a déjà été testé avec des résultats satisfaisants sur la forme des vagues générées et la résistance de pression pour la modélisation de l'écoulement autour d'une carène [5]. Par contre, il n'offre pas une précision suffisante pour la résistance de frottement. Afin de simplifier les calculs, la barge et le pousseur sont considérés dans la simulation comme des objets fixes, dont l'enfoncement correspond au cas statique. Cette hypothèse est acceptable [5] mais constitue une source d'imprécision. Le maillage a été choisi de manière à faire apparaître un schéma classique de propagation des vagues (Figure 4).

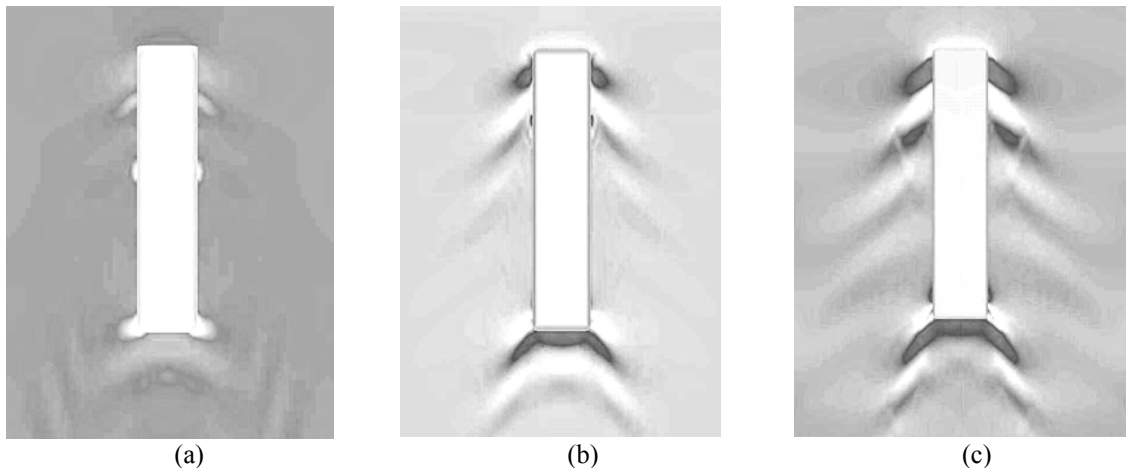


Figure 4: Vagues modélisées avec différents maillages (barge seule avec $V_{\text{relative}} = 15 \text{ km/h}$)
(a) maillage grossier (env. 37'000 cellules)
(b) maillage moyen (env. 280'000 cellules)
(c) maillage fin (environ 1'500'000 cellules)

En second lieu, différents types d'aménagement visant à réduire l'amplitude des vagues ont été apportés sur le convoi. Cinq aménagements ont été testés numériquement, consistant en un ajout de bulbes à l'arrière et à l'avant de la barge, d'une plaque à l'arrière de la barge, d'une petite plaque à l'arrière du pousseur, d'une plaque moyenne à l'arrière du pousseur et en la combinaison d'une plaque à l'arrière de la barge et d'une grande plaque à l'arrière du pousseur.

Parallèlement, des essais sur modèle physique à l'échelle 1:30 ont été conduits en bassin de carène. Ces essais ont été effectués dans un canal de 2 m de largeur et 43 m de longueur (Figure 5, a). Le convoi était tiré à différentes vitesses par un chariot motorisé avec un système d'attache relié à une balance permettant de mesurer la force de trainée (Figure 5, b). Les vagues produites par le passage du convoi ont été mesurées par des sondes à ultrasons placées à 80, 40 et 24 cm du convoi (24, 12 et 7 m sur prototype). (Figure 5, a). Les maquettes ont été fabriquées en mousse Airex C70 puis peintes et lestées avec des masselottes en acier inox (Figure 5, c,d,e). Deux phases expérimentales ont été nécessaires pour régler les conditions de bords de l'installation et optimiser la solution retenue. Chaque essai a été répété cinq fois de manière à obtenir une moyenne robuste de la hauteur des vagues et vérifier la reproductibilité des tests

Finalement, les solutions optimales ont été modélisées numériquement avec les mêmes conditions de bord que les simulations initiales dans un but de comparaison.

L'effet des différents aménagements a été quantifié relativement à la configuration de base, en termes de pourcentage de réduction. Les valeurs absolues d'amplitude des vagues ne constituent pas des indicateurs significatifs en raison des différences observées entre les différentes approches

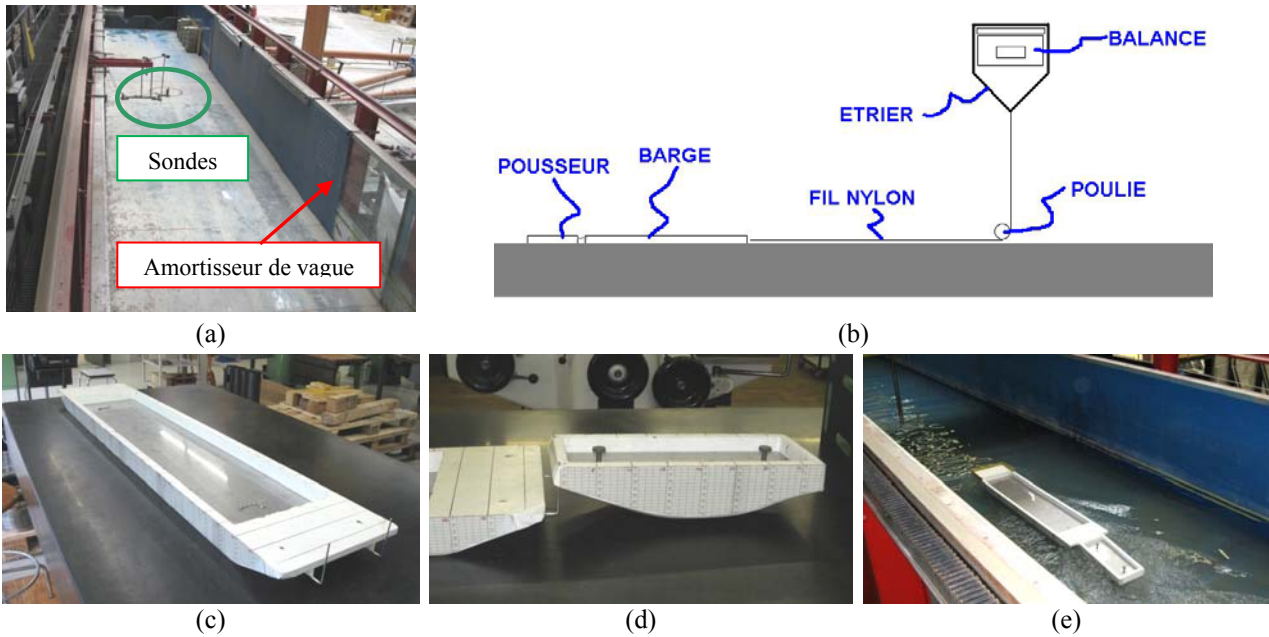


Figure 5: Installations expérimentales en bassin de carène: (a) dispositif de mesure des vagues; (b) schéma du dispositif de mesure de la traînée; (c)(d)(e) maquettes de la barge et du pousseur

III RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1 Calage

Afin d'évaluer l'adéquation entre la simulation et la réalité, les conditions expérimentales de la campagne de mesure in situ de 1972 [4] ont été reproduites dans le modèle numérique et le champ de vagues a été tracé dans six profils parallèles au convoi. Les mesures in situ, effectuées à courte distance de la rive, sont influencées par la réduction de la profondeur d'eau, qui amplifie les vagues avant de causer leur déferlement [6-7]. A l'opposé, les vagues du modèle numérique décroissent fortement en s'éloignant du convoi, comportement imputable à la diffusion numérique. Ainsi, dans le but d'obtenir des valeurs comparables, seules les mesures proches du convoi (à 5.11 m) ont été considérées dans la phase de prospection (Figure 6, a). Lors de l'étude de 1972, les vitesses relatives pour lesquelles les vagues ont été mesurées varient entre 9 et 16 km/h. Dans le cadre de la présente étude, après calage du modèle numérique sur les mesures in-situ, les aménagements ont été testés à des vitesses relatives plus élevées, comprises entre 17 et 23 km/h.

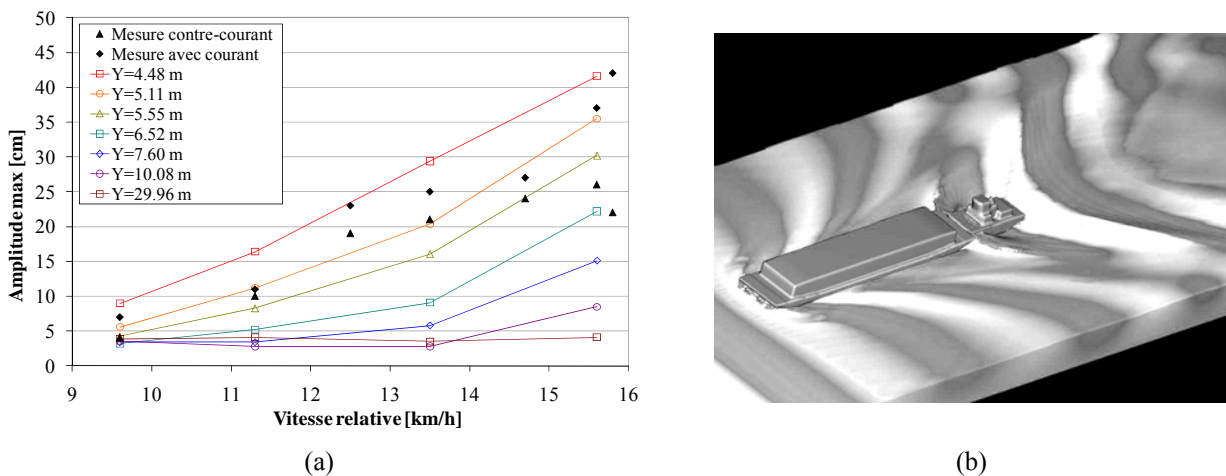


Figure 6: (a) Amplitude maximale des vagues modélisées en fonction de la vitesse relative à différentes distances (Y) de l'axe de la barge et amplitude maximale des vagues mesurée près de la rive lors de la campagne in situ de 1972 (b) Vagues générées par le pousseur et la barge pour $V_{relative} = 24$ km/h

Selon les résultats numériques, trois trains de vagues principaux se détachent du convoi (Figure 6, b) : la vague d'étrave de la barge, la vague de poupe de la barge qui percute le pousseur, et la vague de poupe du pousseur qui est la plus grande vague générée par le convoi.

III.2 Prospecion

Les résultats de la modélisation numérique montrent qu'il est possible d'atténuer les vagues générées par le convoi barge-pousseur. La Figure 7 présente les résultats obtenus pour les configurations bulbes sur la barge, plaque à l'arrière de la barge et plaque à l'arrière du pousseur, en comparaison de la situation de base. Ni l'installation de bulbes sur la barge, ni l'ajout d'une plaque à l'arrière du pousseur ne changent le train de vague. Par contre, l'ajout d'une plaque à l'arrière de la barge semble être un bon moyen pour casser la vague de poupe de la barge et estomper la vague de poupe du pousseur. C'est cette solution qui a été retenue pour la suite de l'étude.

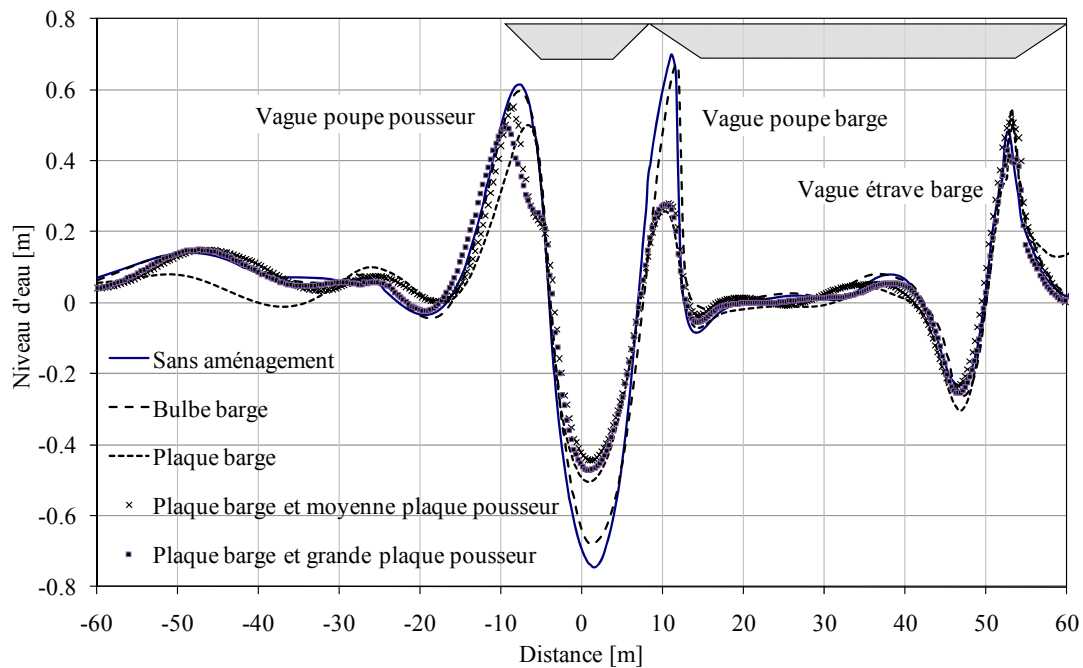


Figure 7: Vagues générées par le convoi pour les différentes configurations testées numériquement ($V_{\text{relative}}=24$ km/h, $Y=5.11$ m)

III.3 Optimisation

Sur la base des résultats obtenus par simulation numérique, l'installation d'une plaque à l'arrière de la barge a été testée sur modèle physique (Figure 8). Les vagues ont été mesurées par des sondes à ultrasons placées à 7, 12 et 24 m du convoi. L'effet de la plaque a été quantifié par le pourcentage de réduction de la vague maximale qu'elle entraînait. L'aménagement a été optimisé du point de vue de l'angle d'inclinaison pour deux types de plaque, 4.5 m et 2.6 m de longueur par 8.6 m de largeur, la plus courte pouvant être remontée sans toucher les attaches existantes.

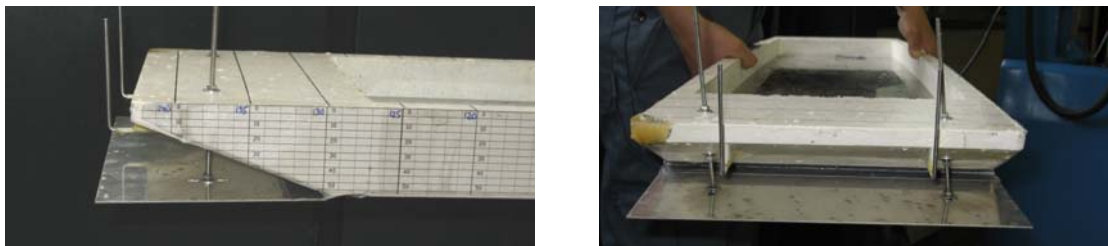


Figure 8: Configuration avec une grande plaque à l'arrière de la barge

En ce qui concerne l'angle d'inclinaison de la plaque, c'est la position parallèle à la ligne de fond qui conduit à l'effet le plus intéressant. Par contre, une plaque inclinée vers le haut ou le bas accroît la vague

maximale au lieu de la diminuer. La longueur de la plaque ne semble pas avoir une influence significative sur l’efficacité de l’aménagement, du moins pour des plaques entre 4.5 et 2.6 m qui montrent des taux de réduction très similaires (Tableau 1). L’effet est maximum pour une vitesse relative de 19 km/h (environ 40% d’atténuation) et quasi nul pour la vitesse la plus élevée. Pour la vitesse la plus faible testée (17.7 km/h) et la vitesse intermédiaire (20.4 km/h), l’atténuation est d’environ 20 à 25%. Ces résultats illustrent bien le comportement non-linéaire du convoi en fonction de sa vitesse.

En effet, les régimes de vagues générés par un bateau dépendent du nombre de Froude naval (F_n), associé à la longueur du bateau à la flottaison (equ. 2):

$$F_n = \frac{v_r}{\sqrt{(g \cdot L_f)}} \quad (2)$$

où v_r est la vitesse relative du bateau [m/s] et L_f la longueur du bateau à la flottaison [m].

Quatre régimes sont distingués en fonction de la valeur de F_n [8]:

- $F_n < 0.28$: les vagues ont une faible longueur d’onde et elles sont multiples sur la ligne de flottaison.
- $0.28 < F_n < 0.4$: lorsque la vitesse augmente, la longueur d’onde augmente aussi, jusqu’à correspondre environ à la longueur du bateau au niveau de flottaison. Celui-ci se retrouve en quelque sorte porté sur une crête à l’avant et une crête à l’arrière, avec un creux au milieu.
- $0.4 < F_n < 0.7$: la vague s’allonge encore, laissant l’arrière du bateau sur une pente. Le bateau se cabre, ce qui augmente encore sa résistance à l’avancement.
- $F_n > 0.7$: à haute vitesse, le bateau est comme entièrement porté par sa vague d’étrave. C’est la situation de planning (qu’il n’est possible d’atteindre qu’avec certains types de carènes).

Une analyse du nombre de Froude naval du convoi pour une vitesse relative de 23 km/h montre que:

- F_n (barge) = 0.35 ($L_f = 37.5$ m), la barge est portée sur une crête à l’avant et une crête à l’arrière,
- F_n (pousseur) = 0.65 ($L_f = 10.6$ m), le pousseur est en mode intermédiaire, très défavorable en terme de résistance à l’avancement. La vague à l’étrave du pousseur (renforcée par la vague à l’arrière de la barge) conjuguée au creux à sa poupe va le conduire à se cabrer.

Tableau 1: Taux de réduction de la vague maximale par rapport à la situation de base pour les aménagements avec petite et grande plaque et pour différentes vitesses relatives, moyenne sur une distance de 7 à 24 du convoi

	Vitesse relative [km/h]			
	17.7	19.2	20.4	23.2
Petite plaque	25%	37%	23%	0%
Grande plaque	23%	41%	22%	4%

III.4 Validation

Afin de comparer les approches numérique et physique, les deux solutions optimisées par les essais en bassin de carène ont été modélisées et simulées numériquement avec les mêmes conditions de bord que lors de l’étape de prospection. Les amplitudes des vagues simulées et celles mesurées en bassin sont similaires lorsque considérées à une distance de 7 m du convoi (Figure 10), c’est donc cette distance qui a été choisie pour la comparaison. En ce qui concerne le taux de réduction des vagues (Figure 9), l’approche numérique montre que l’ajout d’une plaque permet d’atténuer la vague davantage aux vitesses élevées qu’aux vitesses faibles. Si la plaque est raccourcie, l’atténuation est réduite mais suit la même tendance. Les essais en bassin de carène font apparaître une relation inverse entre l’effet de la plaque et la vitesse.

Les différences de comportement entre les deux approches aux extrêmes de vitesse sont les suivantes :

- à la vitesse la plus élevée, le pousseur se cabre lors des essais physiques mais pas dans la simulation numérique puisqu’il est modélisé comme un corps fixe. Par conséquent, l’effet de la plaque est moins important lors des essais physiques que lors des simulations numériques.
- aux faibles vitesses, le taux d’atténuation de la vague par la plaque est plus important dans les essais physiques qu’en simulation numérique. Cette différence peut être attribuée à la liberté de mouvement

du pousseur. Elle peut également être liée à la diffusion numérique des vagues aux vitesses faibles, telles qu'observée lors du calage du modèle numérique.

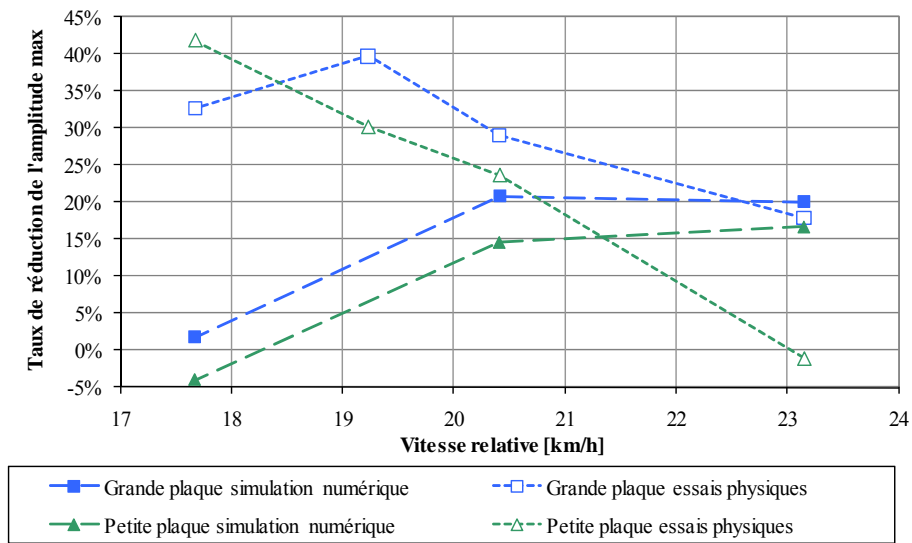


Figure 9: Taux de réduction des vagues avec grande et petite plaques pour toute la gamme de vitesses relatives; résultats numériques et physiques à $Y = 7$ m du convoi

La Figure 10 présente les profils de vagues à 7 m du convoi, tels qu'observés en bassin de carène et résultant des simulations numériques, pour la situation de base et avec l'ajout d'une grande plaque. Globalement, une bonne correspondance est mise en évidence entre les essais physiques et la simulation numérique. Les deux approches mettent en évidence trois trains de vagues principaux : la vague d'étrave de la barge, la vague de poupe de la barge et la vague de poupe du pousseur.

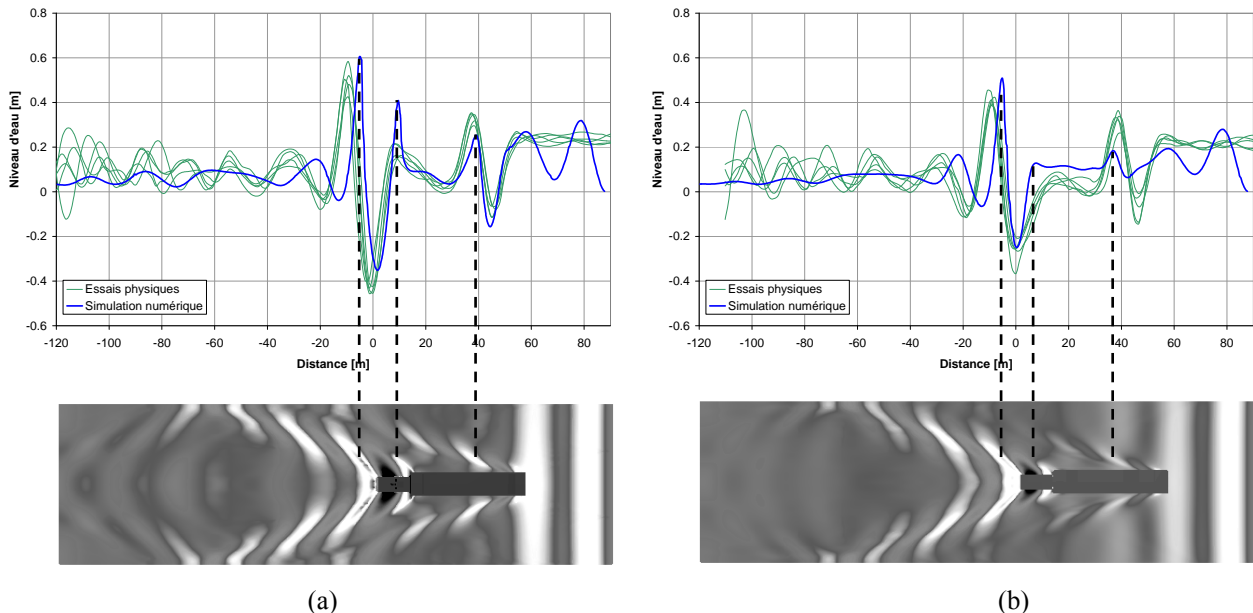


Figure 10: Comparaison des profils de vague obtenus par simulation numérique et par modélisation physique
 (a) Sans aménagement, vitesse relative 20.4 km/h, coupe longitudinale à $Y = 7$ m du convoi
 (b) Avec grande plaque, vitesse relative 20.4 km/h, coupe longitudinale à $Y = 7$ m du convoi

Les premières vagues avant le convoi sont dues à un effet numérique de stabilisation du plan d'eau. Elles n'apparaissent donc pas sur les essais physiques. La vague à l'étrave de la barge a une amplitude similaire en numérique et en physique pour la configuration sans aménagement mais est plus importante en bassin de carène avec l'ajout de la plaque. La vague à la poupe de la barge est plus accentuée dans les simulations numériques que dans les essais physiques. Elle est atténuée dans les deux cas par l'ajout de la plaque. La vague de poupe du pousseur est très semblable et est influencée par l'ajout de la plaque pour les deux approches.

IV CONCLUSIONS

A Genève, une partie des déchets ménagers est acheminée par transport fluvial via le Rhône entre la Jonction et l'usine d'incinération des Cheneviers. La problématique liée à ce mode de transport est l'amplitude des vagues générées, car les berges du Rhône abritent des milieux sensibles tels que des roselières. La présente étude avait pour but d'étudier le comportement du convoi dans la situation actuelle puis de proposer, tester et optimiser une solution susceptible de réduire l'amplitude des vagues générées. Cette démarche est effectuée à la fois par modélisation numérique et par essais sur modèle physique.

Les deux premières phases de l'analyse ont été réalisées par simulation numérique. Elles ont permis de prospecter l'effet de différents types d'aménagements et d'isoler les solutions les plus prometteuses, une fois le modèle calé sur des observations in-situ.

Les essais en bassin de carène ont permis d'optimiser l'installation d'une plaque à l'arrière de la barge, du point de vue de son inclinaison et de sa longueur, et de documenter son effet sur toute la gamme des vitesses. La plaque permet de réduire l'amplitude de la vague maximale d'environ 40% à 19 km/h et de 20 à 25% à 17.7 et 20.4 km/h. Son angle d'inclinaison optimal est de 0 degré par rapport au fond de la barge.

La solution retenue a finalement été simulée numériquement afin de comparer et valider les résultats des deux approches. La modélisation numérique montre un comportement différent du convoi dû à sa modélisation comme un objet rigide mais confirme tendanciellement les résultats obtenus en bassin de carène.

Les deux approches ont ainsi démontré leur complémentarité, surtout en phase de prospection. La comparaison des mesures in-situ, des résultats numériques et des valeurs expérimentales met cependant en évidence des différences de comportement significatives dont les causes sont à rechercher dans les conditions de bords respectives mais aussi dans les simplifications propres aux différentes méthodes. Il convient de mentionner en particulier le déferlement des vagues à l'approche de la rive, la diffusion numérique dans le processus de propagation des vagues et les mouvements relatifs de la barge et du pousseur. Ces effets parasites obligent à recourir à une interprétation relative et non absolue des résultats.

V REFERENCES

- [1] Soomere, T. (2005). Fast ferry traffic as a qualitatively new forcing factor of environmental processes in non-tidal sea areas: A case study in Tallinn Bay, Baltic Sea. *Environmental Fluid Mechanics*. **5**(4): p. 293-323.
- [2] Gabel, F., Garcia, X. F., Brauns, M., Sukhodolov, A., Leszinski, M., & Pusch, M. T. (2008). Resistance to ship-induced waves of benthic invertebrates in various littoral habitats. *Freshwater Biology*. **53**(8): p. 1567-1578.
- [3] André, S. & Boillat, J.-L. (2003). Désensablement d'un chenal de navigation en cul-de-sac par injection de débit d'eau. *La Houille Blanche*. **4**: p. 88-94.
- [4] Bruschin, J. & Schneiter, L. (1972). Erosion des berges du Rhône: La Jonction - Verbois. Laboratoire d'Hydraulique, EPFL, Lausanne.
- [5] Muk-Pavic, E., Chin, S. N., & Spencer, D. (2006). Validation of the CFD code Flow-3D for the free surface flow around the ships' hulls in *14th Annual Conference of the CFD Society of Canada*.
- [6] Sorensen, R. M. (1973). Ship-generated waves. *Advances in Hydroscience*. **9**: p. 49-83.
- [7] Kelvin, Lord (1887). On ship waves. *Trans. Inst. Mech. Eng.* **8**: p. 409-433.
- [8] Paulet, D. & Presles, D. (2005). Architecture navale, connaissance et pratique. Éditions de la Villette, Paris.