

# ÉTUDE DE LA TURBULENCE AU-DESSUS D'UNE FOSSE D'AFFOUILLEMENT A L'AVAL D'UN SEUIL DE BARRAGE DÉVERSANT

PAR J.-N. BUTTÉ \* ET  
J. PICHON \*\*

## Introduction

Dans cette étude, nous avons utilisé directement les résultats des essais sur fond mobile à l'aval d'un seuil déversant de type Creager [13].

Des essais de longue durée (1 000 h) avaient été effectués, ce qui nous avait permis d'étudier le processus de l'affouillement et son évolution dans le temps. Nous avons ensuite reproduit certaines fosses d'affouillement en ciment et avons effectué une étude systématique des fluctuations de pressions statique et totale sur le fond.

Dans le cas présent, nous avons choisi un profil stabilisé (voir [13] essai de 1 000 h, n° 2). Le fond du canal de mesures a donc été modifié : nous y avons placé un seuil Creager d'une hauteur de 13 cm (charge nominale 10 cm), suivi d'un radier plan horizontal. La longueur de l'ensemble seuil Creager-radier plan est de 70,7 cm. Après le radier plan, nous avons placé une reproduction de la fosse d'affouillement stabilisée (essai n° 2).

Nous avons reproduit, au-dessus de cet ensemble fixe, les conditions hydrauliques exactes :

- débit  $Q = 33,4 \text{ l/s.m.}$ ;
- hauteur d'eau aval  $\Delta h_{av} = 15,7 \text{ cm}$ ;
- chute  $\Delta h = 4,4 \text{ cm}$ .

## Visualisation

La visualisation a été faite à l'aide de poudre d'aluminium injectée directement à l'aval du seuil, sur le radier plan horizontal.

\* Ingénieur ENSEEIHT. Attaché de recherche au Département de Génie civil de la Faculté des Sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Qué), Canada.

\*\* Ingénieur EIM. Docteur ès-sciences, SOGREAH, Grenoble.

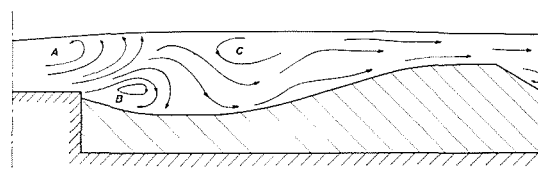
La figure 1 donne un schéma explicatif de l'écoulement sur la fosse d'affouillement.

Le tourbillon A n'est autre que le ressaut hydraulique. Nous constatons que son extrémité se situe légèrement à l'aval de l'extrémité du radier plan horizontal.

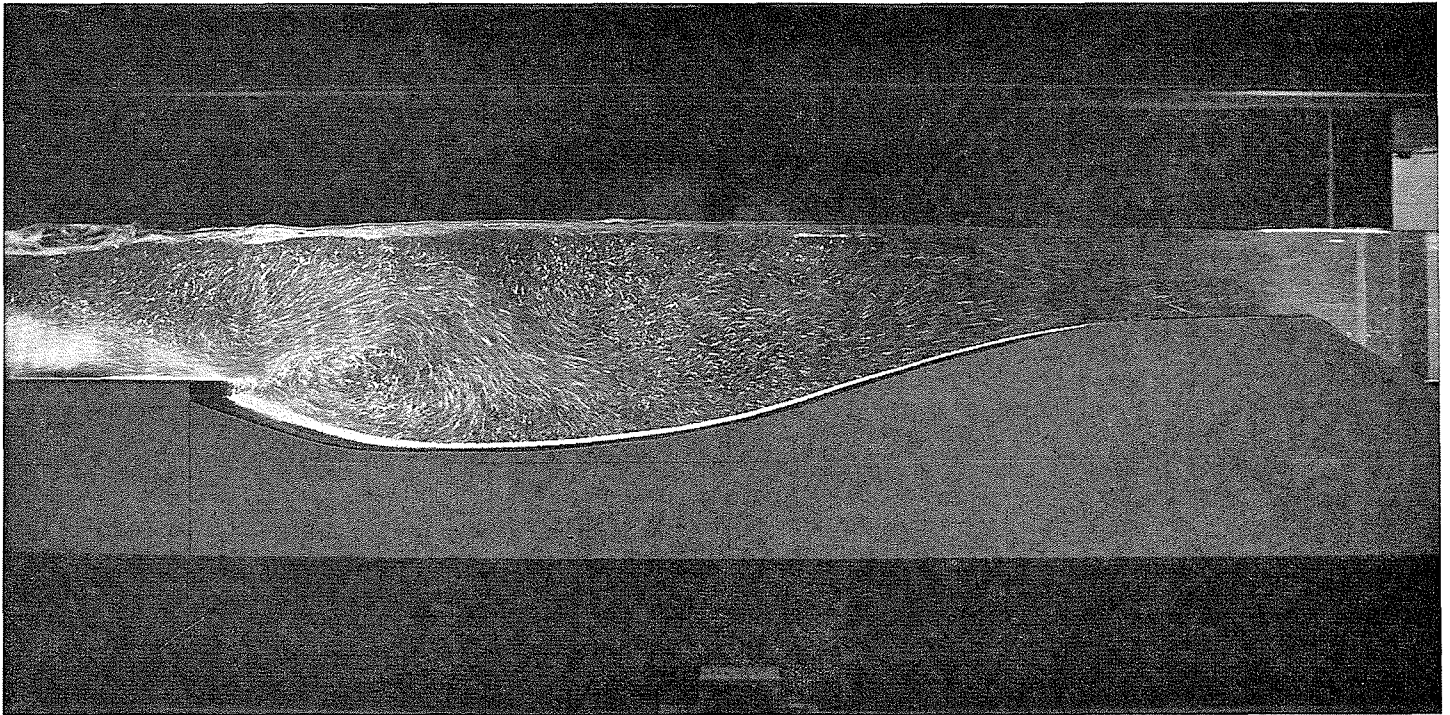
L'extrémité du radier plan constitue une singularité géométrique. Par suite du décrochement brusque, l'écoulement décolle. Mais, fait important que nous n'avons pas remarqué lors de l'étude sur fond mobile, la ligne de jet est aspirée vers le haut par le ressaut. Le point de recollement de cette ligne de jet se situe bien aux alentours du point le plus profond de la fosse. Le tourbillon B correspond à la zone « d'eau morte » sous la ligne de jet, zone de fluide ne participant pas apparemment à l'écoulement principal. En fait, entre les zones situées de part et d'autre de la ligne de jet, il y a non seulement échange de quantité de mouvement mais aussi de masse. L'écoulement au-dessus de la ligne de jet est fortement influencé par la structure de la zone « d'eau morte ».

Quant au tourbillon C, c'est un tourbillon instable, dépendant des battements de la ligne de jet qui se font encore sentir, comme dans le cas de la marche [16].

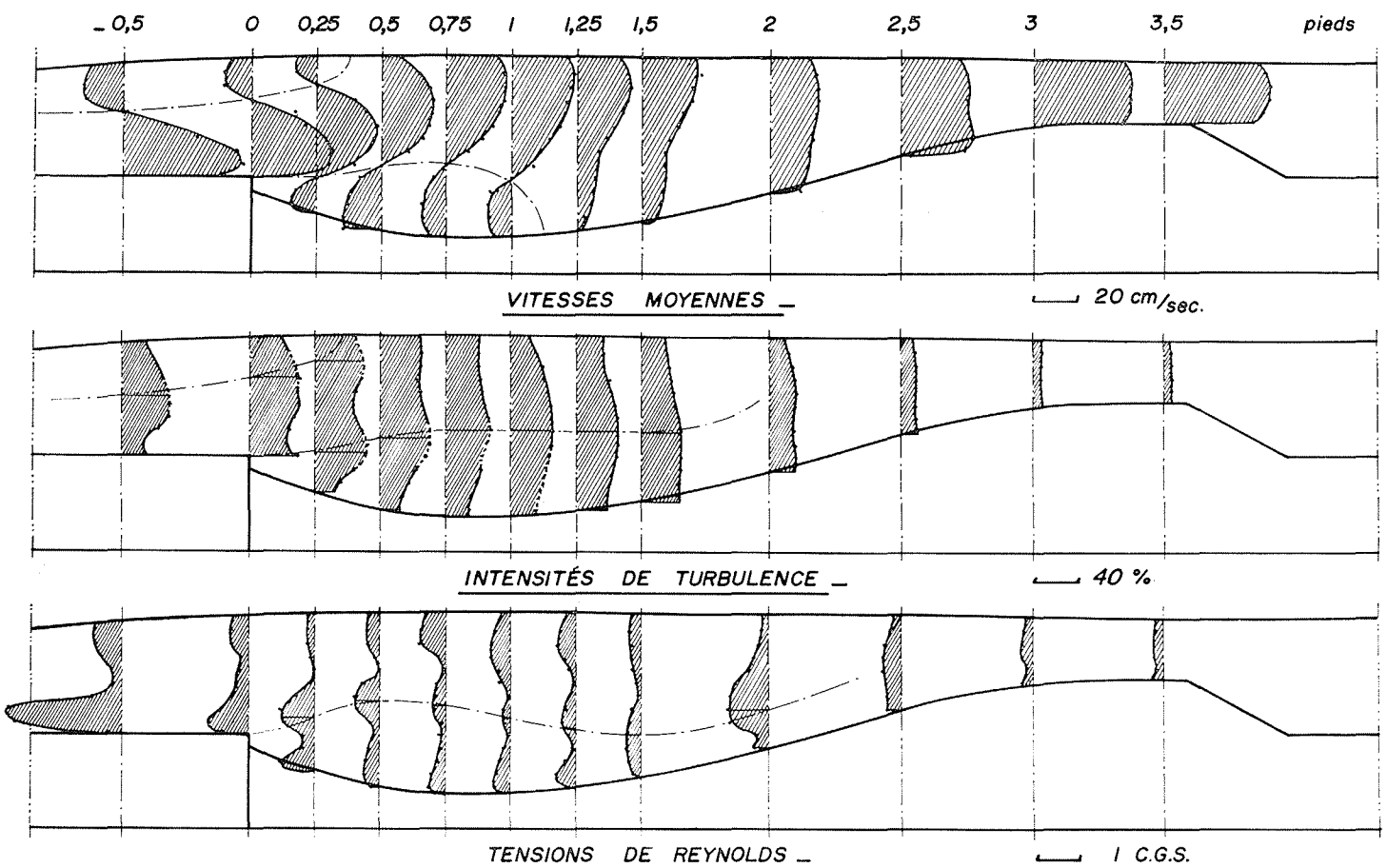
En comparant les lignes de jet dans le cas de la marche et dans le cas de la fosse d'affouillement, on ne peut qu'insister sur le rôle important que joue le ressaut. Comme



SCHEMA DE L'ECOULEMENT



Visualisation de l'écoulement sur une fosse d'affouillement;  $f = 1,2, 1/15$  s.



nous l'avions déjà remarqué [13], la position de l'extrémité aval du ressaut, par rapport à l'arête du radier plan horizontal, a une influence très grande sur la structure de l'écoulement.

## Détermination expérimentale des caractéristiques de la turbulence

REMARQUE. — Dans l'étude qui suit, les coordonnées des points de mesure sont données en unités anglaises : en pieds (1 pied = 30,48 cm). Nos échelles de mesure étant graduées dans cette unité, nous n'avons pas effectué de conversion, pour des raisons de simplicité.

### 1. Mesure des vitesses moyennes (fig. 2).

Nous avons effectué deux séries de mesures distinctes : l'une avec une sonde cylindrique verticale, l'autre avec une sonde dièdre parabolique. Les résultats concordent d'une manière satisfaisante.

On remarque l'existence de deux courants de retour. L'un est relatif au ressaut. L'autre se situe sous la ligne de jet.

Sur la figure 2, nous avons tracé les lignes de vitesse nulle. La ligne supérieure permet de localiser avec assez de précision l'extrémité aval du ressaut. Quant à la ligne inférieure, elle part de l'arête du radier plan, s'élève au-dessus du niveau 0 et rejoint le radier au point de recollement de la ligne de jet. Ce point de recollement se situe à peu près à l'abscisse 1,1. La profondeur de la fosse étant de 0,2 pied, on constate que le rapport : longueur de recollement / profondeur de fosse est égal à 5,5.

Dans les profils 1,25 et 1,5, on peut remarquer un phénomène de « rebondissement » de la ligne de jet : les courbes de vitesse présentent un brusque changement de pente au niveau 0,05.

### 2. Mesure des intensités de turbulence (fig. 2).

Les sondes utilisées sont les mêmes que dans le cas des vitesses moyennes. Là encore, les résultats concordent d'une manière satisfaisante.

Tout comme dans le cas de la marche [16], les lignes d'intensités maximales correspondent sensiblement aux lignes de vitesse nulle.

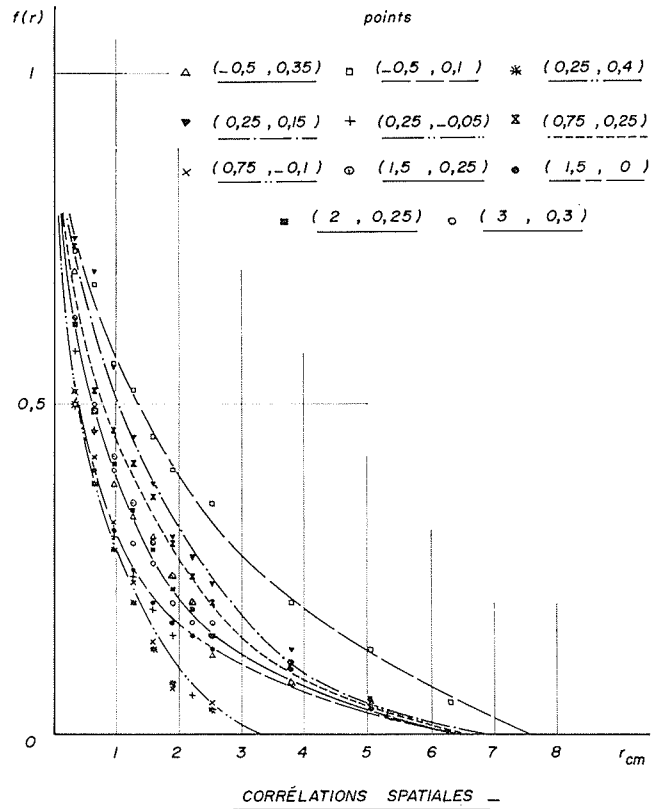
Après le radier plan, la ligne d'intensités maximales croît jusqu'au profil 0,75, tout comme la ligne de vitesse nulle. Puis, au lieu de décroître, elle se stabilise jusqu'au profil 1,5, à partir duquel elle croît de nouveau. Cette variation après le profil 0,75 est due au rebondissement de la ligne de jet.

### 3. Mesure des tensions de Reynolds (fig. 2).

La sonde utilisée pour ces mesures est une sonde en X. La mesure des tensions de Reynolds a été très délicate et perturbée par les battements de la ligne de jet.

Les amplitudes des tensions de Reynolds sont beaucoup plus faibles que dans le cas de la marche [16].

Dans le profil  $-0,5$ , on note la présence de deux maxima. Le maximum supérieur correspond au courant de retour du ressaut. Le maximum inférieur, très accentué, correspond au contact entre le ressaut et la veine fluide s'écoulant à grande vitesse sous le ressaut.



3/

L'allure de la courbe de tensions est identique dans le profil 0, mais les maxima sont déjà moins accentués.

Du profil 0,25 au profil 1,25, les courbes présentent trois maxima de cisaillement.

Les maxima inférieurs, situés à proximité du radier, expliquent le mouvement intense des grains de sable dans cette région, mouvement qui ne cesse pas après la stabilisation de la fosse d'affouillement.

Quant aux maxima supérieurs, ils sont vraisemblablement causés par le ressaut.

A l'aval du profil 1,25, les trois maxima se réduisent à deux (profil 1,5), puis à un, très marqué pour le profil 2 et allant en s'atténuant.

Tout près du radier, les tensions restent constantes et faibles. Dans cette partie aval de la fosse, il n'y a plus de transport solide.

### 4. Mesure des corrélations spatiales (fig. 3).

Pour effectuer ces mesures, nous avons utilisé deux sondes dièdres horizontales.

Malgré la complexité des mesures, nous avons étudié les corrélations spatiales en un plus grand nombre de points (11) que dans le cas de la marche [16].

La turbulence étant homogène, nous n'avons étudié que les corrélations longitudinales.

Un simple examen des positions relatives des courbes nous donne immédiatement une idée de la structure de l'écoulement aux différents points de mesure.

Les plus gros tourbillons se trouvent au point  $(-0,5, 0,1)$ . Dans le profil  $-0,5$ , lorsqu'on s'élève vers la surface libre, la taille des tourbillons diminue.

La taille des tourbillons diminue également, dans le ressaut, de l'amont vers l'aval.

Enfin, après l'extrémité du radier plan, la taille des tourbillons diminue, dans un même profil, lorsqu'on se rapproche du radier, et s'accroît de l'amont vers l'aval.

Ces courbes vont nous permettre de déterminer les échelles de turbulence.

5. Mesure des échelles de turbulence.

MACRO-ÉCHELLES.

L'intégration des courbes de corrélation spatiale nous donne la macro-échelle longitudinale  $\Lambda_f$  de la turbulence, soit la taille moyenne des plus gros tourbillons. Les résultats sont donnés dans le tableau.

POINTS	$ U_1 $ cm/s	$J_{sec}$	$\Lambda_f$ CALCULÉ cm	$\Lambda_f$ MESURÉ cm
(- 0,5, 0,35)	19	0,064	1,22	1,43
(- 0,5, 0,1)	50	0,037	1,90	2,1
(0,25, 0,4)	10	0,07	0,7	0,695
(0,25, 0,15)	27	0,106	2,8	1,61
(0,25, - 0,05)	9	0,095	0,85	0,8
(0,75, 0,25)	23	0,11	2,53	1,43
(0,75, - 0,1)	10	0,092	0,92	0,75
(1,5, 0,25)	19	0,115	2,18	1,27
(1,5, 0)	10	0,158	1,58	1
(2, 0,25)	21	0,083	1,75	1,25
(3, 0,3)	44	0,033	1,45	1,23

MICRO-ÉCHELLES.

La détermination des paraboles osculatrices d'équations :

$$f(r) \approx 1 - U^2 \frac{r^2}{2\lambda^2}$$

permet d'obtenir la micro-échelle  $\lambda$  de la turbulence, soit la taille moyenne des plus petits tourbillons.

Le tracé des paraboles osculatrices est délicat et risque d'être très imprécis.

Nous ne pouvons que localiser la micro-échelle entre 0,3 et 0,8 cm.

En conclusion, nous pouvons constater que les tourbillons sont plus gros que dans le cas de la marche [16].

6. Mesure de l'autocorrélation (fig. 4 et 5).

Nous avons utilisé une sonde dièdre parabolique.

Le processus de mesure est le même que dans le cas de la marche [16].

L'intégration des courbes d'autocorrélation donne la macro-échelle d'autocorrélation  $J$  de la turbulence.

La relation de Taylor :

$$\Lambda_f = \bar{U} J$$

nous permet de retrouver par le calcul la macro-échelle longitudinale  $\Lambda_f$  (tableau).

La correspondance est bonne, excellente parfois, sauf pour les points (0,25, 0,15), (0,75, 0,25), (1,5, 0,25), (1,5, 0), pour lesquels l'ordre de grandeur est toutefois respecté.

Ces mesures nous permettent de confirmer la structure de l'écoulement, telle qu'établie dans le paragraphe 4.

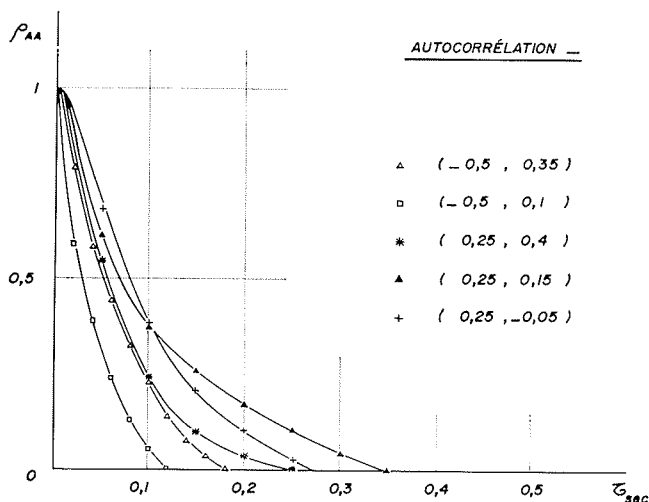
7. Mesure des corrélations spatio-temporelles (fig. 6).

De même que pour la mesure des corrélations spatiales, nous avons utilisé deux sondes dièdres horizontales.

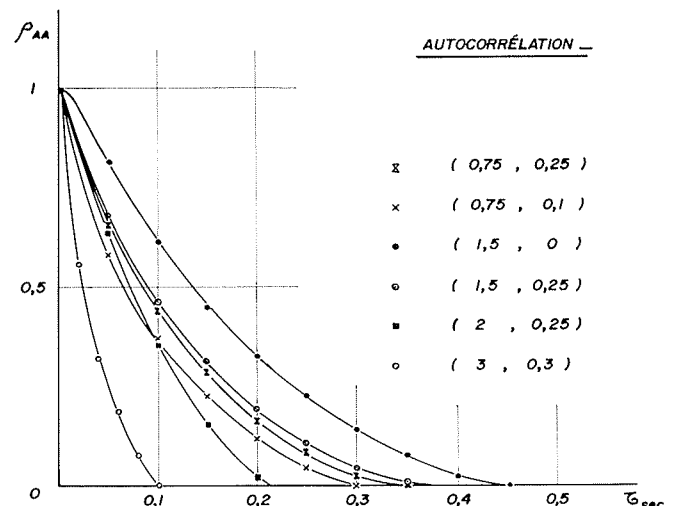
Les maxima des courbes de corrélation sont très bien marqués, ce qui nous permet de déterminer avec précision le temps  $t$  de corrélation maximale.

On retrouve, avec une assez bonne précision, la vitesse moyenne de l'écoulement en chaque point de mesure.

On peut remarquer que, pour le point (3, 0,3), les maxima de corrélation décroissent peu : les tourbillons se déplacent, sans se détériorer, dans un écoulement peu turbulent.



4/



5/

8. Mesure des spectres d'énergie (fig. 7).

Pour effectuer ces mesures, nous avons utilisé une sonde conique, la même que dans le cas de la marche, ce qui va nous permettre de comparer les énergies.

Ici encore, nous ne nous trouvons pas dans la zone de Kolmogoroff, car le nombre de Reynolds de la turbulence  $R_\lambda$  est bien inférieur à 500. Nous retrouvons la pente  $-1$ , déjà trouvée pour la marche.

L'énergie des tourbillons est bien plus faible que dans le cas de la marche (environ dix fois moins).

La figure 7 est particulièrement intéressante : elle donne les spectres d'énergie en des points de mesure situés à proximité de la fosse.

Lors de l'étude des fluctuations de pression à la surface d'une fosse d'affouillement [13], nous avons partagé la zone affouillée en trois régions :

a) A l'amont du point de recollement R, sous la ligne de jet : les amplitudes des fluctuations de pression statique sont grandes. Les grains de sable sont littéralement aspirés vers le haut. Puis, le courant s'en empare, les fait tourbillonner et les ramène sensiblement à leur point de départ. Cette zone se stabilise très rapidement, sans que le mouvement du sable s'atténue.

b) A l'aval du point de recollement R, jusqu'à l'extrémité aval de la fosse : les amplitudes des fluctuations de pression sont pratiquement constantes. Elles sont susceptibles d'ébranler le grain dans son alvéole. Le grain étant ébranlé, son coefficient de « résistance au mouvement » diminue. Ce coefficient intervient dans la détermination de la vitesse critique  $V_c$  d'entraînement du grain  $-V_c$  diminue. Si la vitesse de l'eau, au-dessus du grain de sable, est supérieure à  $V_c$ , le grain est entraîné. Il part en roulant sur le fond.

Si la vitesse de l'eau est supérieure à  $V_c$ , le grain ne bouge pas. Lorsque nous observons de près le mouvement de sable à l'aval du point R, nous voyons de temps à autre un grain de sable se mettre à osciller sans quitter sa position. Puis, d'un seul coup, il quitte son alvéole et part en roulant.

c) A l'aval de la fosse d'affouillement : s'il y a bourrelet, mais que l'écoulement à l'aval ait une vitesse toujours supérieure à la vitesse critique d'entraînement du matériau  $V_c$ , le bourrelet sera éliminé et l'affouillement ne sera pas limité dans le temps. Sur le bourrelet, les amplitudes des

fluctuations de pression croissent. Les grains sont ébranlés, ils partent en roulant.

S'il y a un bourrelet, mais que l'écoulement à l'aval ait une vitesse toujours inférieure à la vitesse critique d'entraînement du matériau  $V_c$ , le bourrelet se stabilisera au bout d'un certain temps et l'affouillement sera limité. Sur le bourrelet, les amplitudes des fluctuations de pression sont constantes.

L'examen de la figure 7 nous montre que, pour une taille de tourbillon donnée, la variation de l'énergie est la même que celle des fluctuations de pression. L'énergie est forte jusqu'au profil 1,5. Puis elle décroît rapidement sur la partie aval de la fosse et sur le bourrelet.

Ces considérations énergétiques coïncident bien avec l'existence de deux mouvements du sable très différents sur les parties amont et aval de la fosse d'affouillement.

Conclusions

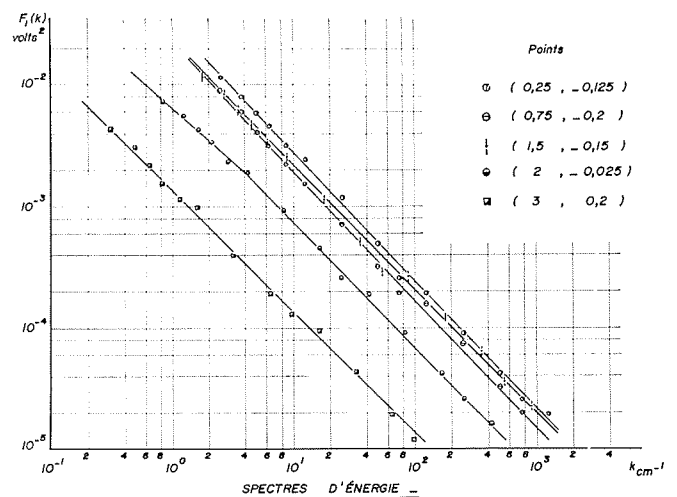
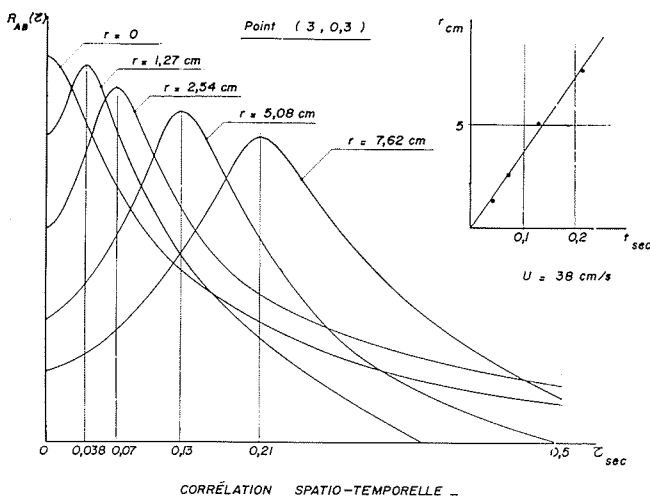
Cette étude présente deux aspects intéressants :

a) d'une part, elle permet une comparaison entre l'écoulement au-dessus d'une singularité en forme de marche et l'écoulement au-dessus d'une fosse d'affouillement située après un ensemble fixe constitué par un seuil déversant et un radier plan horizontal;

b) d'autre part, elle permet de relier l'étude sur fond mobile à la structure turbulente de l'écoulement au-dessus de ce fond mobile.

Bien que les débits soient à peu près identiques pour la marche et la fosse d'affouillement, la présence d'un seuil déversant modifie considérablement l'écoulement. Il y a génération d'un ressaut qui déborde le radier plan horizontal. Le ressaut agit sur la ligne de jet qu'il aspire vers le haut. Les tourbillons sont plus gros dans le cas de la fosse mais ils sont porteurs de moins d'énergie que dans le cas de la marche. Les répartitions des macro-échelles sont sensiblement identiques dans les deux cas : la taille des tourbillons varie dans un même profil, dans le même sens que l'ordonnée du point de mesure et, sur une même horizontale, dans le même sens que l'abscisse.

Enfin, cette étude précise le processus de l'affouillement après le seuil déversant et confirme les résultats de l'étude



des fluctuations de pression à la surface de la fosse. La visualisation et la détermination exacte de l'écoulement turbulent permettent de mieux expliquer les causes du transport solide. L'examen particulier des spectres d'énergie met en valeur la corrélation des actions dynamiques des fluctuations de pression et des tourbillons au niveau du fond.

### Bibliographie

- [1] G. COMTE-BELLOT. — Ecoulement turbulent entre deux parois parallèles. *Publi. Scien. et tech. du ministère de l'Air*, n° 419.
- [2] R. DUMAS. — Contribution à l'étude des spectres de turbulence. *Publi. Scien. et tech. du ministère de l'Air*, n° 404.
- [3] J. GAVIGLIO. — Sur quelques problèmes de mesures de turbulence effectuées à l'aide de l'anémomètre à fils chauds parcourus par un courant d'intensité constante. *Publi. Scien. et tech. du ministère de l'Air*, n° 385.
- [4] A.G. FABULA. — An experimental study of grid turbulence in dilute high polymer solutions. *Pennsylvania State University*, U.S.A., 1966.
- [5] BLACKMAN and TUKEY. — The measurement of power spectra. Ed. Dover.
- [6] SUN-CHING-LING. — Measurement of flow characteristics by the hot film technique. Thèse (University of Iowa, U.S.A.), 1955.
- [7] S. RAUL and McQUIVEY. — Turbulence in a hydrodynamically rough and smooth open-channel flow. Thèse (Colorado State University, U.S.A.), 1967.
- [8] F. RAICHLIN. — Some turbulence measurements in water. *J. of the Engin. Mech. Division, A.S.C.E.*, avril 1967.
- [9] M. BOUVARD et H. DUMAS. — Application de la méthode du fil chaud à la mesure de la turbulence dans l'eau. *La Houille Blanche*, n° 3-1967 et n° 7-1967.
- [10] J. LAUFER. — Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel. *Rapport NACA 1053*.
- [11] J.W. DELLEUR. — Flow direction measurement by hot-wire anemometry. *J. of the Eng. Mech. Division, A.S.C.E.*, août 1967.
- [12] H. ROUSE. — Répartition de l'énergie dans des zones de décollement. *La Houille Blanche*, n° 3, mai 1960.
- [13] J. PICHON. — Contribution à l'étude des affouillements à l'aval d'un seuil déversant. Thèse (Toulouse), 1967.
- [14] J. PICHON. — Etude des affouillements à l'aval d'un seuil déversant. Congrès de l'ACFAS. Sherbrooke, Canada, novembre 1967.
- [15] J. PICHON. — Détermination théorique et visualisation de la ligne de jet d'un écoulement plan à surface libre sur une singularité en forme de marche. *La Houille Blanche*, n° 7-1969.
- [16] J. PICHON et J.-N. BUTTÉ. — Etude de la turbulence dans un écoulement à surface libre, au-dessus d'une singularité en forme de marche. *La Houille Blanche*, n° 4-1970.

