

---

# Effets érosifs des jets d'hélice de bateau sur les fonds et les talus des voies navigables

## *The erosive effects induced by boat propellers on the bottom and embankments of waterways*

J.-P. Bouchard

Electricité de France  
Laboratoire national d'hydraulique, Chatou

---

### 1. Introduction : les érosions des jets d'hélice face aux autres effets de la navigation

La protection des fonds et des berges des voies navigables est à l'origine de dépenses très importantes qui sont allées croissantes, avec l'augmentation du trafic et la puissance des bateaux. Ceci a justifié l'attention portée aux effets érosifs de la navigation en général, et plus récemment aux effets des jets des systèmes de propulsion des navires eux-mêmes.

Lors de la progression d'un bateau sur un plan d'eau, on peut distinguer trois formes d'actions érosives agissant simultanément :

- tout d'abord, le courant de retour, qui résulte de l'écoulement, vers l'arrière du bateau, du volume d'eau chassé à l'avant par sa progression et qui est susceptible d'éroder les fonds et les talus des canaux et rivières ;
- cet écoulement provoque un abaissement du plan d'eau dans la section rétrécie par la présence du navire en marche, qui se répercute sur la berge par une succession d'ondes de batillage, à l'origine d'un second effet érosif localisé sur les berges, principalement au voisinage de la surface libre ;
- le troisième mode d'érosion a pour origine le jet du système propulsif du bateau qui peut agir sur le fond et les talus de la voie d'eau et constitue le thème de la présente analyse.

#### *Le courant de retour*

Historiquement, l'intérêt s'est tout d'abord porté sur l'étude du courant de retour non pas sous l'angle des érosions qu'il pouvait engendrer, mais plutôt vu en fonction de son influence sur les performances des navires.

L'analyse fondamentale dans ce domaine est celle de Schijf [1], [2], qui a établi, moyennant certaines approximations, les équations donnant la vitesse du courant de retour et l'abaissement du plan d'eau en fonction de

la vitesse du bateau et des caractéristiques géométriques du canal. Il a ainsi mis en évidence l'existence d'une vitesse limite du bateau au-delà de laquelle la résistance à la progression du navire augmente fortement corrélativement à l'abaissement du plan d'eau. Le modèle de Schijf a été par la suite complété par la prise en compte d'hypothèses moins restrictives (modèle de calcul de la CNR).

Le courant de retour conditionne le dimensionnement des protections de fond des voies navigables sur les sections courantes.

#### *Le batillage*

Les ondes de batillage sont associées au courant de retour par l'intermédiaire de l'abaissement du plan d'eau qu'il produit et qui se traduit sur les berges par une succession de vagues souvent déferlantes.

Le batillage est ainsi responsable de l'essentiel des dégradations des berges, principalement au niveau de la surface libre, mais aussi plus en profondeur en raison des sous-pressions produites dans les matériaux des talus. Son effet peut donc en profondeur se superposer à celui des jets d'hélice. Compte tenu de l'importance des dégâts produits par ce type d'érosion, cet effet a retenu depuis longtemps l'attention des exploitants ; parmi les études récentes de ces phénomènes citons l'étude SOGREAH dont un exposé synthétique est fourni dans [3].

#### *L'effet des hélices*

L'effet érosif des jets d'hélice n'a été pris en compte que beaucoup plus récemment. C'est ainsi que ce n'est que lors du dernier Congrès de l'AIPCN à Edimbourg en 1982 que ce sujet a été inscrit à l'ordre du jour d'une séance. Les compte-rendus de ce congrès constituent de ce fait, une base de la bibliographie sur ce sujet.

Courant de retour et batillage demeurent les phénomènes dimensionnants les tronçons courants des voies navigables, néanmoins l'augmentation de puissance des navires et le développement de nouveaux modes de propulsion, permettant une plus grande manoeuvrabilité, comme les tuyères orientales, ont entraîné l'apparition d'érosions localisées, mais parfois très intenses. Ainsi, en Belgique, la rupture d'un pont autoroutier a été imputée au déchaussement d'une pile sous l'action des jets d'hélice des bateaux manoeuvrant à son voisinage.

Cet effet doit donc être pris en compte pour le dimensionnement des protections dans les zones particulières des voies navigables où les bateaux manoeuvrent ou s'approchent de la berge.

## 2. Présentation du problème

Les jets d'hélice ont leur intensité maximale lorsque le bateau est à l'arrêt et utilise toute sa puissance pour démarrer ou manoeuvrer ; les érosions se rencontreront donc à proximité des écluses (notamment au raccordement du radier de l'écluse avec le fond), le long des quais ou d'appontements et dans les courbes.

La description de ces géométries implique déjà un nombre de paramètres importants (hauteur d'eau, pente des talus, distance du bateau à la rive, orientation et enfoncement) auxquels s'ajoutent, pour décrire complètement le phénomène, les caractéristiques des matériaux érodables (diamètre moyen des grains et étendue granulométrique) ainsi que les paramètres propres au bateau (nombre des hélices, disposition, vitesse de rotation et orientation du gouvernail).

Face à un tel nombre de paramètres les études se sont orientées dans deux directions : d'une part, des simulations sur modèle réduit, représentant exactement le lieu concerné et un bateau donné, choisi comme référence ; et d'autre part, des tentatives de formulation des phénomènes s'appuyant sur des mesures expérimentales qui présentent une portée beaucoup plus générale mais sont forcément très schématiques.

Dans ce dernier type de démarche, qui est la plus intéressante pour une utilisation pratique, on peut distinguer trois étapes de modélisation que les auteurs ont plus ou moins développé :

- la modélisation du système propulsif qui permet de passer de ses caractéristiques de fonctionnement (poussée, vitesse de rotation de l'hélice) à la vitesse de l'eau éjectée ;
- la modélisation du champ des vitesses qui permet de passer de la vitesse derrière l'hélice à la vitesse contre le fond ou la berge.
- la modélisation du phénomène d'érosion qui permet de passer de la vitesse érosive au diamètre limite du bloc entraîné.

Ces trois étapes serviront de canevas pour l'analyse de la majorité des publications.

## 3. Modélisation du système propulsif

La modélisation la plus simple suppose une répartition uniforme de la vitesse à peu de distance de l'hélice ;

un calcul simple en est présenté par Blaauw et Van de Kaa dans [4].

En appliquant le théorème de la quantité de mouvement entre les points A et C du tube de courant ci-dessous :

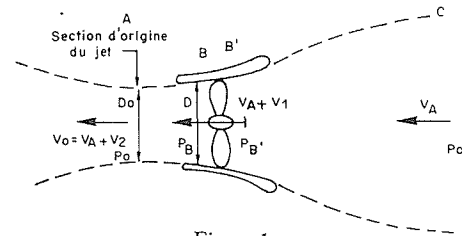


Figure 1

On obtient la poussée totale sur le système propulsif

$$Tt = \rho QV_2 = \rho (V_A + V_1) V_2 \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

et en appliquant la relation de Bernoulli successivement entre C et B et B' et A, on obtient la différence de pression de part et d'autre de l'hélice.

$$P_B - P_{B'} = \rho \frac{(V_A + V_2)^2}{2} V_2$$

d'où la poussée sur l'hélice

$$Th = \rho \frac{(V_A + V_2)^2}{2} V_2 \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

En l'absence de tuyère autour de l'hélice  $Th = Tt$ , d'où on déduit immédiatement pour les conditions de poussée maximale correspondant à  $V_A = 0$

$$V_1 = V_2/2$$

et pour satisfaire à la conservation de la masse

$$D_0 = D/\sqrt{2}$$

Lorsque l'hélice est logée dans une tuyère, la relation (2) ne donne pas la poussée totale car une action supplémentaire s'exerce sur la tuyère du fait de la répartition des pressions.

On préfère alors relier la poussée au nombre de tours de l'hélice ( $n$ ) par l'intermédiaire de coefficients de poussée ( $K$ ) déterminés par le constructeur pour la poussée totale et celle de l'hélice.

$$Tt = K_t \rho n^2 D^4 \quad \text{et} \quad Th = K_h \rho n^2 D^4$$

avec les relations (1) et (2) on a donc pour  $V_A = 0$

$$V_2 = V_0 = \sqrt{\frac{8 K_h n^2 D^2}{\pi}}$$

ou :

$$V_0 \approx 1,6 n D \sqrt{K_h} \quad (3)$$

(avec et sans tuyère)

et la contraction du jet :

$$\phi = (D_0/D)^2 = K_t/2 K_h \quad (4)$$

Blaauw et Van de Kaa ont pu vérifier ces formules sur des modèles réduits de bateau. En général on a pour une hélice à tuyère :  $T_h \sim 0,5 T_r$ , ce qui implique que

$$D_0 \approx D$$

Lorsque les coefficients de poussée ne sont pas connus, les formules suivantes sont proposées.

$$V_0 = 1,17 \left( \frac{p}{D^2} \right)^{1/3} \quad (\text{avec tuyère})$$

$$V_0 = 1,48 \left( \frac{p}{D^2} \right)^{1/3} \quad (\text{sans tuyère})$$

$p$  étant la puissance développée

ou encore selon [5] avec une erreur de 20 % sur la formule (3)

$$V_0 = 0,95 nD$$

Les formules (3) et (4) sont proposées par l'essentiel des auteurs. Cependant dans [6], il est proposé de prendre pour diamètre du jet derrière l'hélice :

$$D_0 = 2 \cdot (0,67 R_{\text{pale}} - R_{\text{moyeu}})$$

Les auteurs soviétiques [7] développent un modèle plus complexe partant d'une répartition parabolique des vitesses en sortie de la tuyère, la répartition étant définie par une vitesse nulle au centre et une vitesse moyenne  $V_0$  définie par la formule (3), soit

$$V(r) = 2 \frac{r^2}{R^2} V_0$$

En fait, la difficulté de réaliser des mesures de vitesse sur modèle ou en nature dans l'espace réduit immédiatement derrière l'hélice, permet difficilement de justifier une telle répartition.

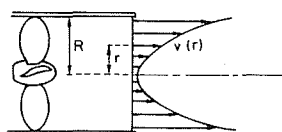


Figure 2

#### 4. Modélisation du jet

##### 4.1. Caractères généraux

Toutes les analyses du problème utilisent le modèle du jet diffusif.

Dans ce modèle très classique, on distingue (Fig. 3 ci-après), une zone d'établissement ou noyau potentiel où la vitesse dans l'axe du jet ne change pas et une zone de jet établi, diffusif où la vitesse décroît.

Dans la zone établie on suppose l'autosimilarité des profils de vitesse et une variation radiale de la vitesse suivant une loi de Gauss.

Moyennant ces hypothèses, on démontre [8] que la vitesse s'exprime selon les expressions suivantes où le

paramètre  $c$  est seul inconnu et doit être déterminé expérimentalement :

$$\text{zone d'établissement } x < x_0 \quad \left\{ \begin{array}{l} V(r, x) = V_0 \quad \left( r < \frac{D_0}{2} - cx \right) \\ V(r, x) = V_0 \exp \left[ \frac{(r + cx - D_0/2)^2}{2 c^2 x^2} \right] \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\text{zone établie } x > x_0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_m}{V_0} = \frac{1}{2c} \frac{D_0}{x} \\ V(r, x) = V_m \exp \left[ -\frac{r^2}{2 c^2 x^2} \right] \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\text{avec } x_0 = D/2c \quad (7)$$

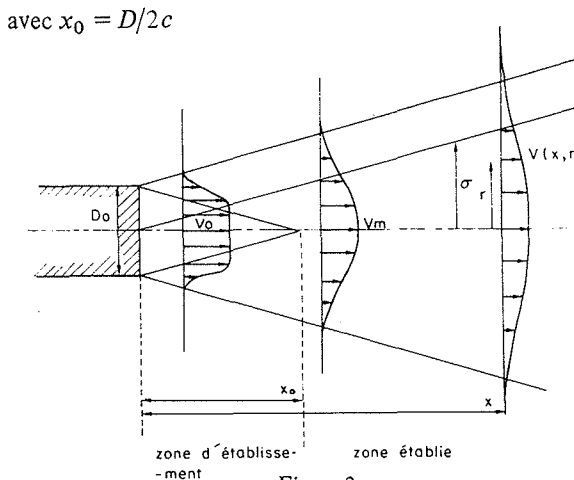


Figure 3

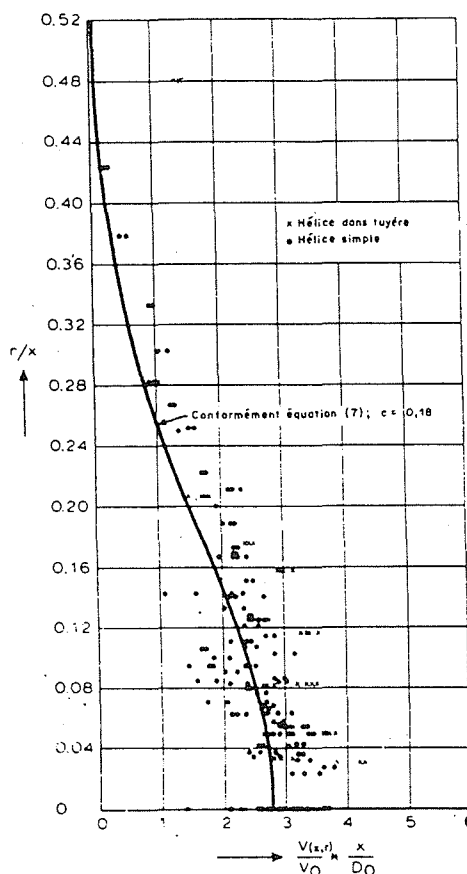


Figure 4. - Vitesse axiale d'après [4].

Pour un jet d'orifice, donc sans torsion, on retient pour valeur de  $c$  : 0,08 ce qui donne une longueur d'établissement du jet  $x_0 \approx 6,2 D_0$ .

Le jet d'hélice comporte une torsion et des hétérogénéités des vitesses, qui lui donnent un comportement différent ; la turbulence y est plus intense que dans le jet classique et de ce fait, il diffuse plus rapidement.

Les valeurs du paramètre  $c$  déterminées derrière l'hélice diffèrent donc sensiblement de celles du jet sans torsion :

Blaaw et Van de Kaa [4] ont obtenu sur des modèles de bateau au  $1/80^e$  et au  $1/25^e$ , un coefficient :

$$c = 0,18$$

et une longueur d'établissement  $x_0 = 2,8 D_0$ . Mais les mesures présentent une forte dispersion comme l'atteste la figure 4 où est reporté l'ensemble des vitesses mesurées. Fuehrer et Römisch [5] calent deux paramètres peu différents sur le modèle du jet diffusif :

$$\frac{V_m}{V_0} = \frac{1}{2 c_1} \frac{D_0}{x} \quad \text{avec } c_1 = 0,19$$

$$V(r, x) = V_m e^{-\frac{r^2}{2 c_2^2 x^2}} \quad \text{avec } c_2 = 0,15$$

Dans la communication [6] une modélisation plus complexe du champ de vitesse est décrite (Fig. 5) :

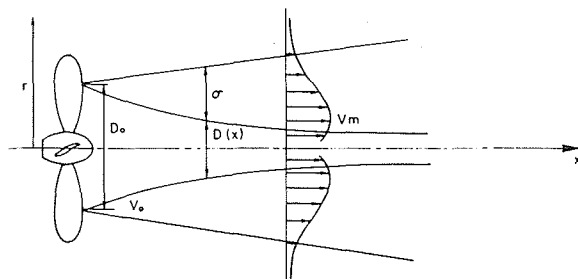


Figure 5. - Définition du jet d'après [6].

Le modèle de base est toujours celui du jet diffusif mais le maximum de vitesse n'est pas atteint au centre du jet ou existe au contraire une zone moins rapide dans le prolongement du moyeu de l'hélice.

La vitesse est alors définie par les formules suivantes :

$$\frac{V_m}{V_0} = A \left( \frac{D(x)}{x} \right)^a \quad \text{avec } A = 1,5 \quad a = 0,6$$

$$V(r, x) = V_m \exp \left[ -\frac{(r - D(x)/2)^2}{2 \sigma^2} \right]$$

$$D(x) = B \cdot D_0 \left( \frac{D_0}{x} \right)^b \quad \text{avec } B = 0,6 \quad b = 0,3$$

$$\sigma = \frac{1}{2} (D_0 - D(x)) + C(x - x_0) \quad \text{avec } C = 0,0984$$

$D_0$  est le diamètre initial du jet

$$D_0 = 2 (0,67 R_{\text{pale}} - R_{\text{moyeu}})$$

$$x_0 = \text{longueur d'établissement} = 2 D_0$$

Les nombreux paramètres empiriques de ce modèle permettent de reproduire très exactement les profils de vitesses mesurés derrière 8 hélices de types différents en milieu infini.

#### 4.2. Influence du gouvernail

Les mesures sur modèle réduit, mettent en évidence une division du jet initial derrière le gouvernail en 2 jets déviés l'un vers la surface et l'autre vers le fond.

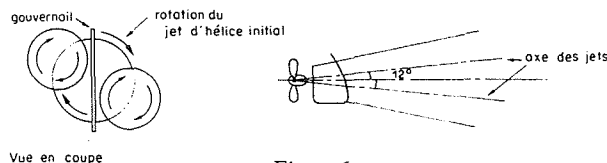


Figure 6

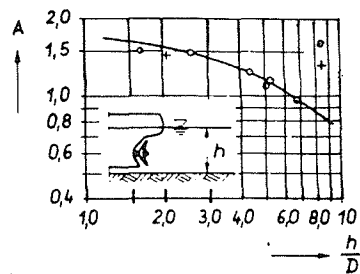
Selon [5], les axes des 2 jets formés font un angle de  $12^\circ$  avec l'horizontale.

Le jet d'hélice en présence d'un gouvernail pourra donc être traité selon la théorie précédente en tenant compte d'une déviation de  $12^\circ$  vers le fond et en prenant un diamètre origine de  $D_0/\sqrt{2}$  pour assurer la conservation de la quantité de mouvement du jet initial.

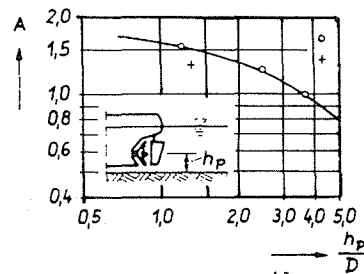
#### 4.3. Influence du confinement

La prise en compte de limites à l'extension du jet (surface de l'eau, fond ou talus) nécessite l'intervention de nombreux paramètres, aussi les auteurs se sont limités au mieux à une prise en compte globale du confinement sous forme d'une loi générale ne faisant pas intervenir tous les paramètres géométriques.

Blaauw et Van de Kaa constatant sur les mesures de vitesses que le confinement du jet induit par le fond et la surface libre n'amène pas un écart important avec la vitesse calculée par la formule du jet libre préfèrent négliger cet effet.



Pour hélice sans gouvernail



avec gouvernail

Figure 7

Des chercheurs d'Allemagne de l'Est [9] quantifient de façon globale le confinement par l'intermédiaire d'une loi de décroissance de la vitesse axiale du jet en interaction avec la limite.

$$\frac{V_m}{V_0} = A \left( \frac{x}{D} \right)^{-a}$$

avec :

$a = 0,6$  pour un jet limité par le fond

$a = 0,3$  pour jet limité en plus latéralement.

La constante  $A$  est définie par les abaques de la figure 7 en fonction du tirant d'eau ou de la distance de l'axe de l'hélice au fond, selon la présence ou non d'un gouvernail.

Cependant, le nombre d'essais ayant servi à établir ces courbes parait réduit pour garantir leur généralité et l'influence de la distance du bateau au quai en cas de limite latérale du jet, n'est pas explicitée.

En ce qui concerne la vitesse sur le fond, ils proposent la formule empirique suivante où seul intervient la distance de l'axe de l'hélice au fond

$$\frac{V}{V_0} = E \left( \frac{h_p}{D} \right)^{-1} \quad (8)$$

$E$  étant un coefficient relativement subjectif puisqu'il vaut :

0,71 pour une étrave "fine" avec gouvernail

0,42 " " sans gouvernail

0,25 pour un bateau de navigation intérieure avec gouvernail et hélice dans un tunnel.

Les champs de vitesses et les érosions engendrés par des jets d'orifice dans des géométries complexes ont fait l'objet d'un nombre important d'études [10, 11, 12] et dont une synthèse est présentée dans le livre de Rajaratnam "Turbulent Jet" [13]. Mais il a été vu précédemment que les jets d'hélice étaient beaucoup plus turbulents, ce qui implique une diffusion différente des vitesses et, pour une même vitesse moyenne sur le fond, des effets érosifs plus importants. Les résultats établis pour des jets classiques d'orifice ne nous paraissent donc pas utilisables sans qu'une expérimentation sur jet d'hélice ait permis de réévaluer les paramètres des modèles développés.

## 5. Modélisation des phénomènes érosifs

### 5.1. Erosion sur le fond

L'analyse des phénomènes de début d'entraînement a été décrite par Shields [8] dès 1936 :

Les forces s'exerçant sur le grain étant :

– la traînée proportionnelle à  $\tau^* d^2$

( $\tau^*$  contrainte de frottement sur le grain,  $d$  son diamètre)

– le poids proportionnel à  $(\rho_s - \rho)gd^3$

Il y a entraînement lorsque le rapport de ces deux grandeurs atteint une certaine valeur  $\psi$ , appelé coefficient d'arrachement du grain ou paramètre de Shields :

Soit à la limite d'entraînement :

$$\frac{\tau^*}{\rho \Delta g d} = \psi \quad (9)$$

avec  $\Delta \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  = densité du solide dans l'eau.

Les expériences de Shields ont montré que  $\psi$  ne dépendait plus du diamètre du grain lorsque le nombre de Reynolds du grain  $R_g$  dépassait 200

$$R_g = \frac{u^* d}{\nu} \quad (u^* : \text{vitesse du cisaillement})$$

Une des difficultés de l'étude de ces phénomènes réside dans le fait que l'arrachement des grains est un phénomène aléatoire qui débute avec la plus forte valeur des fluctuations turbulentes de la vitesse. Il en résulte : d'une part, une difficulté à définir la notion de début d'entraînement, qui dépend en fait du temps d'observation et de l'étendue du sol soumis à l'action de la vitesse (une augmentation de l'un et de l'autre augmentant les chances d'observer une fluctuation de vitesse extrême entraînant l'arrachement), et d'autre part, l'impossibilité d'utiliser les relations entre vitesse du fluide et diamètre limite d'enrochement entraîné, établies pour des écoulements uniformes en rivière, qui correspondent à des niveaux de turbulence moindres que pour les jets d'hélice.

Face à ces difficultés Blaauw et Van de Kaa [4] proposent la démarche suivante :

Plutôt que la notion contestable de début d'entraînement, ils considèrent le débit solide  $q_s$ , qu'ils relient au paramètre de Shields, grâce à la relation expérimentale établie par Paintal [14] entre le paramètre de transport  $\varphi = qs/(\Delta g d^3)$  et  $\psi$  (figure ci-dessous).

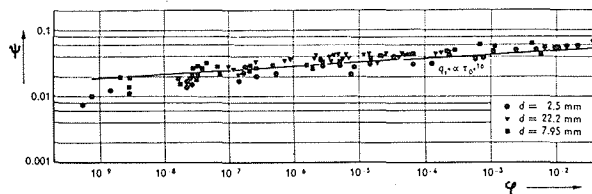


Figure 8

Cette relation n'est valable que pour les entraînements très faibles pour lesquels on peut supposer qu'il existe un débit solide de saturation immédiatement atteint sur la zone d'expérience.

Mesurant  $qs$  pour une certaine vitesse sur le fond, il en tirent  $\psi$  d'où  $\tau^*$

$$\tau^* = \psi \rho \Delta g d \quad (10)$$

qu'ils relient à un coefficient de traînée du grain par :

$$\tau^* = \frac{1}{2} Ct \rho V^2 \quad (11)$$

Pour l'ensemble des essais ils obtiennent :

$$0,06 < Ct < 0,11 \quad (12)$$

Pour diminuer l'incertitude sur  $C_t$ , les auteurs ont alors cherché à mesurer le niveau de turbulence sur le fond pour les différents essais, grâce au rapport  $\frac{V'}{V}$ ,  $V'$  étant la fluctuation "maximale" de la vitesse sur le fond.

Le rapport  $\frac{V'}{V}$  varie en fonction de  $\frac{x}{D_0}$  et de la distance à l'axe du jet  $\left(\frac{r}{x}\right)$  (cf. Fig. 9)

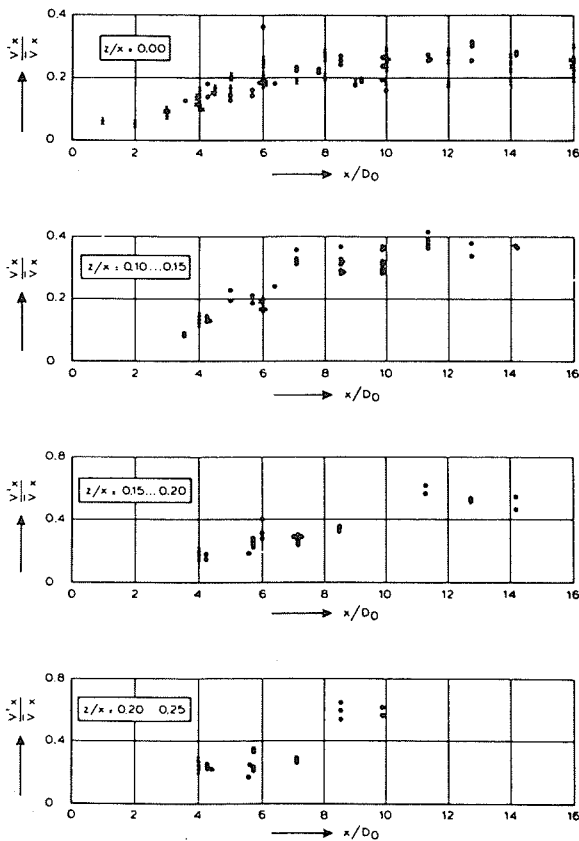


Figure 9

en rapportant alors la contrainte déterminée précédemment non plus à la vitesse moyenne, mais à la vitesse  $V + 3V'$  assimilée à la vitesse réalisée pendant 1 % du temps

$$\tau^* = \frac{1}{2} C_t' \rho (V + 3V')^2$$

ils restreignent un peu la gamme de variation de ce nouveau coefficient de traînée :

$$0,02 < C_t' < 0,03$$

Les chercheurs d'Allemagne de l'Est [9] proposent sur la base de leurs essais en canal, de relier le diamètre des enrochements à la limite d'entraînement, à la vitesse au fond par :

$$V = B \sqrt{\Delta g d} \tag{13}$$

avec  $B$  variant de 0,9 à 1,25 selon le type de bateau.

Relativement à la formulation de Blaauw et Van de Kaa, il lui correspond un coefficient  $C_t$  s'exprimant par :

$$C_t = \frac{2\psi}{B^2}$$

en prenant  $\psi$  compris entre 0,03 et 0,05 on a selon le cas :

$$0,04 < C_t < 0,12$$

soit une gamme de variations importante, mais cohérente avec celle de [4].

### 5.2. Erosion sur les talus :

Les formulations précédentes ont été établies pour les érosions sur le fond des voies navigables. Une extension de ces résultats peut être faite en s'inspirant de l'analyse de M. Ramette [15] pour la tenue des tapis d'enrochements.

En exprimant les forces s'exerçant sur un bloc à la limite de stabilité sur un talus et celle s'établissant sur le même bloc posé au fond, M. Ramette démontre que si  $\tau^*$  est la contrainte limite de cisaillement d'un bloc de diamètre  $d$  sur le fond, le même bloc ne sera stable sur un talus de pente  $\alpha$  que jusqu'à une contrainte  $\tau_\alpha^*$  telle que :  $\tau^* = \tau \cdot f(\alpha)$

$$\text{avec } f(\alpha) = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \alpha}{\text{tg}^2 \beta}}$$

$\beta$  étant l'angle du cône de frottement des blocs ou encore l'angle du talus naturel des enrochements sous l'eau, pratiquement indépendant de  $\alpha$  et de l'ordre de  $33^\circ$  soit  $\text{tg} \beta = 0,65$ .

La relation de Shields s'écrit donc pour un bloc sur un talus

$$\tau \cdot f(\alpha) = \psi \rho \Delta g d_\alpha$$

Le diamètre limite  $d_\alpha$  d'un bloc en équilibre sur un talus de pente  $\alpha$  est donc donné par

$$d_\alpha = d / \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \alpha}{0,42}}$$

où  $d$  est le diamètre d'enrochement déterminé à partir des formules d'érosion de fond du paragraphe 5.1.

### 6. Erosion des jets d'hélice dans les courbes

Les effets de jet d'hélice à craindre dans les courbes, se distinguent des cas précédemment envisagés par le fait que le bateau est maintenant en marche.

Ceci implique que la vitesse du jet est moindre que lorsque le bateau est à l'arrêt.

Elle peut être encore déterminée en reprenant le calcul du paragraphe 3. ce qui donne la relation suivante sur  $V_2$  [9].

$$V_2 = 1,6 n D \sqrt{K_h} \left(1 + \frac{2V_A}{V_2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

avec  $K_h$  fonction décroissante de la vitesse d'avancée  $V_A$ .

De plus, le courant de retour induit par le bateau en marche, tend à rabattre le jet d'hélice vers la surface [5]

Pour déterminer la vitesse sur la berge, et le diamètre des enrochements, il est nécessaire de connaître la distance minimale d'approche du bateau et de connaître son angle de dérive (écart entre l'orientation du bateau et la trajectoire).

L'amplitude de la dérive dépend de nombreux facteurs et également de l'habileté et de l'expérience du barreur. Le laboratoire d'hydraulique de Delft a entrepris une étude systématique sur modèle des principaux facteurs déterminants l'angle de dérive, dans le cas d'un barreur "idéal". Des courbes reproduisant leur influence sont présentées dans leur communication au congrès de l'AIPCN de 1977 [16].

Les angles réels de dérive ont également été mesurés sur le Rhin à l'aide d'images radar ; ils s'établissent à une valeur moyenne de 18° (25° au maximum) en descente dans des courbes de 650 m de rayon, et pour des convois de 170 m de long.

A cette dérive, s'ajoute l'angle du gouvernail qui peut être tourné vers la berge en sortie de courbe.

## 7. Etudes sur modèle réduit

Les dispositions à prendre pour se protéger des jets d'hélice dans des sites particuliers (notamment à l'occasion de la construction d'appontement ou de l'aménagement de port), ont donné lieu à des études sur modèle réduit permettant de reproduire la géométrie du site dans toute sa complexité et utilisant un ou deux bateaux type représentatifs de la navigation rencontrée.

Parmi ces études particulières, les recherches menées pour le projet de pavage du Rhin et sur sa résistance à l'érosion par les bateaux, présente un intérêt plus général. En effet, à cette occasion, les règles de similitude pour la reproduction des effets de la navigation ont été plus particulièrement examinées [17], [18].

Comme pour tout problème à surface libre, le modèle doit être bâti selon la similitude de Froude, mais la reproduction selon cette règle de la vitesse de rotation de l'hélice et donc du jet, ne donne pas forcément la poussée du bateau suffisante pour produire son déplacement à l'échelle et donc simuler correctement le courant de retour.

Cet effet d'échelle se manifeste lorsque le nombre de Reynolds du propulseur, ou nombre de Gutsche est tel que : [19]

$$R_G = \frac{nDLm}{V} < 7.10^{-4}$$

$$\text{avec } Lm = \frac{A_E}{A_0} D\pi 2\omega \left(1 - \frac{Dm}{D}\right)^{-1}$$

où  $\frac{A_E}{A_0}$  = rapport des surfaces des pales de l'hélice sur celle du disque balayé par l'hélice.  
 $\omega$  = le nombre de pales  
 $Dm$  = le diamètre du moyeu de l'hélice.

Pour obtenir une similitude complète des écoulements autour du bateau sans utiliser une échelle trop

petite, il faudra donc dans certains cas, adjoindre au bateau un système de traction extérieur lui donnant la vitesse voulue.

La représentation des effets érosifs doit respecter la similitude de la contrainte limite d'entraînement. Depuis l'étude de Shields, on sait qu'elle est indépendante du nombre de Reynolds du grain  $R_G$  lorsqu'il dépasse 200, soit :

$$R_G = \frac{du^*}{\nu} > 200$$

avec  $u^*$  : vitesse de cisaillement.

Dans un jet d'hélice on trouve toutes les valeurs de vitesses depuis zéro jusqu'à la vitesse maximale, cette condition ne pourra donc être satisfaite sur le modèle que pour les vitesses les plus fortes, mais pas toutes. Il en résulte conformément à la forme de la courbe de Shields une amplification des érosions sur modèle dans les zones de faible vitesse.

Cet effet a été étudié par des essais comparatifs à Karlsruhe en laboratoire et sur une retenue du Rhin [17], [18]. Il est ainsi apparu que la profondeur d'érosion était bien représentée, par contre, les volumes déplacés et la longueur des fosses d'érosion étaient, comme prévu, sur-évalués sur le modèle.

Signalons enfin que l'étude du pavage du Rhin avait donné lieu à une recherche originale de J. Bernier [20], pour établir un modèle stochastique de l'érosion par jet d'hélice. Ce modèle assimilait le déplacement des grains à un processus Markovien et utilisait une loi de probabilité de la distance de déplacement du grain, au passage d'un bateau, à déterminer sur modèle physique. L'abandon du projet de pavage du Rhin n'a pas permis sa détermination et ce modèle n'a donc pu être développé totalement.

## 8. Synthèse des différentes formulations

Parmi la documentation examinée, seuls deux groupes d'auteurs proposent une formulation complète permettant de passer des caractéristiques du bateau au diamètre des enrochements de protection : d'une part Blaauw et Van de Kaa du laboratoire de Delft et d'autre part un groupe d'Allemagne de l'Est : Römisch, Fuehrer et Engelke.

En fait, ces deux modèles utilisent la même formulation de la vitesse initiale du jet en fonction des caractéristiques du système propulseur et, à vitesse sur le fond égale, les deux modèles donnent des diamètres d'enrochements équivalents.

La seule différence réside donc dans le calcul de la vitesse érosive. L'équipe Néerlandaise préfère négliger l'influence du confinement et assimile la vitesse en tous points du fond à la vitesse aux mêmes points dans un jet libre sans parois limitant son extension, alors que le second groupe de chercheurs tente de relier la vitesse au fond à la distance de l'hélice à la paroi. Malheureusement leur formule fait intervenir des paramètres empiriques très subjectifs rendant son utilisation pratiquement impossible.

Dans ces conditions, la méthode de calcul devra plutôt être calquée sur la démarche de l'équipe de Delft

en tenant compte des quelques apports complémentaires révélés par les autres publications (effet du gouvernail, érosion sur les talus, érosion dans les courbes).

Les formules utiles aux trois étapes du calcul sont rappelées ci-après :

### 1) Calcul de la vitesse initiale du jet (§ 3)

a) Vitesse d'avancée nulle

$$V_0 = 1,6 nD \sqrt{K_h} \quad (3)$$

$D_0 \approx D$  hélice dans une tuyère

$$D_0 \approx \frac{D}{\sqrt{2}} \text{ hélice sans tuyère}$$

b) Vitesse d'avancée non nulle

$$V_2 = 1,6 nD \sqrt{K_h} \left(1 + \frac{2 V_A}{V_2}\right)^{-1/2} \text{ d'après (2)}$$

Diamètre défini par

$$\left(\frac{D_0}{D}\right)^2 = \frac{V_A + V_1}{V_A + V_2}$$

avec 
$$V_A + V_1 = \frac{4 K_t n^2 D^2}{\pi V_2}$$

c) Influence du gouvernail (§ 4.2)

Le jet initial est divisé en 2 jets de diamètre  $D_0/\sqrt{2}$  situés dans le plan du gouvernail et dirigés vers le fond et la surface suivant un angle de l'ordre de  $12^\circ$  avec l'axe de l'hélice (à vitesse d'avancée nulle).

### 2) Calcul de la vitesse maximale sur les parois (§ 4)

La vitesse sur le fond et les talus est assimilée à la vitesse aux mêmes points dans un jet libre de paramètre de diffusion

$$c \approx 0,18$$

On calcule donc la vitesse en plusieurs points de la paroi jusqu'à déterminer la valeur maximale (5, 6, 7).

### 3) Calcul du diamètre des enrochements (§ 5)

a) sur le fond (§ 5.1)

Le diamètre est donné par (10, 11, 12):

$$d = \frac{1/2 C_t V^2}{\psi \Delta g} \text{ avec } 0,06 < C_t < 0,11$$

$\psi$  est choisi entre 0,02 et 0,05. Le choix de cette valeur peut-être relié par la courbe de la figure 8 à un certain débit solide donc à une intensité d'érosion acceptée.

b) Sur les talus (§ 5.2)

On calculera de la même manière une vitesse maximale sur le talus et le diamètre d'enrochement sera

obtenu en introduisant le terme correctif :

$$f(\alpha) = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\text{tg}^2 \alpha}{0,42}}$$

soit :

$$d_\alpha = \frac{1/2 C_t V^2}{f(\alpha) \psi \Delta g}$$

c) érosion dans les courbes (§ 6)

On sera amené à un calcul d'érosion sur talus par un jet avec vitesse d'avancée non nulle. Le problème étant alors de définir une géométrie type : distance du bateau à la berge, angle de dérive, orientation du gouvernail.

## 9. Conclusion :

A l'issue de cette recherche documentaire, il apparaît que la bibliographie sur l'effet des jets d'hélice est assez pauvre. Ceci provient certainement du fait que l'intérêt ne s'est porté sur ces problèmes qu'assez récemment et que la multiplicité des paramètres impliqués dans leur description ont fait rechercher la solution de problèmes précis dans des simulations particulières sur modèle réduit ne présentant pas de portée générale.

Les formulations générales sont de ce fait assez schématiques et loin de prendre en compte la totalité de la diversité des situations possibles. Plusieurs auteurs proposent des contributions décrivant un aspect partiel des phénomènes (par exemple le champ de vitesse derrière l'hélice) sans pouvoir l'intégrer dans une modélisation complète opérationnelle.

Seuls deux groupes de chercheurs avancent une formulation complète permettant de passer des caractéristiques du bateau aux tailles d'enrochements ; il s'agit de H.G. Blaauw et E.J. Van de Kaa du Laboratoire de Delft et d'une équipe Est-Allemande : Fuehrer, Römisch et Engelke.

Le premier modèle nous paraît procéder d'une démarche plus rationnelle, notamment en ce qui concerne la modélisation des phénomènes érosifs exprimée en terme de débit solide, plutôt qu'en terme de débit d'entraînement.

L'emploi de la méthode Est-Allemande est délicate du fait de l'utilisation de coefficients subjectifs caractérisant le type de bateau et ayant une influence considérable sur la vitesse obtenue. Par contre, à vitesse sur le fond égale, les deux modèles donnent des tailles d'enrochements cohérentes. La démarche de calcul proposée en synthèse (paragraphe 8) est donc basée sur la formulation des chercheurs de Delft.

C'est donc certainement au niveau de la définition de la vitesse sur la paroi en fonction de la position du bateau que subsiste le plus d'incertitude.

A l'aide de l'analyse d'autres documents, on s'est attaché à étendre le champ d'application de ces méthodes aux effets érosifs des jets d'hélice dans les courbes et sur les talus des voies navigables.



## Table des symboles

$A, a$	: paramètres empiriques (—)	$r$	: distance à l'axe du jet (m)
$A_0$	: surface de l'hélice (m <sup>2</sup> )	$Th$	: poussée sur l'hélice (N)
$A_E$	: surface des pales de l'hélice (m <sup>2</sup> )	$Tt$	: poussée totale du propulseur (N)
$B, b$	paramètres empiriques (—)	$u^*$	: vitesse de cisaillement (m s <sup>-1</sup> )
$C$		$V$	: vitesse maximale sur le fond (m s <sup>-1</sup> )
$Ct, Ct'$	: coefficient de trainée du grain (—)	$V(x, r)$	: vitesse du point courant (m s <sup>-1</sup> )
$c$	: coefficient du jet (—)	$V_A$	: vitesse d'avancée du bateau (m s <sup>-1</sup> )
$D$	: diamètre de l'hélice (m)	$V_0$	: vitesse à l'origine du jet (m s <sup>-1</sup> )
$D_0$	: diamètre origine du jet (m)	$Vm$	: vitesse sur l'axe du jet (m s <sup>-1</sup> )
$Dm$	: diamètre du moyeu de l'hélice (m)	$V_1$	: supplément de vitesse au niveau de l'hélice (m s <sup>-1</sup> )
$d$	: diamètre des enrochements (m)	$V_2$	: supplément de vitesse à l'origine du jet (m s <sup>-1</sup> )
$E$	: paramètre empirique (—)	$\omega$	: nombre de pales de l'hélice (—)
$g$	: accélération de la pesanteur (m s <sup>-2</sup> )	$x$	: abscisse comptée sur l'axe du jet (m)
$h$	: tirant d'eau (m)	$x_0$	: longueur d'établissement du jet (m)
$hp$	: distance de l'axe de l'hélice au fond (m)	$\alpha$	: angle du talus (—)
$Kh, Kt$	: coefficient de poussée (—)	$\beta$	: angle du cône de frottement (—)
$Lm$	: paramètre intermédiaire (—)	$\Delta$	: densité du solide sous l'eau (—)
$n$	: vitesse de rotation de l'hélice (s <sup>-1</sup> )	$\Phi$	: contraction du jet (—)
$P$	: puissance développée (W)	$\varphi$	: paramètre du transport solide (—)
$p$	: pression (N m <sup>-2</sup> )	$\nu$	: viscosité de l'eau (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$p_0$	: pression loin de l'hélice (N m <sup>-2</sup> )	$\rho$	: masse volumique de l'eau (kg m <sup>-3</sup> )
$Q$	: débit d'eau accéléré par l'hélice (m <sup>3</sup> /s)	$\rho_s$	: masse volumique du solide (kg m <sup>-3</sup> )
$qs$	: débit solide en volume par unité de largeur de l'écoulement (m <sup>3</sup> /ms)	$\sigma$	: écart type de la distribution de vitesse (m)
$R$	: rayon de l'hélice (m)	$\tau^*, \tau_\alpha^*$	: contrainte de cisaillement (N m <sup>-2</sup> )
$R_G$	: nombre de Reynolds du propulseur (—)	$\psi$	: paramètre de Shields (—)
$R_g$	: nombre de Reynolds du grain (—)		

## Références bibliographiques

- [1] SCHIJF J.B. — Congrès de l'AIPCN, Lisbonne, 1949.
- [2] SCHIJF J.B., JANSEN P. Ph. — Congrès de l'AIPCN, Rome, 1953.
- [3] TENAUD R. — Essais sur modèles réduits et modèle mathématique pour l'étude du passage des convois poussés dans un canal et des défenses de berge. Congrès de l'AIPCN, Leningrad, 1977.
- [4] BLAAUW H.G., VAN de KAA E.J. — Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manœuvring ships; Delft hydraulics Laboratory N° 202, 1978.
- [5] FUEHRER M., ROMISCH K. — Effect of modern ship traffic on Inland and Ocean waterways and their structure, congrès AIPCN, Leningrad, 1977.
- [6] BERGER W., FELKEL K., HAGER M., OEBIUS H., SCHALE E. — Courant provoqué par les bateaux. Protection des berges et solution pour éviter l'érosion du lit du haut Rhin : Congrès Edimbourg, 1981.
- [7] BALANIN V., BYKOV L., ZERNOV D., METELYTSINA G., NATAL-CHISHIN G. — Means of protecting waterways slopes and beds from streams and waves including ship effect. Congrès AIPCN, Edimbourg, 1981.
- [8] HUG M. — Mécanique des fluides appliquées. Eyrolles, 1975.
- [9] FUEHRER H., ROMISCH K., ENGELKE G. — Criteria for dimensionning the bottom and slope protections and for applying new method of protecting navigation canals. Congrès AIPCN, Edimbourg, 1981.
- [10] RAJARATNAM N., STALKER M.J. — Circular wall jet in coflowing strams, *Journal of the hydraulics division ASCE* N° HY 2 feb. 1982, p. 187.
- [11] RAJARATNAM N. — Erosion by plane turbulent jet, *Journal of hydraulic research*, 19 (1981), N° 4.
- [12] POREH M., HEFFEZ E. — Erosion et mise en mouvement des sédiments sous l'effet d'un jet immergé. C.R. Congrès AIRH, Sept. 1967, vol. 13.
- [13] RAJARATNAM M. — Turbulent jets Developments in water science vol. 5, Elsevier.
- [14] PAINTAL A.S. — Concept of critical shear stress in loose boundary open shannels. *Journal of hydraulic research* 9 (1), p. 91-113.
- [15] RAMETTE M. — Protection de talus au moyen d'enrochements; Bulletin du Centre de Recherche et d'essai de Chatou, N° 3, 1963.
- [16] BOUWMEESTER J., VAN de KAA E.J., NUHOFF H.A., VAN ORDEN R.G.J. — Congrès de l'AIPCN, Leningrad, 1977.
- [17] Bundesanstalt fur wasserbau. — Überlegungen zur frage der Naturähnlichkeit der modelversuche über die Einwirkungen der schiffahrt auf die bewegliche Rheinsohle und auf eine Sohlenpanzerung. Karlsruhe, 1969.
- [18] FELKEL K., STEINWELLER H. — Natur und modellversuche über die Wirkung der schiffe auf Flußsohlen aus Grobkies. *Wasserwirtschaft*, N° 62, (1972) vol. 8.
- [19] HENSCHKE W. — Schiffbautechnisches handbuch Berlin VEB. Verlag technik.
- [20] BERNIER J. — Un modèle probabiliste du charriage provoqué par le trafic fluvial. Application au problème du pavage du Rhin. E.D.F. Laboratoire National d'Hydraulique, HC 040.