

UNE REVISITE DES THÉORIES DE LA NAVIGATION EN MILIEU CONFINÉ

A REVISIT OF CONFINED MEDIUM NAVIGATION THEORIES

V. JULES⁽¹⁾, P-J. POMPEE⁽²⁾, J. DAMBRINE⁽³⁾
M. PIERRE⁽³⁾, G. ROUSSEAU⁽¹⁾

germain.rousseau@cnrs.fr

⁽¹⁾Institut Pprime, CNRS-Université de Poitiers-ISAIE ENSMA, Poitiers, France

⁽²⁾Voies Navigable de France, Direction de l'innovation, Paris, France

⁽³⁾Laboratoire de Mathématiques Appliqués, CNRS-Université de Poitiers, Poitiers, France

Résumé

Dans cet article, nous passons en revue certaines théories de la navigation en milieu confiné et mettons en lumière les spécificités de ce contexte par rapport au milieu maritime, que sont le courant de retour et la variation du niveau du plan d'eau. Nous détaillons les différentes approches développées précédemment pour déterminer la vitesse critique, un seuil où la résistance à l'avancement et les phénomènes associés atteignent des valeurs extrêmes. Puis, nous proposons une piste d'amélioration avec une géométrie trapézoïdale plus proche de la réalité des canaux souvent modélisés avec un rectangle équivalent.

Summary

In this article, we review some theories of navigation in confined environments and highlight the specificities of this context compared to the maritime environment, which are the return current and the variation of the water level. We detail the different approaches developed previously to determine the critical speed, a threshold where the resistance to progress and the associated phenomena reach extreme values. Then, we propose an improvement track with a trapezoidal geometry closer to the reality of the channels often modeled with an equivalent rectangle.

I – Introduction

Contrairement au cas typique du milieu maritime, la navigation intérieure se fait en milieu confiné en profondeur, en largeur et/ou en section. Cette particularité, modifie la manière dont les bateaux naviguent : apparition d’un courant de retour et d’une vitesse critique, sur-enfoncement et angle d’assiette accrus et abaissement du plan d’eau, augmentation de la résistance à l’avancement, baisse du rendement de propulsion, manœuvrabilité réduite et accroissement du rayon de giration. Les effets sont nombreux, et dépendent de nombreux paramètres : géométrie de la voie d’eau, forme et vitesse du bateau, vitesse et sens du courant, présence de sédiments et d’obstacles.

Ces phénomènes sont également d’intérêt pour la navigation maritime, car on les retrouve dans des cas particuliers, tels que les estuaires, les ports et autres zones de navigation à proximité du littoral, où les conditions deviennent localement confinées.

Il est donc indispensable de comprendre l’influence de ces différents paramètres afin de minimiser l’impact de la navigation fluviale sur l’environnement et d’optimiser la sécurité et l’efficacité des opérations de navigation.

II – Présentation du problème

Le problème de la résistance à l’avancement des bateaux en milieu confiné (figure 1), soulève plusieurs défis spécifiques dus aux interactions hydro-dynamiques avec la voie d’eau. En milieu confiné, c’est-à-dire dans une voie d’eau (fleuve ou canal) de section A_c , de largeur au miroir W et de profondeur h , la résistance à l’avancement est fonction de la vitesse du bateau V mais est aussi influencée par la vitesse du courant de retour u qui se forme entre la coque et les parois du canal. Ce courant de retour est généré par la restriction géométrique de l’écoulement autour du navire, entraînant un abaissement du plan d’eau z .

Le bateau, de maître-bau B , de tirant d’eau T et de section immergée A_b , déplace un volume d’eau qui modifie la circulation dans le canal. Lorsque le confinement augmente, l’interaction entre le bateau et la voie d’eau engendre des phénomènes comme l’abaissement du plan d’eau et le courant de retour, modifiant la résistance à l’avancement, le plus souvent en l’augmentant. Ainsi, les grandeurs V , h , W , B et T , A_c ou A_b influencent cette résistance, qui inclut la résistance visqueuse et la résistance de vague, toutes deux modifiées par le confinement par rapport au milieu maritime infini.

La recherche sur la résistance à l’avancement des navires en milieu confiné a commencé à la fin du XVIIIe siècle, avec les travaux de d’Alembert, Condorcet et Bossut [4], qui se sont penchés sur les problèmes d’hydrodynamiques liés aux déplacements des corps dans l’eau en milieu confiné en introduisant le paramètre de confinement en section appelé aujourd’hui taux de blocage $m = A_b/A_c$. Au fil des siècles, ce domaine a été enrichi par plusieurs contributions, chacune apportant des avancées dans la compréhension des phénomènes, ou dans leurs prise en compte dans les théories. Parmi, les nombreux travaux théoriques existant, plusieurs utilisent la conservation de l’énergie pour décrire les effets hydrauliques. C’est sur cette méthode que nous allons nous pencher dans cet article. L’analyse de la littérature montre que Kreitner [8], Schijf [10], et Constantine [5] ont formulé le même problème sous différents aspects. Ces formulations étant similaires, nous nommerons désormais KSC cette approche théorique. Pour cela, ces auteurs considèrent un écoulement unidimensionnel horizontal, ils supposent que le canal et le bateau ont chacun une section rectangulaire constante, que l’écoulement est parfait, qu’il n’y a aucune pertes de charge, ni sur les parois du canal, ni sur celles du bateau ni en volume, et que

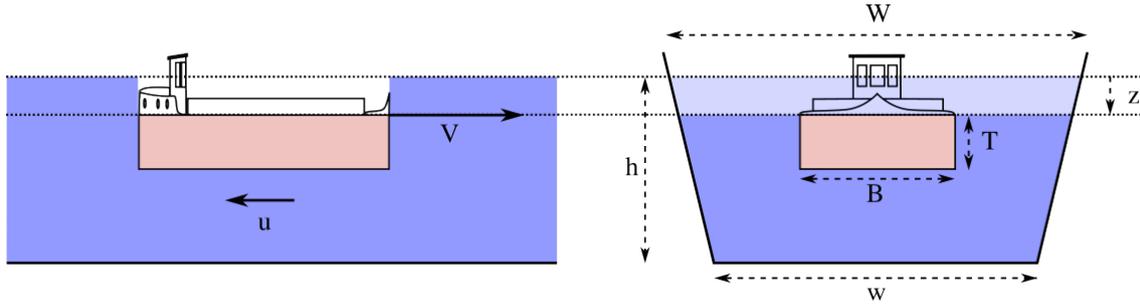


FIGURE 1 – À gauche, schéma en vue longitudinale d'un bateau qui avance à la vitesse V dans un canal, créant ainsi un abaissement du niveau du plan d'eau z , et un courant de retour u . À droite, schéma en vue transversale pour un bateau de maître-bau B , de tirant d'eau T dans un canal à section trapézoïdale de hauteur h , de largeur au miroir W et de largeur au fond w . La pente du canal est définie par $p = (W - w)/2h$.

l'abaissement du plan d'eau est uniforme sur toute la largeur du plan d'eau.

L'écoulement d'eau étant incompressible aux vitesses considérées, la conservation de la masse (donc du volume) en 1D s'écrit :

$$A_c V = A_w (V + u), \quad (1)$$

où A_c est la section quelconque du canal, A_w celle de l'eau au passage du bateau, $V > 0$ la vitesse du bateau et $u > 0$ celle du courant de retour. Il n'y a donc pas de vitesse transversale ni pour le bateau (pas de virage) ni pour le courant de retour.

Soit, dans le cas d'un canal à section rectangulaire $A_c = Wh$:

$$A_c V = (A_c - A_b - Wz)(V + u), \quad (2)$$

où A_b est la section immergée du bateau, W la largeur du canal et $z > 0$ et l'abaissement du niveau du plan d'eau.

De plus, on peut appliquer le théorème de Bernoulli le long d'une ligne de courant (chemin tangent au champ des vitesses = direction longitudinale en 1D ici) entre l'aval (amont, idem) du navire et au droit de la carène, et écrire :

$$\rho g h_{\text{aval}} + \frac{\rho}{2} V^2 = \rho g (h_{\text{bateau}} - z) + \frac{\rho}{2} (V + u)^2, \quad (3)$$

où g est l'accélération de la pesanteur, V la vitesse du bateau, h_{aval} la hauteur d'eau loin devant le bateau, h_{bateau} la hauteur d'eau au droit du bateau à l'arrêt, z l'abaissement du plan d'eau, et $u > 0$ le courant de retour. En considérant qu'il n'y a pas de pertes de charges visqueuses (frictions pariétales sur les parois du canal/bateau paramétrisées par les rugosités idoine et la friction en volume due à la turbulence), on peut noter $h = h_{\text{aval}} = h_{\text{bateau}}$ la hauteur d'eau et on simplifie ainsi le théorème de Bernoulli :

$$\rho g h + \frac{\rho}{2} V^2 = \rho g (h - z) + \frac{\rho}{2} (V + u)^2, \quad (4)$$

En introduisant le nombre de Froude de hauteur $Fn_h = V/\sqrt{gh}$ et m le taux de blocage $m = A_b/A_c$ calculé avec une section rectangulaire $A_c = Wh$, on peut combiner le théorème de Bernoulli (4) avec l'équation de continuité (1), afin d'obtenir :

- la cubique de Kreitner [8] qui permet de calculer le courant de retour u si m et Fn_h sont connus :

$$\left(\frac{V+u}{V}\right)^3 \left(\frac{Fn_h^2}{2}\right) - \left(\frac{V+u}{V}\right) \left(1 - m + \frac{Fn_h^2}{2}\right) + 1 = 0, \quad (5)$$

Cette cubique admet des solutions réelles tant que le nombre de Froude se situe en dehors d'une zone délimitée par deux valeurs critiques de Froude. Lorsque le nombre de Froude est inférieur au premier Froude critique (Fn_c), l'écoulement est dit sous-critique. Entre les deux valeurs critiques, l'écoulement devient transcritique. Enfin, au-delà du deuxième Froude critique, l'écoulement devient supercritique

- l'équation implicite de Constantine [5] qui permet de calculer l'abaissement du plan d'eau z :

$$Fn_h = \left(\frac{2\frac{z}{h}(1 - \frac{z}{h} - m)^2}{1 - (1 - \frac{z}{h} - m)^2}\right)^{1/2}. \quad (6)$$

- La cubique de Schijf [10] qui permet de délimiter les frontières des domaines d'écoulement (sous-critique, trans-critique, super-critique) :

$$1 - m + \frac{1}{2}Fn_c^2 - \frac{3}{2}Fn_c^{2/3} = 0. \quad (7)$$

Ces trois formulations sont similaires et permettent d'obtenir le courant de retour u , l'abaissement du plan d'eau z et le nombre de Froude critique Fn_c (Figure 2).

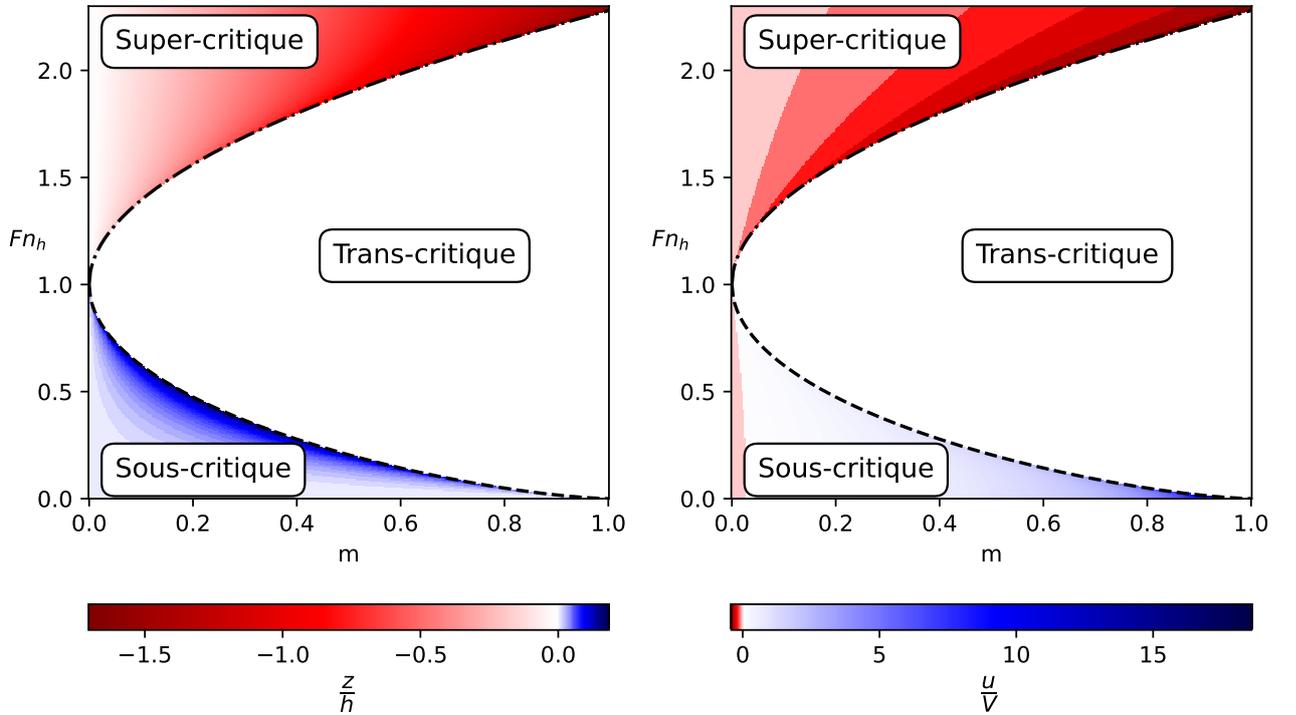


FIGURE 2 – Abaissement ou surélévation du plan d'eau (à gauche), et courant de retour (à droite) dans l'espace défini par le nombre de Froude de hauteur en fonction du paramètre de blocage d'après [6].

III – Approximations des faibles confinement et/ou vitesse

Si les effets de confinement sont de faible amplitude et/ou à faible vitesse, nous pouvons considérer une hiérarchie d'approximations théoriques analytiques qui évitent de résoudre numériquement les équations 5 et 6 pour le courant de retour et la variation du niveau du plan d'eau supposés uniformes.

En supposant que le courant de retour est négligeable par rapport à la vitesse du bateau, $u^* = \frac{u}{V} \ll 1$, et que l'abaissement du niveau du plan d'eau est faible par rapport à la hauteur d'eau, $z^* = \frac{z}{h} \ll 1$, tout en posant $m \ll 1$ et/ou $Fn_h^2 \ll 1$ ou en comparant les valeurs relatives de m et Fn_h^2 , nous obtenons alors plusieurs expressions pour le courant de retour, certaines connues dans la littérature comme celles de Kim [7] et Tuck [12] (figure 3), d'autres inédites. Nous introduisons pour la première fois les approximations dites de Bossut linéaire ou non-linéaire en référence à ses travaux pionniers sur la navigation en milieu confiné qui avait montré que la résistance augmente avec le confinement [3].

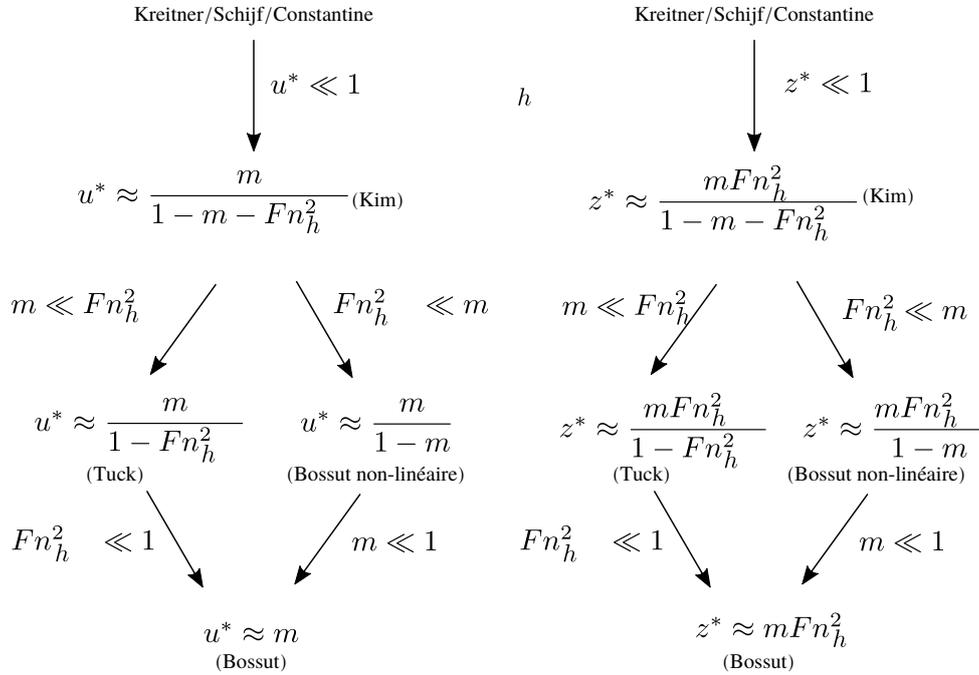


FIGURE 3 – Résumé des approximations de la théorie KSC (5). Le courant de retour normalisé est noté $u^* = \frac{u}{V}$, et l'abaissement du plan d'eau $z^* = \frac{z}{h}$. La colonne de droite est égale à celle de gauche multipliée par Fn_h^2 quelque soit l'ordre d'approximation.

Dans la Figure 4, on constate que le courant de retour est au minimum égal à l'asymptote du modèle de Bossut non-linéaire (ou linéaire) et ne peut donc qu'augmenter à partir de cette valeur $m/(1-m)$ (ou m) pour les forts (ou faibles) confinement selon la valeur du paramètre de blocage m . Le courant de retour relatif à la vitesse du bateau est donc d'un point de vue opérationnel égal à cette valeur seuil à basse vitesse. Pour les plus grandes valeurs de vitesse du bateau, l'approximation de Kim arrive à capturer l'augmentation du courant de retour relatif puis seule la résolution numérique à un nouveau seuil dépendant du taux de blocage permet une prédiction pour les plus hautes vitesses avant une divergence pour un nombre de Froude de hauteur moyenne.

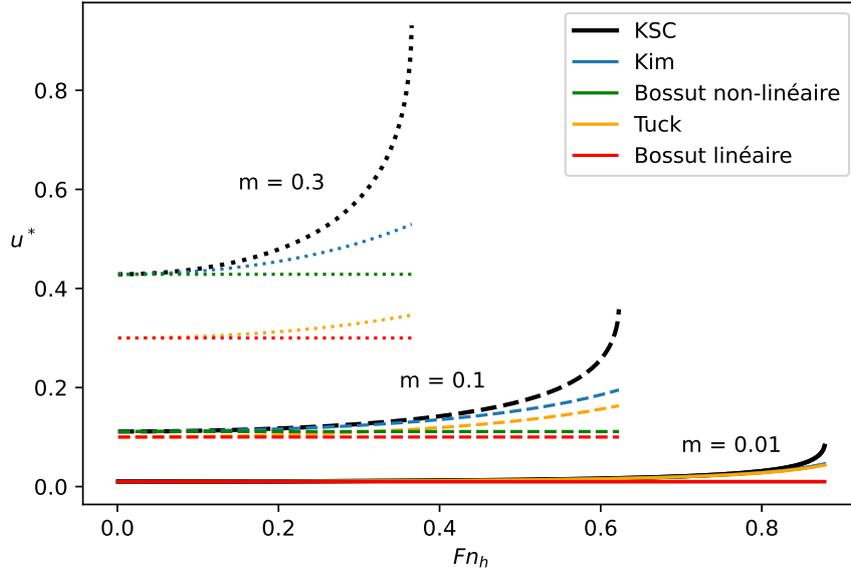


FIGURE 4 – Prédictions théoriques du courant de retour u , adimensionné par la vitesse du bateau V , en fonction du nombre de Froude de hauteur $Fn_h = V/\sqrt{gh}$ pour différentes valeurs du paramètre de blocage $m = A_b/A_c$ (W est la largeur au miroir du canal et A_c sa section ; A_b est la section du bateau ; le canal a une section rectangulaire). Une hiérarchie d’approximations successives par rapport à la résolution exacte des équations de KSC apparaît de moins en moins valable lorsque le confinement augmente.

IV – Amélioration Géométrique

IV – 1 Généralisation de la théorie KSC à une section trapézoïdale

Les canaux ont souvent une section qui n’est pas rectangulaire : le canal Seine-Nord, par exemple, est prévu pour avoir une largeur au miroir $W = 54\text{m}$, une largeur au fond $w = 36\text{m}$, et une hauteur d’eau $h = 4.5\text{m}$.

La première manière de prendre en compte cette géométrie est d’introduire la hauteur d’eau moyenne $H_m = A_c/W$ [1, 9]. Cette méthode nommée méthode du rectangle équivalent ne correspond pas à la véritable géométrie des berges avec une section trapézoïdale dans le cas du canal Seine-Nord au niveau de l’abaissement du plan d’eau.

La manière correcte de le faire est de modifier légèrement les formulations précédentes. Pour cela, dans l’équation de continuité, l’aire de l’eau doit être généralisée en prenant en compte la forme trapézoïdale du canal :

$$Q = VA_c = A_w(V + u) = [A_c - A_b - z(W - pz)](V + u), \quad (8)$$

où p est la pente du canal, dite des terrassiers, vue du haut du canal définie par $p = (W - w)/2h$.

Cette modification nous amène à généraliser la formulation de Constantine [5] :

$$Fn_{H_m} = \left(\frac{2 \frac{z}{H_m} (1 - \frac{z}{H_m} - m_t + p \frac{z^2}{A_c})^2}{1 - (1 - \frac{z}{H_m} - m_t + p \frac{z^2}{A_c})^2} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

où m_t est le taux de blocage calculé avec une section désormais trapézoïdale du canal.

La figure 5 montre des modifications des valeurs de la vitesse critique, de l’abaissement du plan d’eau et du courant de retour entre la section rectangulaire équivalente et la section

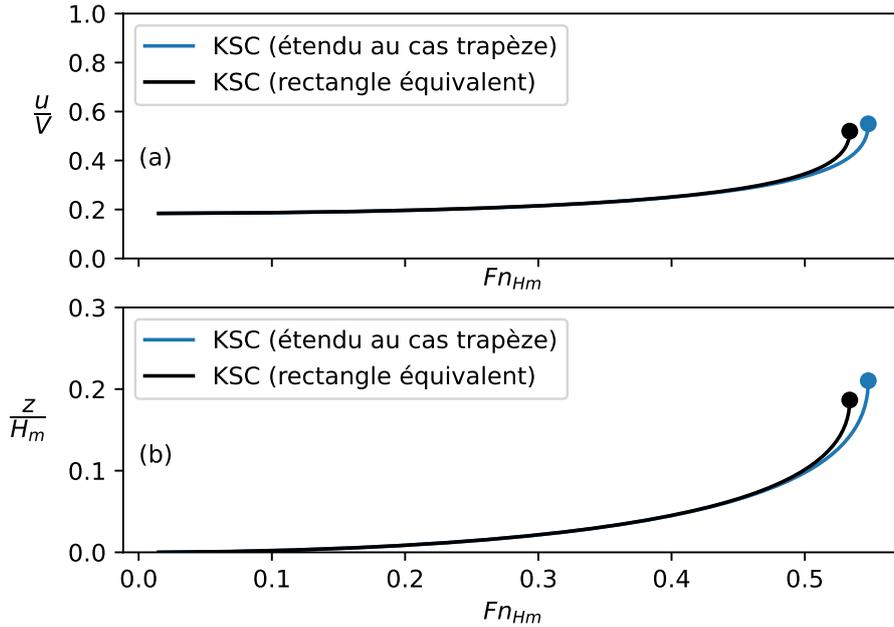


FIGURE 5 – Prédictions théoriques pour (a) l’abaissement du plan d’eau normalisé d’après (9), (b) le courant de retour normalisé, en fonction du nombre de Froude de hauteur moyenne Fn_{H_m} selon la théorie de KSC étendue à une section trapézoïdale. Le canal a une largeur au miroir de $W = 100\text{m}$, une largeur au fond de $w = 10\text{m}$, hauteur d’eau statique $h = 4\text{m}$, soit une pente $p = 11.25$. Le bateau est de classe Vb de type grand rhénan de maître-bau $B = 11.4\text{m}$, et un tirant d’eau $T = 3\text{m}$.

trapézoïdale du canal. Avec les dimensions choisies ici afin de maximiser les effets de la pente ($W = 100\text{m}$, $w = 10\text{m}$, $h = 4\text{m}$), en section trapézoïdale, la vitesse critique est supérieure de seulement 3 % par rapport à celle de la section rectangulaire équivalente. Mais l’abaissement du plan d’eau maximal est augmenté de 13 % et le courant de retour maximal de 6 %.

La prise en compte d’une section trapézoïdale pour le canal constitue une amélioration géométrique significative, permettant de mieux représenter les contours réels de certaines voies navigables. Toutefois, cette amélioration reste limitée par l’hypothèse d’un écoulement unidimensionnel, qui apparaît comme une simplification restrictive. En effet, cette approximation ne capture pas les variations transversales et verticales de l’écoulement et est d’autant plus fautive que la pente des terrassiers est grande car l’hypothèse d’uniformité du courant de retour et de variation du plan d’eau est discutable dans cette limite. On retrouve évidemment la géométrie rectangulaire bien connue si $pz^2 \ll A_c$.

IV – 2 Comparaison aux résultats expérimentaux

La théorie KSC semble sous-estimer la vitesse critique expérimentale observée lors de mesures de laboratoire (figure 6 au bémol près que nous l’appliquons à un convoi à deux barges et non à un unique bateau). Nous disposons en effet des points expérimentaux avec une dépendance avec le tirant d’eau qui nous permet de tester notre théorie pour plusieurs valeurs de m_t .

Depuis les travaux présentés par Schijf au congrès de l’AIPCN à Lisbonne en 1949, un paramètre α est utilisé devant le terme $(V + u)$ dans l’équation de Bernoulli [2](équation 3). Ce paramètre α permet de moduler la vitesse critique : il la diminue lorsque $\alpha > 1$

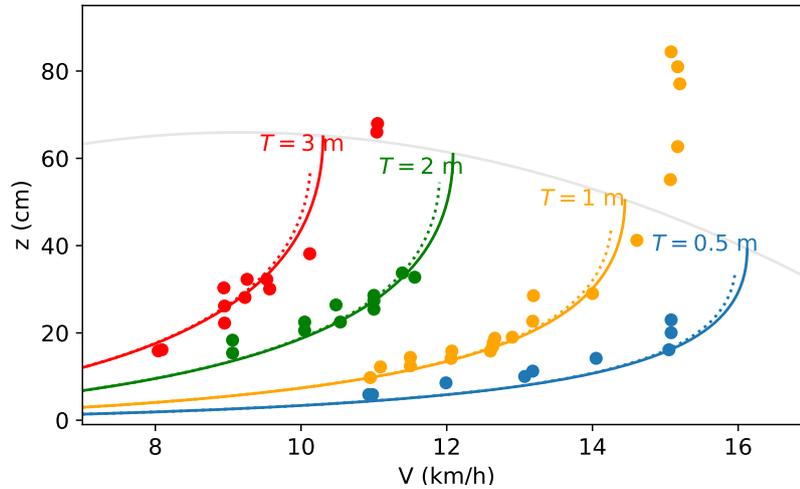


FIGURE 6 – Abaissement du plan d’eau en fonction de la vitesse d’avancement du bateau. Les différentes couleurs correspondent à différents tirants d’eau. Les points expérimentaux sont les résultats de la SOGREAH [11], la courbe en pointillés est la prédiction théorique selon KSC rectangulaire, la courbe en traits pleins est le modèle KSC trapézoïdal introduit dans ce travail. Le ligne grise correspond à l’enveloppe théorique obtenue numériquement qui limite le domaine sous-critique. Le canal a une largeur au miroir $W = 60\text{m}$, une largeur au fond $w = 36\text{m}$, une hauteur d’eau statique $h = 4\text{m}$, soit une pente $p = 3$. Le bateau est un bateau de classe Vb de longueur $L = 125\text{m}$ (équivalent en longueur à deux barges de 62.5m) et de largeur $B = 11.4\text{m}$.

et l’augmente lorsque $\alpha < 1$. Dans les canaux larges, ce paramètre est habituellement utilisé pour ajuster les variations de vitesse dans la section transversale, permettant une meilleure représentation de l’écoulement réel.

V – Conclusions et perspectives

Notre revisite des théories KSC permet d’affiner les prédictions théoriques des phénomènes liés à la navigation en milieu confiné, en particulier en ce qui concerne la vitesse critique. Cependant, ces améliorations restent incomplètes, car elles ne prennent pas encore en compte l’ensemble des effets de résistance à l’avancement du bateau (i.e. champs de vagues, frottement dans les couches limites, dissipation turbulente en volume...), qui jouent un rôle crucial en réalité dans la navigation en milieu confiné. Intégrer ces phénomènes de résistance supplémentaires sera une étape nécessaire pour obtenir des prédictions encore plus précises et mieux correspondre aux observations expérimentales.

Les hypothèses de KSC découlent d’un développement asymptotique basé sur les équations d’Euler et donc reposent sur l’hypothèse que la section du bateau varie lentement dans la direction longitudinale. Ceci exclut en principe toutes les géométries de type « bloc », qui sont pourtant celles couramment utilisées comme base dans les théories KSC, et qui correspondent aux bateaux fluviaux de fret. Dans un futur travail, nous chercherons à appliquer cette hypothèse de manière aussi stricte que possible, c’est-à-dire en supposant l’existence d’un profil continu de variation longitudinale de la section du bateau entre la proue et la poupe (où la section est nulle).

La combinaison des effets hydrauliques décrits dans ce travail (confinement en section

paramétrisé par m que l'on pourrait renommer le nombre de Bossut) avec le calcul de la résistance de vague (confinement en hauteur T/h et/ou largeur B/W uniquement dans les théories usuelles) reste un défi majeur pour la navigation fluviale.

Ce travail s'inscrit dans le cadre des programmes gouvernementaux français « Investissement d'Avenir » EUR INTREE (référence ANR-18-EURE-0010) et LABEX INTER-ACTIFS (référence ANR-11-LABX-0017-01).

Références

- [1] V. Balanin, D. Zernov, S. Kirjakov, G. Metelitsina, A. Polunin, and V. Schegolev. Peculiarities of navigation on canals and restricted channels, originating hydraulic phenomena associated with them and their effect on the canal bed. In *24th International Navigation Congress. Leningrad*, 1977.
- [2] H. Blaauw and F. Knaap. Prediction of squat of ships sailing in restricted water. In *International Harbour Congress, 8th*, 1983.
- [3] C. Bossut. *Traité élémentaire d'hydrodynamique*, volume 2. 1775.
- [4] C. Bossut, J. L. d'Alembert, and J.-A.-N. de Caritat marquis de Condorcet. *Nouvelles expériences sur la résistance des fluides*. chez Claude-Antoine Jombert, fils aîné, libraire du Roi pour le génie & l . . . , 1777.
- [5] T. Constantine. On the movement of ships in restricted waterways. *Journal of Fluid Mechanics*, 9(2) :247–256, 1960.
- [6] J. Fourdrinoy. *La Bataille d'Actium : zoologie des interactions ondes-courants-bateaux— Theses. fr*. PhD thesis, Poitiers, 2022.
- [7] H. Kim, J. Moss, and R. Couch. Research in resistance and propulsion part 3 : Blockage correction in a ship model towing tank and scale effect on propulsive parameters. Technical report, 1963.
- [8] J. Kreitner. Über den schiffswiderstand auf beschränktem wasser. *Werft, Reederei, Hafen*, 15(7) :77–82, 1934.
- [9] P.-J. Pompée. About modelling inland vessels resistance and propulsion and interaction vessel-waterway key parameters driving restricted/shallow water effects. *Proceedings of Smart Rivers 2015, Buenos Aires, Argentina, paper 180, September 2015*, 2015.
- [10] J. B. Schijf. Protection of embankments and bed in inland and maritime waters, and in overflows or weirs. In *Proceedings of the 17th International Navigation Congress, Lisbon*, SI - C2. Permanent International Association of Navigation Congresses, PIANC, 1949.
- [11] R. Tenaud. Essais sur modèles réduits et modèles mathématiques pour l'étude du passage des convois poussés dans un canal et des défenses des berges. *24th AIPCN*, 1977.
- [12] E. O. Tuck. Sinkage and trim in shallow water of finite width, *schiffstechnik* bd. 14. *Heft*, 73 :92–94, 1967.