

Morphologie du lit autour d'un obstacle soumis à un écoulement en couche mince

Dynamics of the Bed Morphology Around an Obstacle in Shallow Flow

Morphologie des Bettes um ein Hindernis, das einem Abfluss in dünner Schicht ausgesetzt wurde

Claudine Boyer and André G. Roy

Volume 45, Number 1, 1991

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/032848ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/032848ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)

1492-143X (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Boyer, C. & Roy, A. G. (1991). Morphologie du lit autour d'un obstacle soumis à un écoulement en couche mince. *Géographie physique et Quaternaire*, 45(1), 91–99. <https://doi.org/10.7202/032848ar>

Article abstract

This paper reports the results of experiments conducted in a flume to observe the bed morphology around a spherical obstacle (diamètre: 7.2 cm) half-buried in a non-cohesive sand bed (D50:0.56 mm). Flow depths varied from 0.45 cm to 1.4 cm; average velocities ranged from 0.25 m s⁻¹ to 0.45 m s⁻¹ and the Froude number from 0.8 to 1.6. Each run resulted in a typical current crescent surrounding the front and sides of the obstacle followed by a complex zone of furrows and elongated deposits. Maximum scour depth is highly variable but is sharply reduced as critical velocity for sediment transport is exceeded. The complexity of the sedimentary structure is controlled by the location and expansion of the vortices which develop in the vicinity of the obstacle. The set of vortices is governed by fluid velocity which determines the position and angle of the frontal wave created by the presence of the obstacle and consequently the bed geometry. At low velocity, the wave is bent around the obstacle but forms a wide angle leaving a large low pressure zone on the sides of the obstacle. This zone allows a secondary vortex to detach from the horseshoe vortex immediately surrounding the obstacle. The secondary vortex produces a zone of erosion marked by a furrow and zones of sedimentation in the shear layers. As velocity increases, the sedimentary structure becomes a simple current crescent with a small sand shadow tail in the lee of the obstacle. This is caused by the refraction angle of the wave which becomes more acute and gradually surrounds the obstacle thereby constraining the lateral expansion of the secondary vortex. This relation between sedimentary structure and flow dynamics is particular to shallow flow environments and it bears interesting implications for sedimentologists.

MORPHOLOGIE DU LIT AUTOUR D'UN OBSTACLE SOUMIS À UN ÉCOULEMENT EN COUCHE MINCE

Claudine BOYER et André G. ROY, Département de géographie, Université de Montréal, c.p. 6128, succursale A, Montréal, Québec H3C 3J7.

RÉSUMÉ Cet article décrit les résultats d'expériences menées en canal réduit sur la morphologie du lit autour d'un obstacle sphérique (diamètre: 7,2 cm) à demi-enfoui dans un lit de sable non cohésif (D_{50} : 0,56 mm). La profondeur des écoulements varie de 0,45 cm à 1,4 cm, la vitesse moyenne de 25 cm s⁻¹ à 45 cm s⁻¹ et le nombre de Froude de 0,8 à 1,6. La morphologie typique comprend une zone d'affouillement formant un croissant en amont et sur les côtés de l'obstacle et une zone d'accumulation plus ou moins complexe en aval de l'obstacle. La profondeur maximale du surcreusement est variable, mais décroît brusquement lorsque la vitesse critique de mise en mouvement des grains du lit est dépassée. La complexité de la structure sédimentaire s'explique par la différenciation et l'expansion latérale et verticale des vortex qui se sont formés autour de l'obstacle. À petite vitesse, les structures sédimentaires en aval de l'obstacle sont multiples et forment un angle obtus entre elles. Cet arrangement est conditionné par la position relative de la vague, des vortex et des zones de vitesse réduite de part et d'autre de l'obstacle, en plus de celle située directement en aval de l'obstacle. La zone de vitesse réduite est exploitée par un vortex secondaire qui se détache du vortex en «fer-à-cheval» et contourne l'obstacle. Le vortex secondaire est caractérisé par une vitesse élevée par rapport au fluide environnant; il en résulte une cannelure surplombée par deux zones d'accumulation. Cette forme est conservée jusqu'à ce que le vortex réintègre l'écoulement principal. Lorsque la vitesse augmente, l'angle de la vague frontale se resserre autour de l'obstacle et restreint la propagation latérale du vortex secondaire; la morphologie qui en résulte est un surcreusement en forme de croissant et une mince zone d'accumulation en aval de l'obstacle. Ces observations démontrent qu'il existe une relation spécifique aux écoulements en couche mince entre la structure sédimentaire et les paramètres hydrauliques de l'écoulement.

ABSTRACT *Dynamics of the bed morphology around an obstacle in shallow flow.* This paper reports the results of experiments conducted in a flume to observe the bed morphology around a spherical obstacle (diameter: 7.2 cm) half-buried in a non-cohesive sand bed (D_{50} : 0.56 mm). Flow depths varied from 0.45 cm to 1.4 cm; average velocities ranged from 0.25 m s⁻¹ to 0.45 m s⁻¹ and the Froude number from 0.8 to 1.6. Each run resulted in a typical current crescent surrounding the front and sides of the obstacle followed by a complex zone of furrows and elongated deposits. Maximum scour depth is highly variable but is sharply reduced as critical velocity for sediment transport is exceeded. The complexity of the sedimentary structure is controlled by the location and expansion of the vortices which develop in the vicinity of the obstacle. The set of vortices is governed by fluid velocity which determines the position and angle of the frontal wave created by the presence of the obstacle and consequently the bed geometry. At low velocity, the wave is bent around the obstacle but forms a wide angle leaving a large low pressure zone on the sides of the obstacle. This zone allows a secondary vortex to detach from the horseshoe vortex immediately surrounding the obstacle. The secondary vortex produces a zone of erosion marked by a furrow and zones of sedimentation in the shear layers. As velocity increases, the sedimentary structure becomes a simple current crescent with a small sand shadow tail in the lee of the obstacle. This is caused by the refraction angle of the wave which becomes more acute and gradually surrounds the obstacle thereby constraining the lateral expansion of the secondary vortex. This relation between sedimentary structure and flow dynamics is particular to shallow flow environments and it bears interesting implications for sedimentologists.

ZUSAMMENFASSUNG *Morphologie des Bettes um ein Hindernis, das einem Abfluss in dünner Schicht ausgesetzt wurde.* Dieser Artikel beschreibt die Ergebnisse von Experimenten, die in einem künstlichen Kanal durchgeführt wurden, um die Morphologie des Bettes um ein kugelförmiges Hindernis zu beobachten (Durchmesser: 7,2 cm), das in ein Sandbett (D_{50} : 0,56 mm) halb eingegraben war. Die Abflusstiefen variieren zwischen 0,45 cm bis 1,41 cm, die durchschnittliche Geschwindigkeit reicht von 25 cm s⁻¹ bis 45 cm s⁻¹ und die Froude-Zahl von 0,8 bis 1,6. Die typische Morphologie besteht aus einer Ausschürfzone, die einen Halbmond oberhalb und auf den Seiten des Hindernisses bildet und einer mehr oder weniger komplexen Akkumulationszone unterhalb des Hindernisses. Die Übertiefung erreicht eine variable maximale Tiefe, aber sie nimmt drastisch ab, wenn die kritische Geschwindigkeit der Ingangsetzung des Sedimenttransports überschritten wird. Die Komplexität der Sedimentstruktur lässt sich durch die laterale und vertikale Differenzierung und Ausdehnung der Wirbel erklären, die sich um das Hindernis herum gebildet haben. Bei geringer Geschwindigkeit sind die Sedimentstrukturen unterhalb des Hindernisses vielfältig und bilden zueinander einen stumpfen Winkel. Diese Anordnung ist durch die relative Position der Welle, der Wirbel und der Geschwindigkeitszonen — vermindert auf den Seiten des Hindernisses, vermehrt direkt hinter dem Hindernis — bedingt. Die Zone vermindelter Geschwindigkeit wird durch einen sekundären Wirbel ausgenutzt, der sich von dem "Hufeisen" — Wirbel ablöst und das Hindernis umgeht. Der sekundäre Wirbel zeichnet sich durch eine erhöhte Geschwindigkeit gegenüber der umgebenden Flüssigkeit aus; das führt zu einer Riefelung, welche durch zwei Akkumulationszonen überragt wird. Diese Form wird solange beibehalten bis der Wirbel wieder in den Hauptabfluss zurückkehrt. Bei zunehmender Geschwindigkeit wird der frontale Winkel um das Hindernis enger und beschränkt die laterale Ausbreitung des sekundären Wirbels.

INTRODUCTION

Plusieurs études ont porté sur la morphologie du lit autour d'un obstacle et sur les interactions entre ce dernier et un fluide en écoulement (Roper *et al.*, 1967; Shen *et al.*, 1969; Breusers *et al.*, 1977; Hunt *et al.*, 1978; Jain et Fisher, 1980; Greely et Iversen, 1985; Raudkivi, 1986; Melville et Sutherland, 1988). En général dans ces derniers travaux, l'eau est profonde par rapport à la taille des particules du lit et à celle de l'obstacle. Par ailleurs, en sédimentologie et en géomorphologie, les écoulements en couche mince revêtent une grande importance puisqu'ils se produisent dans un grand nombre de milieux sédimentaires. Pourtant, peu d'études approfondies ont traité de la présence d'obstacle en eau courante peu profonde et des structures sédimentaires qui en résultent. La faible profondeur d'un fluide en mouvement risque de modifier les manifestations de la turbulence associées à la présence de l'obstacle. Il est fort probable que les écoulements en couche mince se comportent d'une façon particulière de sorte que l'on ne puisse les comprendre en transférant tout simplement les connaissances obtenues à partir d'autres types d'écoulement. La différence entre les écoulements en couche mince et ceux en chenal profond n'est pas qu'une question d'échelle. Les écoulements en couche mince se caractérisent par une faible rugosité relative ($Y_o/k_s < 1$) et correspondent souvent à des écoulements où le nombre de Froude est élevé. Dans de telles circonstances, le comportement de la vague frontale, créée par la présence d'un obstacle (par ex. des cailloux) dans la nappe d'eau en mouvement, peut jouer sur l'écoulement à l'approche de l'obstacle et sur la morphologie du lit autour de celui-ci. La proximité de la surface de l'eau et du fond modifie probablement la réponse du lit autour de l'obstacle.

Autour d'un obstacle, il existe une relation étroite entre la présence de tourbillons et la géométrie des structures sédimentaires (Sengupta, 1966; Karcz, 1968; Allen, 1982, 1985). Cette relation s'exprime par le biais des paramètres hydrauliques de l'écoulement à l'approche de l'obstacle (Roper *et al.*, 1967; Shen *et al.*, 1969; Breusers *et al.*, 1977; Werner *et al.*, 1980; Raudkivi, 1986; Melville et Sutherland, 1988). Cependant, plusieurs questions demeurent en suspens quant à l'information dynamique et paléohydraulique que l'on peut tirer de l'ensemble morphologique autour des obstacles, surtout en ce qui concerne les écoulements en couche mince.

ÉTAT DES CONNAISSANCES ET PROBLÉMATIQUE

DYNAMIQUE DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR D'OBSTACLES

Un fluide en écoulement se déforme autour d'un obstacle et il est dominé par un ensemble de systèmes tourbillonnaires. Quatre systèmes ont été reconnus (Roper *et al.*, 1967; Raudkivi, 1986) : 1) l'écoulement vers le bas le long de l'obstacle; 2) les vortex de sillage/expulsion causés par la séparation du fluide sur les côtés de l'obstacle; 3) le vortex en «fer-à-cheval (*horseshoe vortex*) sur le fond produit par la séparation de l'écoulement devant l'obstacle; 4) la vague frontale dont la direction de rotation est en sens inverse de celle du vortex en «fer-à-cheval». Cette structure est liée à la convergence des lignes d'écoulement en un point précis et résulte

d'un champ de pression créé par la présence de points où la vitesse est nulle au contact de l'obstacle (Roper *et al.*, 1967; Shen *et al.*, 1969). Le gradient vertical de pression le long de l'obstacle provoque un mouvement vers le bas et vers l'aval où il se joint à l'écoulement principal. La convergence de l'écoulement principal et de l'écoulement secondaire en amont de l'obstacle est marquée par une séparation du fluide (où le cisaillement est nul), ce qui entraîne la formation de vortex. Ceux-ci se propagent et se dissipent vers l'aval avant de réintégrer l'écoulement principal. Puisque les points d'attache et de séparation sont localisés sur le lit en amont de l'obstacle, leur continuité en aval, sous forme de tourbillon tri-dimensionnel, permet le transfert longitudinal et vertical de la quantité de mouvement (Hunt *et al.*, 1978; Baker, 1979; Allen, 1982, 1985).

La structure et le déplacement des vortex sont fonction des variables hydrauliques de l'écoulement principal (Roper *et al.*, 1967; Breusers *et al.*, 1977; Hunt *et al.*, 1978; Raudkivi et Ettema, 1983; Lamb et Britter, 1984). Le nombre, la stabilité et l'intensité des vortex sont proportionnels au nombre de Reynolds de l'obstacle ($Re = k_s V_o / \mu$) et, pour un obstacle donné, à la vitesse du fluide (Roper *et al.*, 1967; Breusers *et al.*, 1977; Baker, 1979). Pour sa part, le diamètre de l'obstacle détermine le nombre de tourbillons observés devant l'obstacle. La description du pattern général de l'écoulement autour d'un obstacle a aussi mis en évidence l'influence de la rugosité relative (Y_o/k_s) et du nombre de Froude (Fr) sur la nature de la déformation et sur les directions de l'écoulement autour de l'obstacle. Ainsi l'ampleur de la perturbation en amont de l'obstacle décroît avec l'augmentation de Fr et de Y_o/k_s . Le nombre de Froude est important puisqu'il détermine la direction de l'écoulement à l'approche de l'obstacle, mais il n'intervient pas sur la complexité des structures causées par l'obstacle dans le fluide (Roper *et al.*, 1967; Raudkivi et Ettema, 1983; Lamb et Britter, 1984).

MORPHOLOGIE DU LIT AUTOUR D'UN OBSTACLE

La forme caractéristique dessinée sur un lit non cohésif autour de l'obstacle est celle d'un croissant allongé dans le sens de l'écoulement de part et d'autre de l'obstacle. Cette structure sédimentaire a été observée et rapportée à plusieurs reprises (voir Allen, 1982 pour une revue complète). Le modèle classique, d'abord proposé par Sengupta (1966), comprend, en amont, une zone d'affouillement rattachée à des creusets de chaque côté (*current crescent*) et, en aval, une zone d'accumulation (*sand shadow*). À faible débit, Komar (1983) a noté cependant la présence de corridors d'accumulation le long de la zone de sillage où se dissipent les vortex et que ces corridors demeurent distincts en aval. Ces formes tendent à disparaître lorsque le débit augmente.

Les caractéristiques des structures sédimentaires et principalement de la zone d'affouillement dépendent de différents facteurs. D'abord, la position et la profondeur du surcreusement ainsi que le nombre de zones de séparation à l'intérieur du fluide varient selon la forme et la taille de l'obstacle (Breusers *et al.*, 1977; Tobak et Peakes, 1982; Komar, 1983; Raudkivi et Ettema, 1983). Deuxièmement, les longueurs et la profondeur du surcreusement sont aussi fonction de la taille et du tri des grains qui composent le lit puisque ces deux fac-

teurs limitent la mise en mouvement des particules. Cet effet disparaît lorsque $Y_o/D_{50} > 50$ et que les sédiments sont bien triés (Breusers *et al.*, 1977; Raudkivi et Ettema, 1977). Enfin, la profondeur du surcreusement (D_s) est indépendante de la profondeur de l'écoulement (Y_o) lorsque la rugosité relative Y_o/k_s est supérieure à 1 ou 3. La profondeur du surcreusement est alors égale ou inférieure à l'épaisseur totale d'eau devant l'obstacle. Par contre, les variations de D_s sont toujours reliées à la vitesse de l'écoulement et au rapport de vitesse (V_o/V_c) qui détermine les conditions de transport des sédiments (Roper *et al.*, 1967; Karcz, 1968; Breusers *et al.*, 1977; Jain et Fisher, 1980; Allen, 1982; Raudkivi et Ettema 1983; Raudkivi, 1986). En l'absence de transport, D_s augmente avec V_o et atteint un maximum à V_c ; si le lit devient «actif» (présence de transport), alors D_s diminue avec V_o puis augmente et oscille fréquemment. Les oscillations sont dues à la migration des formes du lit ou au développement irrégulier des vortex.

Allen (1982) propose une relation entre la géométrie des structures sédimentaires autour d'obstacles, la nature du lit, la vitesse et la charge de l'écoulement (avec ou sans transport). La classification comprend sept formes différentes issues des combinaisons de croissant en saillie ou en dépression et de l'absence ou présence de traînées d'accumulation en aval de l'obstacle. Les formes de croissant en dépression (ou d'érosion) constituent quatre des sept variétés de structures sédimentaires retenues et semblent être les plus fréquentes et les plus faciles à préserver en milieu naturel. Leur intérêt sédimentologique est donc plus grand.

PARTICULARITÉS DES ÉCOULEMENTS EN COUCHE MINCE

Les expériences menées en laboratoire ou en cours d'eau naturel ont donc identifié Y_o/k_s , V_o , Re et Fr comme les variables clefs dans la dynamique, le transport des sédiments et la morphologie du lit autour d'un obstacle. Plusieurs études ont tenté d'établir empiriquement les relations qui jouent entre la forme du surcreusement et les différentes caractéristiques du fluide, de la surface du lit et de l'obstacle (Roper *et al.*, 1967; Shen *et al.*, 1969; Werner *et al.*, 1980; Allen, 1982; Jain et Fisher, 1980; Raudkivi et Ettema, 1983; Raudkivi, 1986; Melville et Sutherland, 1988). Parmi ces relations, on distingue celles proposées par Shen *et al.* (1969) : $D_s = 0,00073(Re)^{0,62}$ et par Jain et Fisher (1980) : $D_s/k_s = 1,86 (Y_o/k_s)^{0,5} (Fr-Fc)^{0,25}$ pour les écoulements à forte vitesse. L'association forme-écoulement doit cependant être vérifiée pour les écoulements de faible profondeur. Ceux-ci se définissent par la forte rugosité relative $Y_o/k_s \leq 1$. Ils possèdent donc un caractère distinct qui limite toute inférence à partir des résultats obtenus pour les écoulements en eau profonde.

En couche mince, la proximité des interfaces (lit-surface d'eau) modifie probablement l'expansion et la nature des tourbillons. De plus, la vague qui se développe en amont de l'obstacle devient une contrainte importante dans la dissipation latérale et verticale des tourbillons. Les interrelations anticipées entre les systèmes de surface et de fond supposent aussi une réaction complexe du transport. On prévoit qu'à faible profondeur et à petite vitesse l'arrangement du fluide et du déplacement de sédiments autour de l'obstacle ainsi que les conditions d'écoulement (V_o, Y_o, Fr, Re) pourront être déduites de la mor-

phologie créée autour de l'obstacle. En effet, le cisaillement exercé par le fluide autour de l'obstacle permet la mise en mouvement différentielle des particules, ce qui se traduit sur le lit par un assemblage de structures d'érosion et d'accumulation. Ainsi la complexité de la structure sédimentaire autour de l'obstacle pourrait refléter la présence de vortex multiples et d'un écoulement multidirectionnel à l'intérieur du fluide. Une telle complexité a été observée par Karcz (1968) et Allen (1982, 1985). Du point de vue sédimentologique, il s'avère important de comprendre l'effet des variables hydrauliques sur les caractéristiques des structures sédimentaires lorsque l'écoulement est en nappe mince.

MÉTHODES

La difficulté de créer un design expérimental adéquat pour l'analyse des écoulements en couche mince explique en partie la rareté des mesures quantitatives dans ce type de milieu. Les contraintes physiques et techniques inhérentes aux écoulements en couche mince ont donc guidé les conditions de simulation en laboratoire. L'uniformité de l'écoulement a été fixée comme critère fondamental, ce qui détermine les limites de profondeur (0,45 cm-1,41 cm) et de vitesse ($25 \text{ cm sec}^{-1} - 45 \text{ cm sec}^{-1}$).

Les expériences ont été effectuées dans un canal de 0,38 m de largeur et 9,0 m de longueur. Une surface de travail de 1,5 m de long, composée de sable moyen ($D_{50} = 0,56 \text{ mm}$) bien trié (0,40 mm-0,70 mm) se situait à 5,0 m en aval de la tête du canal. Avant chaque expérience la surface des sédiments était lissée pour assurer la similitude des conditions initiales. Un obstacle sphérique de 7,2 cm de diamètre a été à demi-enfoui dans les sédiments à 50 cm du début du segment de mesure. Puisqu'elle ne comporte pas d'arêtes, une sphère minimise les points de séparation de l'écoulement tout en simulant un obstacle ayant les caractéristiques de particules naturelles. Les installations ne permettaient pas la recirculation de l'eau ni des sédiments et la capacité de transport du fluide a par conséquent toujours été maximale en amont du segment de mesure. Cette contrainte réduisait la durée de l'expérience au temps nécessaire à l'établissement et au maintien d'une structure sédimentaire stable. Il s'agissait d'éviter une érosion trop rapide du lit, ce qui aurait oblitéré la forme.

Vingt expériences ont été menées. À chaque reprise, nous avons mesuré la vitesse de l'eau, le débit et la morphométrie du lit autour de l'obstacle. La vitesse moyenne a été obtenue à partir de cinq mesures de vitesse estimée par la progression d'un front de teinture fluorescente. Le déplacement uniforme de la teinture n'a pas justifié l'application d'un facteur de correction (Abrahams *et al.*, 1986). Les différentes mesures au cours d'une expérience ne variaient que de 2 à 3 cm s^{-1} . La profondeur du fluide a été calculée à l'aide de l'équation de continuité.

Après une évacuation lente de l'eau, les dimensions maximales (longueurs et profondeur) de la zone d'affouillement ont été mesurées avec une règle et une jauge ponctuelle. Puisque la sphère pouvait basculer légèrement lors du retrait de l'eau, une erreur maximale d'environ 15 % a été jugée possible. Les mesures de longueur frontale et latérale proviennent respectivement de 18 et 15 expériences plutôt que de 20.

Chaque expérience se distingue par une vitesse et un nombre de Froude différents. On a ainsi obtenu un éventail de nombres de Froude (0,8-1,6), de profondeur (0,45-1,4 cm) et de vitesses moyennes (25-45 cm sec⁻¹). Les limites inférieures et supérieures correspondent aux limites de stabilité de l'écoulement et de la structure sédimentaire que l'on pouvait recréer. La vitesse critique de mise en mouvement des particules correspond approximativement à 30 cm sec⁻¹.

Des techniques de visualisation en continu sur bande magnétoscopique et sur photos ont été mises à profit. Le déplacement de fines particules métalliques en surface et celui des grains de sable sur le fond ont permis de retracer la dynamique de l'écoulement autour de l'obstacle. Ces techniques offrent un complément avantageux, compte tenu des difficultés de mesure directe de l'écoulement, et permettent de relier la morphologie du lit observée à la dynamique autour de l'obstacle.

RÉSULTATS

À chaque expérience, le modelé du lit autour de l'obstacle correspond à la forme type observée dans les écoulements en eau profonde, mais il se révèle plus complexe. La variété des écoulements simulés nous a permis d'obtenir une grande diversité morphologique des structures sédimentaires entourant l'obstacle. Dans les études en eau profonde, la morphologie est décrite uniquement par la profondeur de surcreusement. Il apparaît cependant que la morphologie variable sur les côtés et en aval de l'obstacle soit aussi importante à considérer dans le cas des écoulements en couche mince.

MORPHOLOGIE DU SURCREUSEMENT AUTOUR DE L'OBSTACLE

La forme de la zone d'affouillement qui circonscrit l'obstacle n'est pas nécessairement symétrique dans toutes les conditions d'écoulement. En effet, la relation entre le rapport longueur latérale (L_L)/longueur frontale (L_f) du surcreusement et la vitesse (fig. 1) indique une légère disproportion de L_f par rapport à L_L lorsque la vitesse augmente. Cette asymétrie souligne probablement une diffusion réduite de la vague frontale vers l'amont lorsque la vitesse atteint et dépasse la vitesse critique.

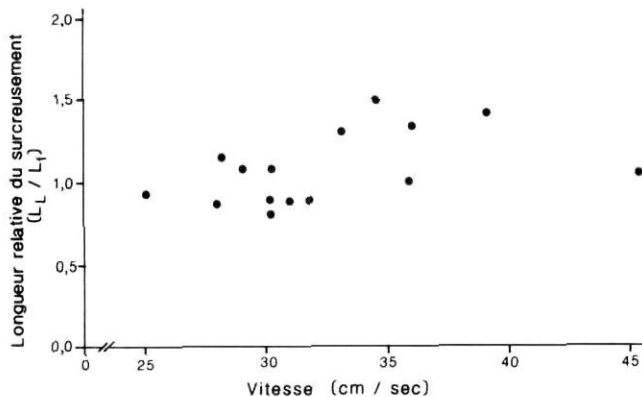


FIGURE 1. Relation entre la longueur relative de surcreusement et la vitesse de l'écoulement.

Relation between the relative length of the scour and flow velocity.

Rôle du nombre de Froude (Fr)

Les profondeurs de surcreusement mesurées varient fortement lorsque le nombre de Froude de l'écoulement se situe entre 0,8 et 1,2 (fig. 2). Au fur et à mesure que Fr augmente, la dispersion des points diminue et la moyenne des valeurs mesurées de D_s tend vers une constante (tabl. I). L'excentricité des points, particulièrement lorsque le nombre de Froude est faible, rend compte de la stabilité précaire du lit lorsque l'écoulement approche du seuil critique de transport de sédiments. À noter que, dans ces expériences, le seuil de mise en mouvement des particules du lit coïncide avec le passage d'un régime tranquille à torrentiel.

Les valeurs des longueurs frontales (L_f) et latérales (L_L) de surcreusement (fig. 3) et la dispersion des points tendent aussi à diminuer lorsque le nombre de Froude augmente. Ces relations traduisent la proximité des lignes de séparation lorsque Fr augmente, laquelle s'explique par le resserrement de la vague frontale autour de l'obstacle. Ceci a pour effet d'accroître le bombement de la vague autour de l'obstacle. Cette interprétation est confirmée par la relation entre l'amplitude verticale de la vague en fonction du nombre de Froude. La figure 4 montre que la hauteur relative de la vague (h_w/Y_o) augmente avec Fr et devient plus importante que l'épaisseur de la nappe d'eau ($h_w/Y_o > 1$).

Rôle de la rugosité relative (Y_o/k_s)

Les résultats obtenus pour les écoulements en couche mince s'opposent à ce que l'on a observé pour les écoulements

TABLEAU I

Moyennes (D_s) et écarts types (S) des profondeurs de surcreusement (cm) pour chaque groupe de Froude

Fr	D_s	S
0,82-0,91	2,71	0,67
1,14-1,22	2,13	0,47
1,32-1,67	2,19	0,30

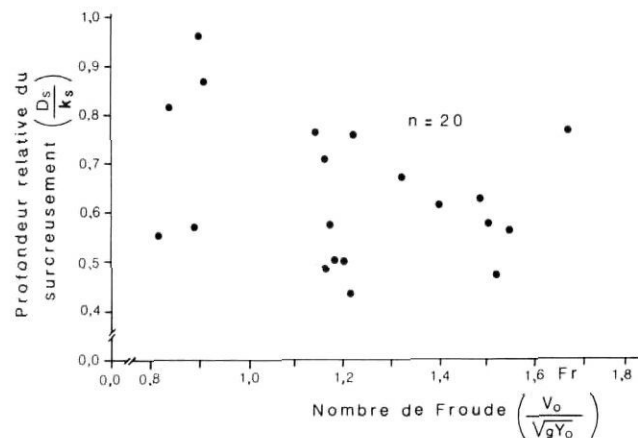


FIGURE 2. Relation entre la profondeur relative du surcreusement et le nombre de Froude.

Relation between scour depth and the Froude number.

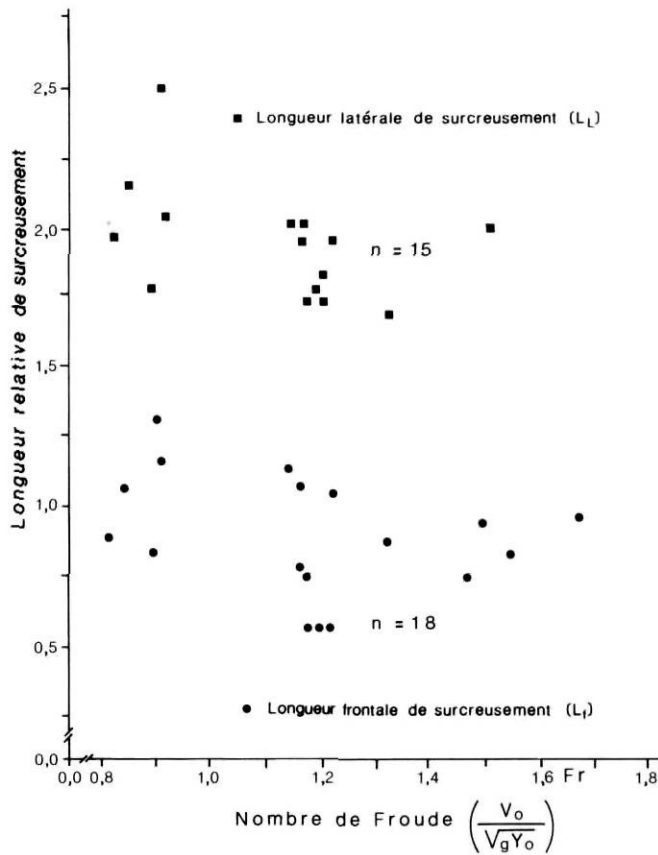


FIGURE 3. Relation entre la longueur frontale et longueur latérale de surcreusement et le nombre de Froude. Les longueurs sont relatives au diamètre de l'obstacle (k_s).

Relation between the frontal length and lateral length of the scour and the Froude number. Lengths are relative to obstacle diameter (k_s).

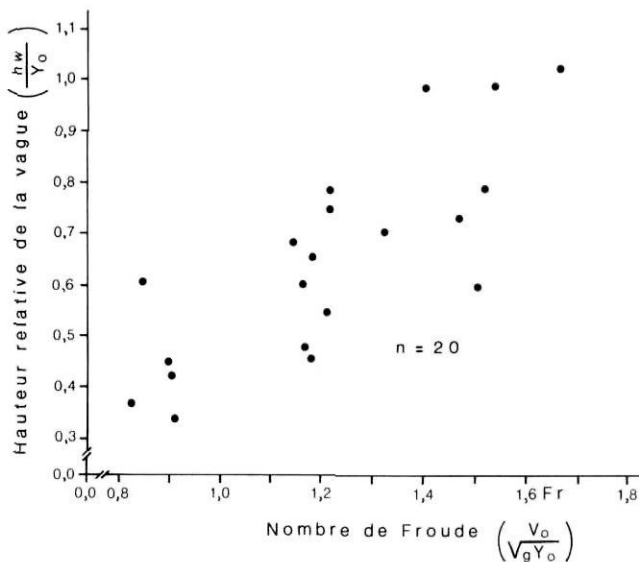


FIGURE 4. Relation entre la hauteur relative de la vague frontale et le nombre de Froude.

Relation between the relative height of the frontal wave and the Froude number.

en eau profonde à forte rugosité relative ($Y_o/k_s > 1$ ou 3). Dans ce dernier cas, D_s augmente avec Y_o/k_s sans jamais dépasser l'épaisseur totale d'eau en amont de l'obstacle (Breusers *et al.*, 1977). Par contre, dans nos expériences, les écoulements sont de très faible profondeur et Y_o/k_s varie entre 0,1 et 0,4. À la figure 5, on constate que la profondeur relative de surcreusement dépasse largement la profondeur relative de l'écoulement et qu'il n'y a pas de relation positive entre les deux variables. De fait, il se dégage une faible relation négative entre D_s et Y_o/k_s . Les trois points qui s'écartent du groupe, à $Y_o/k_s \approx 0,28$, correspondent à des expériences où la vitesse de l'écoulement est très près de la vitesse critique de mise en mouvement des particules du lit.

Le rôle de la rugosité relative sur la profondeur de surcreusement devient plus net lorsque cette dernière est pondérée par la hauteur de la vague frontale (D_s/h_w) (fig. 6). Cette relation montre que le transfert d'énergie se fait de plus en plus équitablement entre les sédiments et le fluide lorsque Y_o aug-

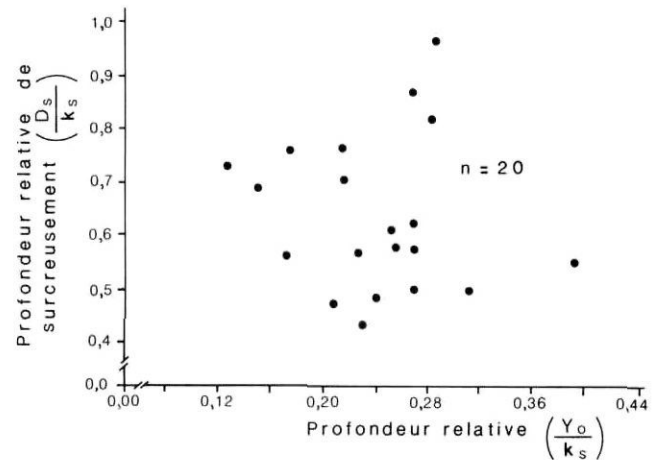


FIGURE 5. Relation entre la profondeur relative du surcreusement et la profondeur relative de l'écoulement.

Relation between the relative scour depth and the relative flow depth.

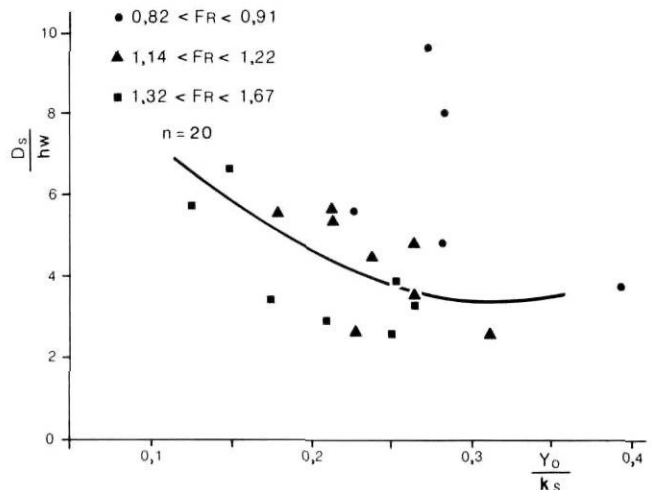


FIGURE 6. Relation entre le rapport profondeur d'écoulement et la hauteur de la vague (D_s/h_w) et la profondeur relative de l'écoulement.

Relation between relative scour depth (D_s/h_w) and the relative flow depth.

mente. Les écarts à la tendance, à $Y_o/k_s \approx 0,3$, ont été obtenus à des vitesses près de la vitesse critique de mise en mouvement.

Rôle de la vitesse

La relation entre D_s et la vitesse (fig. 7) montre une tendance similaire à celle observée dans le cas des écoulements en eau profonde (Shen *et al.*, 1969; Breusers *et al.*, 1977). Ainsi trois segments expriment une relation différente entre D_s et la vitesse ou le rapport de vitesse (V_o/V_c): 1) Lorsque la vitesse s'approche graduellement du seuil de mise en mouvement des particules ($V_o/V_c \approx 1$), D_s diminue. Ceci s'explique probablement par le fait que la capacité de transport du vortex en «fer-à-cheval», bien qu'élevée en l'absence de transport sur le lit, devient inférieure à celle de l'écoulement principal. À $V_o/V_c \approx 1$, les particules qui parviennent à la zone d'affouillement ne peuvent être entièrement évacuées et s'accumulent dans la partie surcreusée (entrée > sortie). L'étendue limitée des conditions simulées ne permet toutefois pas d'identifier nettement la continuité de cette relation lorsque la vitesse est très petite ($V_o < 25 \text{ cm sec}^{-1}$). 2) Lorsque V_o dépasse la vitesse critique ($V_o/V_c > 1$), D_s se stabilise. Dans cette tranche de vitesse, le vortex en fer-à-cheval augmente graduellement son intensité et sa capacité de transport, ce qui permet l'évacuation des sédiments provenant de l'amont tout en excluant la mise en mouvement de nouvelles particules. Il y aurait donc équilibre entre les quantités de sédiments qui arrivent et qui sortent de la partie surcreusée. 3) Lorsque la vitesse augmente ($V_o/V_c \gg 1$), D_s tend à augmenter légèrement. La capacité du vortex dépasse alors celle de l'écoulement principal et le vortex peut à la fois mettre les particules en mouvement dans la zone d'affouillement et expulser les sédiments provenant de l'amont. Une segmentation similaire est possible pour la relation entre les longueurs latérales et frontales de la zone d'affouillement et la vitesse.

En ce qui concerne le surcreusement autour de l'obstacle, ces résultats sont sans doute les plus révélateurs. Les variations des caractéristiques dimensionnelles de la zone d'affouillement s'expliquent par une variation de la vitesse et, proba-

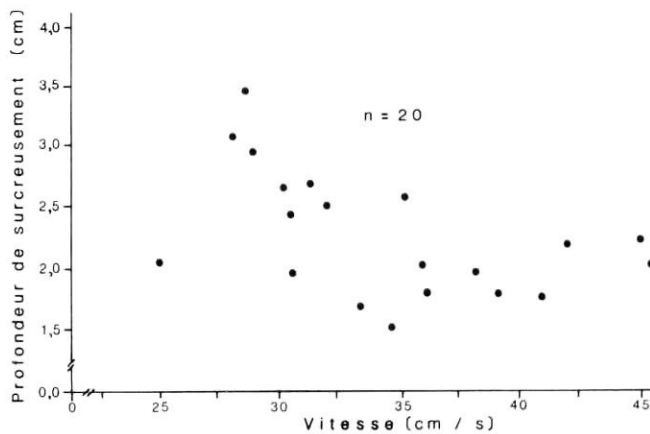


FIGURE 7. Relation entre la profondeur de surcreusement et la vitesse. La vitesse critique (V_c) est environ de 35 cm sec^{-1} .

Relation between scour depth and flow velocity. Critical velocity is approximately 35 cm sec^{-1} .

blement, du rapport d'activité entre les vortex et l'écoulement uniforme sur l'ensemble de la surface, l'activité du vortex étant en partie sous la dépendance de Y_o .

La dispersion des points observée ici dans la plupart des relations entre la morphologie du surcreusement et les paramètres hydrauliques diffère des relations nettes présentées dans les études conduites en eau profonde. Nonobstant les erreurs de manipulation, ce sont les caractéristiques et l'instabilité dynamique de l'écoulement qui sont responsables de ces faibles corrélations. Deux explications sont possibles. En premier lieu, la coïncidence entre les seuils de vitesse critique de mise en mouvement des grains du lit et le nombre de Froude critique (passage à un écoulement torrentiel, $Fr = 1$) pour la majorité des écoulements simulés. L'instabilité dynamique de l'écoulement qui résulte de ces conditions favorise une réponse variable de la capacité de transport devant l'obstacle. De faibles fluctuations autour des seuils critiques peuvent entraîner des changements morphologiques importants. D'ailleurs, la plus grande variabilité morphologique se produit le plus souvent aux passages de seuils (fig. 2 à 6). En conséquence, les conditions dynamiques et hydrauliques sont alors difficiles à déterminer uniquement à partir de la profondeur du surcreusement. En second lieu, les faibles variations de profondeur d'un écoulement en couche mince entraînent des changements dynamiques importants, ce qui joue un rôle sur l'extension verticale plus ou moins grande du vortex en fer-à-cheval et sur la diffusion d'énergie à l'intérieur des sédiments et du fluide.

MORPHOLOGIE DU LIT EN AVAL DE L'OBSTACLE

Dans les études menées en eau profonde, on trouve très peu de données sur la morphologie du lit en aval de l'obstacle. À l'arrière de l'obstacle, se situe une zone de vitesse réduite où les sédiments peuvent s'accumuler. Quelques études sédimentologiques (Karcz, 1968; Komar, 1976; Werner *et al.*, 1980; Allen, 1982) ont rapporté la présence de crêtes et de sillons en aval d'obstacles et ont souligné la variabilité morphologique de ces structures sédimentaires. La morphologie semble varier avec la vitesse de l'écoulement. Nos observations sur photographies précisent cette relation tout en illustrant la variation systématique de la morphologie en fonction des conditions hydrauliques d'écoulement en couche mince.

Dans la zone en aval de l'obstacle, l'augmentation de la vitesse (fig. 8a, 8d, 8e) se traduit par trois changements morphologiques. D'abord, on note une diminution de la longueur des formes et de la traînée centrale située immédiatement derrière l'obstacle. Ensuite, la position relative des sillons secondaires externes change. Ces sillons se rattachent au surcreusement sur le pourtour de l'obstacle. La forme évasée s'estompe et l'angle interne décrit entre les formes diminue lorsque la vitesse augmente. Enfin, la taille du creux principal près de l'obstacle s'accroît aux dépens des sillons secondaires qui tendent à disparaître. Il y a ainsi atténuation puis disparition des corridors latéraux d'accumulation et présumément de transport. En autant que l'on puisse qualifier la couche du fluide comme mince, les changements dans la profondeur de l'écoulement ne modifie pas de façon importante la disposition des structures sédimentaires (fig. 8a à 8c).

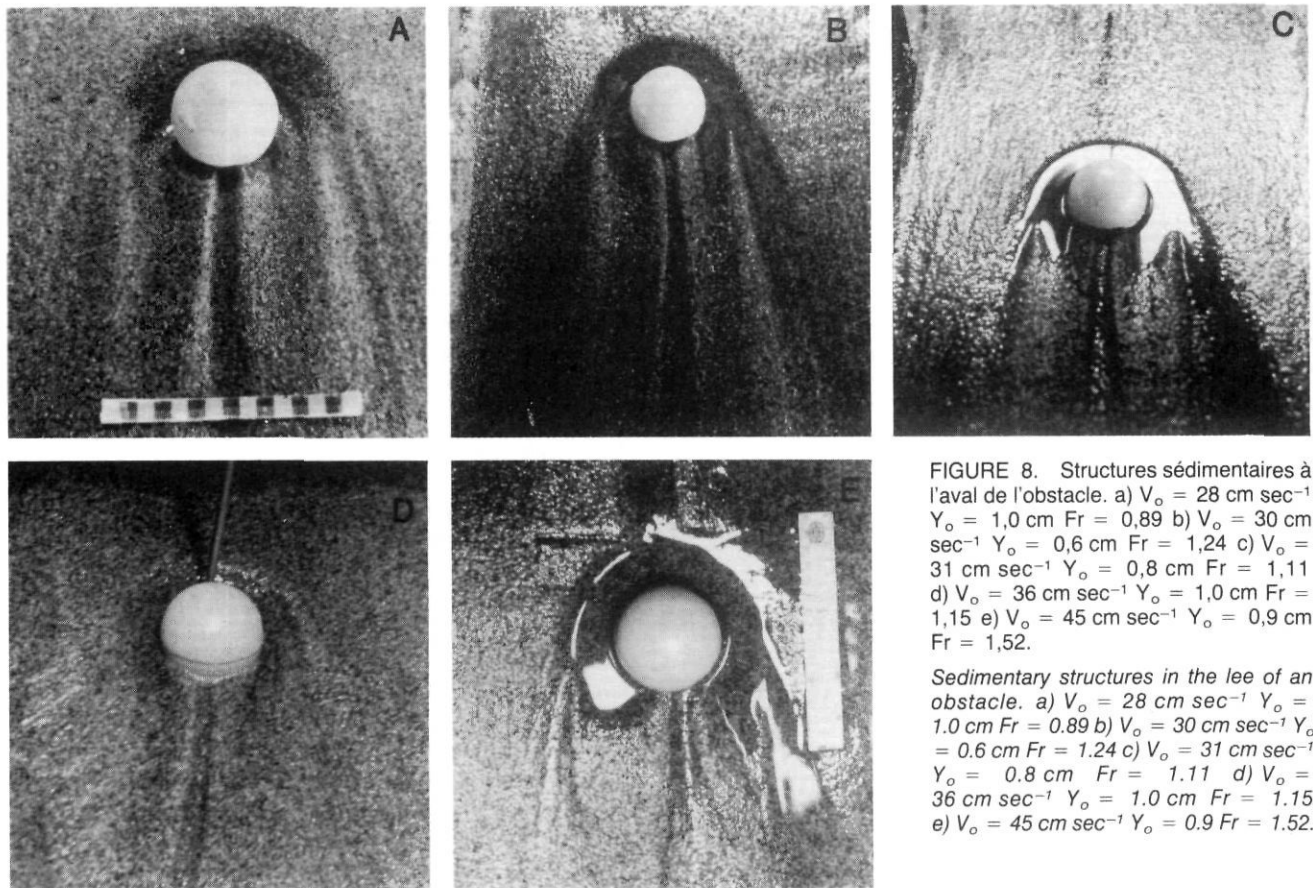


FIGURE 8. Structures sédimentaires à l'aval de l'obstacle. a) $V_o = 28 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 1,0 \text{ cm}$ $Fr = 0,89$ b) $V_o = 30 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0,6 \text{ cm}$ $Fr = 1,24$ c) $V_o = 31 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0,8 \text{ cm}$ $Fr = 1,11$ d) $V_o = 36 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 1,0 \text{ cm}$ $Fr = 1,15$ e) $V_o = 45 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0,9 \text{ cm}$ $Fr = 1,52$.

Sedimentary structures in the lee of an obstacle. a) $V_o = 28 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 1.0 \text{ cm}$ $Fr = 0.89$ b) $V_o = 30 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0.6 \text{ cm}$ $Fr = 1.24$ c) $V_o = 31 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0.8 \text{ cm}$ $Fr = 1.11$ d) $V_o = 36 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 1.0 \text{ cm}$ $Fr = 1.15$ e) $V_o = 45 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0.9 \text{ cm}$ $Fr = 1.52$.

La morphologie typique des écoulements en couche mince en aval d'un obstacle, soit une géométrie complexe de crêtes et de sillons, s'estompe lorsque la vitesse et, par conséquent, le nombre de Froude augmentent. Elle devient alors simple et analogue à ce que l'on observe en écoulement profond (Allen, 1982). Lorsque Y_o/k_s est faible, c'est la vitesse du fluide plutôt que la profondeur qui joue de façon critique au cours de cette transition morphologique. Les limites du surcreusement deviennent aussi plus nettes pour des vitesses élevées, particulièrement de chaque côté de l'obstacle.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les expériences menées dans différentes conditions d'écoulement unidirectionnel montrent une grande variabilité dans la morphologie des structures sédimentaires formées autour d'un obstacle. Cette variabilité peut être perçue dans les dimensions de la zone d'affouillement amont, mais surtout dans la zone en aval de l'obstacle. Cette dernière est caractérisée par la présence de sillons et de crêtes, qui sont respectivement des corridors de transport et d'accumulation plus ou moins bien définis. Ces corridors illustrent probablement l'activité de plusieurs vortex indépendants qui génèrent en alternance des zones de forte vitesse et des zones de vitesse réduite. Le passage d'une morphologie à l'autre est dicté principalement par la vitesse de l'écoulement et par l'arrangement des systèmes turbulents autour de l'obstacle. Lorsque la nappe d'eau est mince, les systèmes interagissent entre eux et

contribuent à la déformation du lit. Dans ces conditions, la pression exercée par la vague frontale en amont de l'obstacle sur la diffusion des systèmes turbulents ne peut être négligée.

Les trajectoires des particules flottantes à la surface de l'eau et des grains sur le lit, enregistrées sur bandes vidéoscopiques et photographies, illustrent le comportement de l'écoulement autour de l'obstacle. L'association de ces observations et des observations d'ordre morphologique permet de proposer deux modèles dynamiques. Ces modèles fournissent une hypothèse qui explique la formation des différentes structures sédimentaires à faible et à forte vitesses, pour des écoulements en couche mince.

À petite vitesse ($V_o < V_c$) (fig. 9a), une série de crêtes et sillons est inscrite de chaque côté de l'obstacle et s'ajoute aux deux crêtes centrales. L'observation visuelle de la surface de l'eau permet d'identifier le détachement d'un vortex secondaire lorsque le vortex en fer-à-cheval contourne l'obstacle et se détache de la vague. Cette dissociation donne naissance à deux zones de vitesse réduite situées entre la vague et le vortex secondaire et entre ce dernier et le vortex en fer-à-cheval. Il y a donc une succession de zones de vitesse réduite et de corridors de transport. Le déplacement des particules sur le lit autour de l'obstacle s'inscrit principalement dans le mouvement du vortex principal (en fer-à-cheval). Cependant, à faible vitesse, on voit aussi qu'une partie des sédiments dévie de la trajectoire principale près de l'obstacle pour circuler en bordure de la zone d'affouillement et être transportée par le vortex

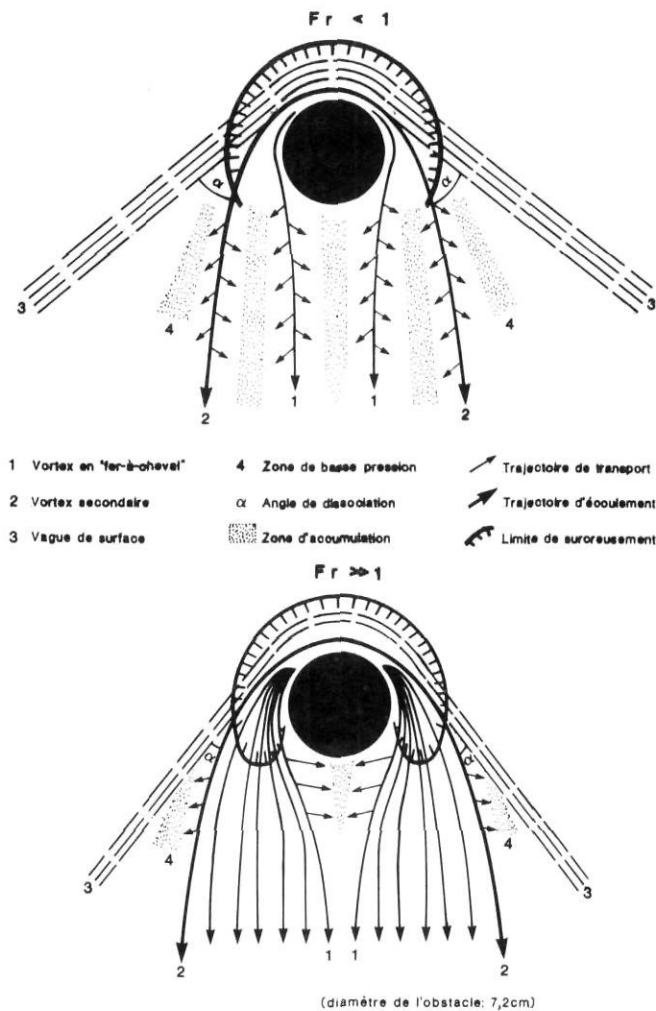


FIGURE 9. Diagrammes synthèses. a) $V_o = 28 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 1,0 \text{ cm}$ $Fr = 0,89$ b) $V_o = 45 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0,9 \text{ cm}$ $Fr = 1,52$.

Synthetic diagrams. a) $V_o = 28 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 1.0 \text{ cm}$ $Fr = 0.89$
 b) $V_o = 45 \text{ cm sec}^{-1}$ $Y_o = 0.9 \text{ cm}$ $Fr = 1.52$.

secondaire et relâchée dans la zone externe de vitesse réduite. L'angle de dissociation entre les systèmes de vortex détermine la présence et la localisation des zones externes d'accumulation et de transport. La figure 9a schématise la position relative des différents systèmes. Ce modèle se superpose à l'arrangement des structures sédimentaires à faible vitesse (fig. 8a).

À grande vitesse (fig. 9b), la forme est dominée par deux crêtes centrales et de larges sillons latéraux. Les zones externes d'accumulation sont pratiquement disparues. Ce pattern serait engendré par le resserrement graduel de la vague autour de l'obstacle lorsque la vitesse augmente. La dissociation entre la vague et le vortex principal est alors réduite et, par conséquent, il n'y a pas de détachement d'un vortex secondaire et la formation de zones externes d'accumulation est limitée. Ce resserrement entraîne donc la superposition des trois systèmes (vague, vortex en fer-à-cheval et vortex secondaire). Le mouvement des particules sur le fond a permis de constater que seulement une très faible proportion de celles-ci est dirigée

vers les zones externes à vitesse réduite. Ce mouvement est mal défini et très réduit. À grande vitesse, l'écoulement divisé en amont de l'obstacle se reconstitue rapidement derrière l'obstacle et circonscrit la zone centrale de vitesse réduite. Le modèle dynamique proposé à la figure 9b explique donc la géométrie simple des structures à vitesse élevée (fig. 8e).

La division systématique en deux modèles morphologiques et dynamiques élaborés en fonction de la vitesse permet de déterminer les conditions hydrauliques de formation à partir de la morphologie du lit en aval de l'obstacle. Par contre, la faible corrélation entre les paramètres hydrauliques et la profondeur du surcreusement amont fait de cette dernière un mauvais indicateur des conditions hydrauliques.

Les formes simples et complexes que nous avons observées en laboratoire s'apparentent à celles trouvées en milieu naturel par Allen (1982). Cependant, certains problèmes liés à une bonne correspondance avec le milieu naturel doivent être considérés. Ainsi, en milieu naturel, la direction de l'écoulement peut être multiple, par exemple sur les plages où il y a flux et reflux des vagues. De plus, dans ces milieux il y a une variation rapide de V_o et Y_o sur une courte distance. Finalement, la faible amplitude de certaines structures sédimentaires (particulièrement les structures externes) en aval de l'obstacle peut limiter leur préservation à cause du remplissage ou du remaniement de celles-ci par le vent ou l'eau. Ces facteurs peuvent compliquer la relation entre la forme et l'écoulement.

Les hypothèses émises méritent d'être vérifiées par d'autres études sur la morphologie et la dynamique de l'écoulement autour d'un obstacle en eau peu profonde et sur l'utilisation des modèles en milieu naturel. Par ailleurs, le potentiel d'utilisation de ces formes en sédimentologie, par exemple pour la reconstitution d'environnements sédimentaires, se révèle intéressant.

LISTE DES SYMBOLES

D_s :	profondeur maximale du surcreusement
D_{50} :	taille médiane des grains
Fr :	nombre de Froude
F_c :	nombre de Froude critique
h_w :	hauteur de la vague frontale
k_s :	taille de l'obstacle (diamètre)
L_f et L_L :	longueur frontale et latérale de surcreusement
Re :	nombre de Reynolds de l'obstacle
V_c :	vitesse critique pour la mise en mouvement des grains
V_o :	vitesse moyenne de l'écoulement
V_w :	vitesse de la vague
Y_o :	profondeur de l'écoulement
ν :	viscosité cinématique

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier André Robert pour son assistance en laboratoire. Nous exprimons aussi notre reconnaissance à René Kahawita et à l'École polytechnique de Montréal pour leur collaboration durant les expériences. L'appui financier du CRSNG a permis la réalisation de cette recherche. Nous

remercions aussi Michael Church et Michel Bouchard pour leurs commentaires sur une version antérieure de l'article.

RÉFÉRENCES

- Abrahams, A. D., Parsons A. J., Luk S.-H., 1986. Resistance to overland flow on desert hillslope. *Journal of Hydrology*, 88: 343-363.
- Allen, J. R. L., 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis. *Developments in Sedimentology*. Elsevier, Amsterdam, 663 p.
- 1985. Principles of physical sedimentology. G. Allen & Unwin, London-Boston, 272 p.
- Baker, C. J., 1979. The laminar horseshoe vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 95 (2): 347-367.
- Breusers, H. N. C., Nicollet G. N. et Shen, H. W., 1977. Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulics Research*, 15 (3): 211-252.
- Greeley, R. et Iversen, I. D., 1985. Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge Eng., New York, Cambridge University Press, 333 p.
- Hunt, J. C. R., Aball, C. J., Peterka, et Woo, H., 1978. Kinematic studies of the flow around free or surface mounted obstacle: applying topology to flow visualisation. *Journal of Fluid Mechanics*, 86 (1): 179-200.
- Jain, S. J. et Fischer, E. E. 1980. Scour around bridge piers at high flow velocities. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, 106 (HY11): 1827-1841.
- Karcz, I., 1968. Fluvial obstacle marks from the wadis of the Negev (Southern Israel). *Journal of Sedimentary Petrology*, 38(4): 1000-1012.
- Komar, P. D., 1976. Beach processes and sedimentation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 429 p.
- 1983. Shapes of streamlined islands on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum drag form. *Geology*, 11: 651-654.
- Lamb, V. R. et Britter, R. E., 1984. Shallow flow over an isolated obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 147: 291-313.
- Melville, B. W. et Sutherland, A. J., 1988. Design method for local scour at bridge piers. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (10): 1210-1226.
- Raudkivi, A. J. et Ettema, R., 1977. Effect of sediment gradation on clear water scour. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, 103 (HY10): 1209-1212.
- 1983. Clear water scour at cylindrical piers. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (3): 338-350.
- Raudkivi, A. J., 1986. Functional trends of scour at bridge piers. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 112 (1): 1-13.
- Roper, A. T., Schneider, V. R. et Shen, H. W., 1967. Analytical approach to local scour. *Proceedings of the 12th IAHR Congress*, Ft. Collins, 3: 151-161.
- Sengupta, S., 1966. Studies on orientation and imbrication of pebbles with respect to cross-stratification. *Journal of Sedimentary Petrology*, 36: 362-369.
- Shen, H. W., Schneider, V. R. et Karaki, S., 1969. Local scour around bridge piers. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, 95 (HY6): 1919-1940.
- Tobak, M. et Peakes, D. J., 1982. Topology of three dimensional separated flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 14: 61-85.
- Werner, F., Unsöld, G., Koopmann, B. et Stefanon, A., 1980. Field observation and flume experiments on the nature of comet marks. *Sedimentary Geology*, 26: 233-262.