LE RESSAUT HYDRAULIQUE : MESURES DE TURBULENCE DANS LA RÉGION DIPHASIQUE

par F. J. RESCH

Post-Doctorate Fellow,
Department of Mechanical Engineering,
University of Toronto (Canada)

et H. J. LEUTHEUSSER

Professor, Department of Mechanical Engineering,
University of Toronto (Canada)

1. — Introduction

Les recherches entreprises ces dernières années dans les laboratoires de mécanique des fluides du département de « Mechanical Engineering » de l'Université de Toronto (Canada) ont eu pour objet, entre autre, l'analyse des mesures de turbulence dans des écoulements liquides. Le choix d'un phénomène hydraulique important, à savoir le ressaut hydraulique, permettait de réunir plusieurs conditions particulièrement intéressantes; notamment : un écoulement d'eau en canal ouvert; un écoulement dans un état supercritique ($F > 1$) et subcritique ($F < 1$), F représentant le nombre de Froude de l'écoulement; enfin un écoulement double-phase dû au fort entraînement d'air dans le rouleau du ressaut. Par ailleurs ce choix permettait d'apporter une contribution à un phénomène naturel bien connu et très souvent utilisé en pratique, mais encore peu compris.

Dans leur étude du ressaut hydraulique, Leutheusser et Kartha [4] ont montré de façon évidente que les conditions de l'écoulement amont (écoulement pleinement développé ou à potentiel, voir fig. 1) avaient une influence très marquée sur les caractéristiques de l'écoulement turbulent moyen du ressaut. Par la suite une première étude des quantités aléatoires a permis de déterminer les intensités de turbulence en amont et en aval — dans la partie désaérée — du rouleau du ressaut. Ces résultats ont été rapportés dans une précédente publication [8] dont la présente étude constitue essentiellement la continuation. On s'efforcera donc, pour plus de clarté, d'employer les mêmes

notations et l'on considérera comme acquis certains développements théoriques et méthodes expérimentales alors exposés en détails. On a également choisi des ressauts avec des conditions d'écoulement amont identiques, soit pleinement développé ou à potentiel, et avec des nombres de Froude identiques, soit $F_1 = 2,85$ et $F_1 = 6,00$ où $F_1 = U_1 / \sqrt{gd_1}$ représente le nombre de Froude de l'écoulement amont basé sur la vitesse moyenne de débit U_1 et la hauteur de l'écoulement d_1 (voir fig. 2 et 3) et g est l'accélération de la pesanteur. Les résultats présentés ici concernent principalement le rouleau du ressaut hydraulique : détermination des profils de vitesse moyenne, des intensités et turbulence et des taux de vide.

1/ Schéma des différentes conditions de l'écoulement amont du ressaut hydraulique.

Definition of inflow conditions into jump.

Au cours de l'étude précédente [8] on n'a pu observer les distributions des diverses grandeurs qu'à l'aval du rouleau, ou plus précisément à une distance de l'origine du ressaut supérieure à dix fois la hauteur subcritique d_2 (voir fig. 2 et 3). Il était donc normal d'essayer d'obtenir par la suite les distributions de ces mêmes grandeurs dans le rouleau lui-même qui constitue la région la plus importante du ressaut et où la plus grande partie de l'énergie est créée et dissipée [9]. Mais la présence de bulles d'air dans cette région de l'écoulement ne permettait plus d'effectuer les mesures comme auparavant. Il a ainsi paru nécessaire d'utiliser une autre méthode que celle employée précédemment et qui comprenait une chaîne anémométrique complète. En effet, la réponse d'un film chaud n'étant pas la même dans un écoulement d'eau et un écoulement d'air, il devenait impossible de procéder à des lectures quelconques sur des appareils de type analogique. On s'est alors orienté vers une méthode digitale permettant d'analyser le signal aléatoire après enregistrement de celui-ci sur bandes magnétiques. On peut ainsi, par la composition d'un programme approprié qui traite l'ensemble des valeurs digitalisées, séparer l'écoulement d'air (bulles) de l'écoulement liquide. Cette méthode de mesure étant nouvelle, il a paru important de couvrir également la région qui avait été étudiée dans la précédente publication [8]; ceci permettant de comparer les résultats obtenus. Enfin on proposera une nouvelle présentation des résultats, à la fois plus explicite et mieux appropriée au problème à étudier.

2. — Le rouleau du ressaut hydraulique

Rappelons tout d'abord que le ressaut hydraulique est caractérisé par le passage brusque d'un écoulement supercritique à un écoulement subcritique; ce passage étant accompagné d'une création de turbulence et d'une perte d'énergie considérables, voir par exemple [3].

Pour des raisons évidentes il est important de savoir à quelle distance de son origine — spatialement bien définie — cette transformation s'achève. Bien que ce processus soit théoriquement asymptotique, c'est-à-dire qu'il se prolonge indéfiniment à l'aval du ressaut, on peut penser qu'après une certaine distance les changements deviennent insignifiants. Conventionnellement cette distance est prise égale à $L_j \approx 6 d_2$, L_j longueur du ressaut (fig. 3). C'est sur cette distance que Rouse et al. [9] ont effectué leurs mesures devenues maintenant classiques. Mais si, comme on l'a suggéré [4, 8], on définit la longueur du ressaut L_j comme la distance longitudinale entre le point où commence la discontinuité de l'écoulement supercritique et le point — dans la partie subcritique du ressaut — où les conditions de l'écoulement sont de nouveau essentiellement définies par les caractéristiques du canal, alors la longueur effective du ressaut est nettement supérieure à la valeur ci-dessus mentionnée. L'étude précédente [8] avait montré, par exemple, que ces longueurs pouvaient atteindre 20 à 25 fois la valeur de la hauteur subcritique d_2 , notamment lorsque l'écoulement amont est pleinement développé. Il semble néanmoins évident qu'une part importante — si ce n'est la plus importante — de la production de turbulence et de perte d'énergie se produit sur une longueur inférieure à $10 d_2$, d'où l'importance et le rôle du rouleau dans ce processus. D'autre part le rouleau étant aussi le siège d'un fort entraînement d'air, il

semble intéressant d'évaluer la quantité d'air présent aux différents points de l'écoulement.

L'étude [8] avait montré les distributions des vitesses moyennes et des intensités de turbulence aux sections transversales P 0 à l'amont du ressaut et P 10, P 15, P 20 à l'aval (P 0 étant situé au début du ressaut; P 10, P 15... indiquant des sections situées à $x = 10 d_2$, $x = 15 d_2$ ... de P 0). Les présents résultats montrent donc les distributions de ces mêmes grandeurs aux sections P 2, P 5 et P 7 dans le rouleau, ainsi qu'aux sections ci-dessus mentionnées P 0, P 10, P 15 et P 20.

3. — Méthodes de mesure

3.1 Choix de la méthode.

On sait que l'anémomètre à fil ou film chaud est, pour l'instant, l'instrument le plus employé et le mieux adapté aux mesures de turbulence dans des écoulements gazeux ou liquides. On a donc tout naturellement adopté la méthode anémométrique à film chaud pour déterminer les caractéristiques turbulentes du ressaut hydraulique (pour plus de détails concernant l'utilisation du film chaud on se référera à [7] et [8]). Il n'est malheureusement pas possible, dans un écoulement diphasique, de se servir des sondes à films chauds avec les appareils de mesure électroniques classiques: voltmètre, voltmètre RMS, corrélateurs... En effet, le signal turbulent enregistré a la forme indiquée sur la figure 4 où l'on remarque une chute de tension aux bornes du film chaud lorsque celui-ci se trouve dans une bulle d'air. Les aiguilles de lecture des différents appareils balayent alors les échelles des cadrans sans qu'il soit possible de séparer les valeurs obtenues dans l'air de celles obtenues dans l'eau. Qualitativement on peut séparer les deux phases en photographiant le signal obtenu sur papier sensible (voir fig. 4), mais cela ne donne pas pour autant des valeurs quantitatives précises. On s'est donc orienté vers une méthode digitale.

3.2 Application de la méthode digitale au signal interrompu par les bulles d'air.

3.2.1 PRINCIPE.

Si l'on considère le signal schématiquement représenté sur la figure 5 a, on peut très bien visuellement séparer l'écoulement dans la phase liquide de l'écoulement dans la phase gazeuse. Si l'on digitalise ce même signal (fig. 5 b) et enregistre les valeurs digitalisées sur bandes magnétiques, on peut, par un programme approprié, « demander » à un ordinateur d'exécuter un travail comparable à celui effectué par l'œil humain sur le signal continu. Une méthode consisterait à fixer un seuil minimum pour le voltage au-dessous duquel on peut affirmer que la sonde se trouve dans une bulle d'air; ceci implique que le niveau de turbulence dans la phase liquide soit raisonnablement faible, ce qui n'est pas le cas dans le rouleau du ressaut où le signal turbulent a une forme voisine de celle montrée schématiquement sur la figure 6. Dans ce cas, on peut encore très bien discerner visuellement l'apparition d'une bulle d'air en considérant la distance entre un maximum et un minimum successifs (et vice versa). Il suffit alors de fixer une valeur optimale « l » de cette distance au-delà de laquelle on sait que la sonde se trouve dans une bulle d'air. C'est ce critère qui s'est avéré être le plus précis. La seule faiblesse de cette méthode résiderait dans l'impossibilité de détecter une bulle dont la taille est si petite (par exemple

2/

2/ Schéma du ressaut hydraulique.

Definition diagram of hydraulic jump.

3/ Notations.

Freebody diagram of jump proper.

4/ Enregistrement du signal turbulent dans le rouleau du ressaut.

Record of turbulence signal in hydraulic jump.

5/ Signal turbulent diphasique: a) signal continu, b) signal digitalisé. Faible intensité de turbulence; application d'un seuil pour détecter les bulles d'air.

Turbulence signal in two-phase flow: a) continuous signal, b) digitized signal. Low turbulence intensity; application of a threshold for the detection of air bubbles.

6/ Signal turbulent diphasique: a) signal continu, b) signal digitalisé. Forte intensité de turbulence; utilisation d'une longueur caractéristique l (entre un maximum et un minimum) pour détecter les bulles d'air.

Turbulence signal in two-phase flow: a) continuous signal, b) digitized signal. High turbulence intensity; use of a characteristic length l for the detection of air bubbles.

3/

4/

(a)

air liquide air liquide air

(a)

air liquide air liquide air

(b)

(b)

6/

7/ Schéma du signal enregistré par la sonde dans une bulle d'air.

Schematic signal record in air bubble.

$< 0,1$ mm) qu'elle puisse se confondre avec une fluctuation, mais cela ne semble pas être un inconvénient majeur sauf dans le cas d'un écoulement avec émulsion.

Pour déterminer avec précision le temps passé par la sonde dans la phase gazeuse on se référera à certains traits pertinents de l'étude de Delhay [2]; en particulier on retiendra l'observation intéressante suivant laquelle, pour une sonde à film chaud conique, le temps de présence d'une bulle, indiqué par l'anémomètre, est inférieur au temps réel de présence de cette bulle. Ceci est dû aux

phénomènes de capillarité à l'arrivée et au départ de la bulle par rapport à l'élément sensible. Après avoir étudié de près ce phénomène, Delhay propose comme corrections à apporter les valeurs suivantes : $\Delta t = 1,3$ ms à l'arrivée d'une bulle et $\Delta t = 2,0$ ms quand cette bulle quitte la sonde (voir fig. 7). On trouvera aussi dans cette étude [2] des explications sur la forme du signal : survites à l'arrivée et au départ d'une bulle, asymétrie du signal dans la phase gazeuse...

On pourra par ce procédé déterminer le taux de vide local qui sera défini comme le rapport du nombre des valeurs digitalisées appartenant à la phase gazeuse au nombre total des valeurs digitalisées.

3.2.2 ETABLISSEMENT DU PROGRAMME D'ORDINATEUR.

Pour traiter le problème envisagé dans la présente étude un programme a été spécialement établi sous la forme d'une sous-routine nommée TPFLOW (Two-Phase Flow). Il a été composé en langage Fortran pour être utilisé sur la totalité de la mémoire de l'ordinateur IBM 360/44 de l'Université de Toronto. Les sous-routines TPFLO 1 et TPFLO 2 utilisent respectivement le test du seuil (fig. 4) et de la distance entre extrema (fig. 5) décrits au paragraphe 3.2.1. Pour les mesures dans le ressaut c'est la seconde sous-routine qui a été employée; on en reproduit l'organigramme sur la figure 8. On peut cependant ajouter que :

1. — Toutes les conditions d'enregistrement du signal sur le ruban magnétique ont été envisagées : début et fin d'enregistrement du signal se produisant dans une bulle, début d'enregistrement du signal turbulent dans la phase liquide ayant une pente positive ou négative...

2. — Les différentes anomalies ou erreurs possibles ont

/8 b

/ 8 c

été prévues : saut brusque et imprévu (non causé par une bulle) du signal, fin anormale d'une bulle...

3. — On a donné la valeur zéro aux valeurs digitalisées appartenant à la phase gazeuse pour ne considérer ensuite que les valeurs du signal dans l'eau.

4. — Les valeurs digitalisées du signal appartenant à la phase liquide ont été individuellement transformées en valeurs de vitesse par la relation d'étalonnage $U = f(Nu)$ établie sous la forme d'un polynôme du cinquième degré; Nu représentant le nombre de Nusselt (qui sera défini en 4.1) est une fonction de la tension du courant de chauffage. Cette dernière transformation réalise ainsi digitalement une linéarisation dont l'avantage est de réduire l'erreur systématique due aux valeurs extrêmes des fluctuations de tension en un point.

3.3 Digitalisation.

Lorsque l'on digitalise le signal donné par un film chaud placé dans un écoulement turbulent, il est très important

de tenir compte de certaines caractéristiques de l'écoulement pour choisir la fréquence de digitalisation et la durée d'enregistrement de chaque mesure. Ces deux paramètres ne peuvent être définis que s'y l'on connaît *a priori* le spectre d'énergie, ou du moins les limites extrêmes de ce spectre, c'est-à-dire les valeurs maximales ou minimales des fréquences au-delà desquelles on peut considérer que l'énergie présente dans le signal est insignifiante. En l'absence de telles indications, on fera une estimation basée sur d'autres résultats obtenus dans des écoulements d'eau [6], estimation à laquelle on ajoutera une marge de sécurité suffisante.

Ainsi la fréquence de digitalisation doit être au moins égale au double de la fréquence de pliage (aussi appelée fréquence de Nyquist) qui doit être elle-même supérieure à la plus grande valeur de fréquence possédant encore une énergie dans le signal considéré [1]. Dans le cas présent, on a choisi une fréquence de digitalisation f_0 égale à 2 500 Hz car il est peu probable d'obtenir dans l'écoulement d'eau considéré une quantité d'énergie non négligeable à des fréquences supérieures à 1 000 Hz, voir [6].

9/

11/

10/

9/ Stabilité du signal turbulent en fonction du nombre de blocs analysés : 1 bloc = 6,4 s.

Stability of turbulence signal as a function of numbers of blocks analysed: 1 block = 6.4 s.

10/ Schéma du canal ouvert.

Diagram of experimental flume.

11/ Etalonnage du film chaud. Variation du nombre de Nusselt en fonction de la vitesse de l'eau.

Typical calibration curve of hot film: variation of Nusselt number with flow velocity of water.

Le temps d'enregistrement d'un point de mesure est déterminé par la plus basse fréquence du spectre possédant encore une énergie suffisante. Or dans les écoulements turbulents d'eau on obtient encore de l'énergie à des valeurs très faibles de la fréquence — jusqu'à 0,1 Hz et au-delà, voir [6]. On a donc choisi une durée d'enregistrement de 100 s — plus exactement 102,4 s pour des raisons pratiques inhérentes à l'ordinateur — on aura donc pour chaque point de mesure : $2\,500 \times 102,4 = 256\,000$ valeurs digitalisées.

Cet ensemble de valeurs est inscrit directement sur bandes magnétiques par bloc de 16 000, soit un total de 16 blocs pour un seul point expérimental. Lors du traitement de ces données, l'ordinateur analyse un bloc à la fois et indique pour ce bloc la valeur moyenne du voltage, la vitesse moyenne, l'intensité de turbulence et le taux de vide. On a par ailleurs composé le programme de façon à obtenir les résultats partiels pour chaque bloc individuel et ces mêmes résultats moyennés sur l'ensemble des blocs précédents s'il y en a; ceci permet de détecter une anomalie possible dans l'enregistrement du signal et d'en vérifier la stabilité. En effet les vitesses moyennes ainsi que la valeur RMS des fluctuations de vitesse doivent atteindre une certaine stabilité quand le temps d'enregistrement augmente. La figure 9 montre un exemple de la variation de $\sqrt{u'^2}$ avec le temps (1 bloc = 6,4 s) pour deux positions de la sonde différentes: l'une dans un écoulement d'eau ($\alpha_G = 0$), l'autre dans un écoulement diphasique ($\alpha_G = 2,13\%$). Dans les deux cas la stabilité semble avoir été atteinte à la fin des 16 blocs, soit 102,4 s.

Remarquons aussi que le temps d'utilisation de l'ordinateur croît avec la fréquence de digitalisation et le temps d'enregistrement. Ainsi le traitement de l'ensemble des points expérimentaux (comprenant chacun 256 000 valeurs digitalisées) a nécessité une centaine d'heures d'ordinateur en employant la totalité de la mémoire, 220 K (1 K = 1 024 bytes) (*).

Cette méthode de traitement des données présente également d'autres attraits; elle permet en effet d'étudier plusieurs fois le signal puisque celui-ci est enregistré sur bandes magnétiques. On pourra, par exemple, déterminer les spectres d'énergie et les autocorrélations en employant des transformées de Fourier discrètes et rapides (communément appelées DFT et FFT), ce qui fera l'objet de futures publications. On peut noter que le traitement digital du signal turbulent d'un écoulement d'eau avait déjà été employé par Raichlen [5] en 1967.

4. — Dispositif expérimental

Etalonnage des sondes à films chauds

4.1 Dispositif expérimental.

On a déjà décrit en [8] le canal ouvert où les mesures sur le ressaut hydraulique ont été effectuées et dont le schéma est représenté sur la figure 10. L'appareillage de mesures est à peu près le même qu'en [8]. Le dispositif de repérage est identique et les mesures de débit et des vitesses moyennes sont effectuées avec les mêmes installations. Seul l'appareillage anémométrique a subi quelques modifications. Les sondes à films chauds ont été

comme précédemment alimentées par une chaîne anémométrique à température constante (*). Mais le signal de sortie a été directement branché sur un convertisseur analogique — digital (**) relié par un câble au centre de calcul numérique de l'Université de Toronto où les valeurs digitalisées du voltage étaient enregistrées sur bandes magnétiques. Une communication téléphonique directe permettait de relier le centre d'expérimentation au centre de calcul numérique.

Chaque point expérimental a été muni d'une « adresse » choisie par l'expérimentateur. Pour vérification ultérieure, la valeur moyenne du voltage pour chaque point expérimental a été relevée (quand cela était possible) sur un voltmètre digital (***). On doit également noter que le signal, avant d'être envoyé sur le convertisseur passait par un « signal conditionner » (****) pour obtenir un voltage inférieur à 10 V (limite maximum que peut enregistrer le convertisseur). Enfin un échantillon de l'enregistrement graphique du signal turbulent a été obtenu au moyen d'un visicorder (*****), cet instrument permettant de photographier sur papier sensible les variations d'un faisceau lumineux proportionnelles à la tension d'entrée.

4.2 Etalonnage des sondes à films chauds.

On a choisi comme dans la précédente étude [8] et d'après d'autres travaux [2] et [6] une sonde à film chaud de type conique (*****). On sait que ces modèles de sondes sont particulièrement bien adaptés aux mesures dans l'eau : leur forme géométrique empêche les poussières et filaments en suspension dans l'eau de se déposer sur l'élément sensible; leur recouvrement par une couche de quartz les isole électriquement du milieu liquide; enfin, d'après Delhaye [2], elles présentent des avantages certains pour la détermination des taux de vide en écoulements diphasiques.

Le principe de l'étalonnage d'une sonde à film chaud conique dans l'eau a déjà été expliqué en détail dans les références [7] et [8]. Cet étalonnage conduit à l'établissement d'une relation entre le nombre de Nusselt, Nu, et la vitesse moyenne U :

$$U = f(\text{Nu}) \quad (1)$$

avec :

$$\text{Nu} = E^2 / l' R_w k (\theta_w - \theta_f) \quad (2)$$

où E est la tension aux bornes du film, l' une longueur caractéristique du film (prise ici égale à 0,6 mm), R_w la résistance du film chauffé à la température θ_w supérieure à la température θ_f de l'eau, et k la conductivité thermique du fluide prise à la température $\theta_{\text{film}} = (\theta_w + \theta_f)/2$. La courbe d'étalonnage et les points expérimentaux sont montrés sur la figure 11. En employant la méthode des moindres carrés on a pu établir la relation (1) sous la forme d'un polynôme du cinquième degré :

$$\begin{aligned} V_{(\text{ft/sec})} = & 7,24 \times 10^{-1} - 1,91 \times 10^{-1} \text{Nu} \\ & + 1,58 \times 10^{-2} \text{Nu}^2 - 4,92 \times 10^{-4} \text{Nu}^3 \\ & + 8,12 \times 10^{-6} \text{Nu}^4 - 4,66 \times 10^{-8} \text{Nu}^5 \quad (3) \end{aligned}$$

(*) TSI Modèle n° 1050-1051.

(**) Remote Analog Digital Data Terminal (RADDT) IBM Modèle n° 3923.

(***) DISA Modèle n° 55D3.

(****) TSI Modèle n° 1057.

(*****) Honeywell Modèle n° 906B.

(*****) On avait adopté dans l'étude [8] les sondes coniques TSI 1232W, on a choisi ici les sondes coniques DISA 55A87.

(*) Chaque point expérimental a nécessité, pour le dépouillement, 12 mn et presque autant pour l'enregistrement.

Puisque chaque valeur digitalisée du voltage est transformée au moyen des relations (2) et (3) en une valeur de vitesse il n'y a pas lieu de déterminer la sensibilité du film chaud à la vitesse.

5. — Résultats des mesures

5.1 Présentation des résultats.

Dans l'étude [8] les vitesses avaient été normalisées par la vitesse maximum dans la section, et les intensités de turbulence par la vitesse moyenne locale; enfin on avait montré les distributions de ces deux grandeurs en fonction des hauteurs adimensionnelles y/d , d étant la hauteur

maximale de l'écoulement dans la section considérée. Cette même présentation est proposée ici pour pouvoir comparer et compléter l'étude précédente [8].

Cependant il paraît souhaitable de présenter les résultats d'une autre manière. En effet, si l'on cherche, à l'aide de l'analyse dimensionnelle, à relier les grandeurs précédentes à des grandeurs fixes et connues, on se rend compte que la hauteur d_1 et la vitesse $\bar{U}_1$ dans la section amont sont les grandeurs caractéristiques que l'on doit choisir. On montrera donc, dans cette seconde présentation, les distributions des termes $U/\bar{U}_1$ et $\sqrt{u'^2}/\bar{U}_1$ en fonction de y/d_1 , ou $\bar{U}_1$ représente la vitesse moyennée dans la section P 0. Cette nouvelle présentation a aussi l'avantage de reconstituer la forme géométrique du ressaut hydraulique, ce qui peut contribuer à une meilleure compréhension du phénomène.

16/ Distribution des vitesses moyennes :

$$y/d = f(U/\bar{U}_1)$$

$F_1 = 2.85$; écoulement amont pleinement développé.

Distribution of mean velocity (rel. to $\bar{U}_1$):

$F_1 = 2.85$, developed inflow.

17/ Distribution des vitesses moyennes :

$$y/d = f(U/\bar{U}_1)$$

$F_1 = 2.85$; écoulement amont à potentiel.

Distribution of mean velocity (rel. to $\bar{U}_1$):

$F_1 = 2.85$, undeveloped inflow.

18/ Distribution des vitesses moyennes :

$$y/d = f(U/\bar{U}_1)$$

$F_1 = 6.00$; écoulement amont pleinement développé.

Distribution of mean velocity (rel. to $\bar{U}_1$):

$F_1 = 6.00$, developed inflow.

19/ Distribution des vitesses moyennes :

$$y/d = f(U/\bar{U}_1)$$

$F_1 = 6.00$; écoulement amont à potentiel.

Distribution of mean velocity (rel. to $\bar{U}_1$):

$F_1 = 6.00$, undeveloped inflow.

5.2 Vitesses moyennes.

Pour des raisons déjà énoncées dans [8] on n'a effectué les mesures que dans la section (longitudinale) médiane du canal. Les positions des sections transversales sont repérées, dans la direction x (fig. 3), par des multiples de d_2 comme mentionné au paragraphe 2. On a donc effectué des mesures aux sections P 0, P 2, P 5, P 10, P 15 et P 20 complétant ainsi les mesures de [8] par des mesures dans le rouleau du ressaut. Pour une des conditions amont (écoulement à potentiel) et un nombre de Froude ($F_1 = 2.85$) on a fait des mesures à la section intermédiaire P 3.5.

Une première présentation des résultats (voir section 5.1) montre les distributions des vitesses normalisées par la vitesse maximale $U_{\max}$ en fonction de la hauteur normalisée y/d . Ces résultats sont présentés sur les figures suivantes :

1. Nombre de Froude $F_1 = 2.85$:
  - a) Ecoulement amont pleinement développé : figure 12.
  - b) Ecoulement amont à potentiel : figure 13.
2. Nombre de Froude $F_1 = 6.00$:
  - a) Ecoulement amont pleinement développé : figure 14.
  - b) Ecoulement amont à potentiel : figure 15.

La seconde présentation de ces résultats fait intervenir les grandeurs $U/\bar{U}_1$ et y/d_1 . Pour les mêmes conditions ci-dessus énoncées ces résultats sont alors montrés sur les figures 16, 17, 18 et 19.

On doit remarquer que, pour des raisons pratiques, l'échelle horizontale des ressauts a été contractée. Les valeurs numériques de d , d_1 , $U_{\max}$ et $\bar{U}_1$ sont inscrites dans le tableau I.

Tableau 1

Valeurs caractéristiques de l'écoulement, utilisées pour les deux modes de présentation des résultats.

ABRÉVIATIONS :

dév. = écoulement amont pleinement développé;

non dév. = écoulement amont à potentiel.

Les valeurs numériques sont indiquées dans le système d'unités anglais.

GRANDEURS CARACTÉ- RISTIQUES	POSITION	P0	P2	P5	P7	P10	P15	P20
	Nb. de FROUDE							
d (ft)	2,85 dev.	0,128	0,424	0,402	0,440	0,466	0,491	0,485
	2,85 non dev.	0,128	0,293	0,443	0,462	0,464	0,466	0,464
	6,00 dev.	0,040	0,260	0,250	0,280	0,330	0,370	0,375
	6,00 non dev.	0,040	0,246	0,393	0,400	0,400	0,400	0,400
U_{max} (ft/sec)	2,85 dev.	7,65	4,49	4,23	3,52	2,96	2,19	1,91
	2,85 non dev.	6,13	5,16	2,86	2,30	2,05	2,05	1,99
	6,00 dev.	9,84	4,47	2,33	2,22	2,05	1,36	1,46
	6,00 non dev.	9,70	6,57	1,45	1,54	1,27	0,85	0,89
$\bar{U}$ (ft/sec)	2,85 dev.	6,61	3,23	2,87	2,32	1,82	1,58	1,55
	2,85 non dev.	6,04	2,94	2,03	2,00	1,94	1,85	1,76
	6,00 dev.	8,30	3,49	1,69	1,67	1,36	0,91	1,01
	6,00 non dev.	9,12	2,66	1,29	1,09	0,84	0,76	0,74

Table 1

Summary of experimental data used in the two modes of presentation of results.

dév. = developed inflow;
non dév. = undeveloped inflow.

20/ Comparaison des intensités de turbulence d'après les deux méthodes de mesures : écoulement uniforme, turbulent pleinement développé.

Turbulence intensities determined by two different methods: fully developed, uniform, turbulent channel flow.

5.3 Mesure des intensités de turbulence.

I. — On peut d'abord comparer certains résultats de la présente étude avec ceux de l'étude précédente [8]. On ne s'intéressera pour cela qu'aux valeurs des intensités de turbulence pour un écoulement uniforme en canal ouvert, c'est-à-dire pour l'écoulement turbulent pleinement développé. Les résultats de l'étude [8] avaient été obtenus à l'aide d'une méthode analogique et sans linéarisation, ceux de la présente étude sont acquis par une méthode digitale avec linéarisation. Il est aussi intéressant de noter que la méthode digitale employée ici permet d'obtenir des points situés plus près de la surface libre (voir fig. 20).

II. — Les distributions des intensités de turbulence dans les sept sections envisagées sont montrées sur les figures 21 à 28 pour les deux modes de présentation.

— Première représentation : $y/d = f(\sqrt{u'^2}/U)$

$F_1 = 2,85$:

Écoulement amont pleinement développé : figure 21.

$F_1 = 2,85$:

Écoulement amont à potentiel : figure 22.

$F_1 = 6,00$:

Écoulement amont pleinement développé : figure 23.

$F_1 = 6,00$:

Écoulement amont à potentiel : figure 24.

— Deuxième représentation : $y/d_1 = f(\sqrt{u'^2}/\bar{U}_1)$

$F_1 = 2,85$:

Écoulement amont pleinement développé : figure 25.

$F_1 = 2,85$:

Écoulement amont à potentiel : figure 26.

$F_1 = 6,00$:

Écoulement amont pleinement développé : figure 27.

$F_1 = 6,00$:

Écoulement amont à potentiel : figure 28.

/21

Répartition des intensités de turbulence :

 $y/d = f(\sqrt{u'^2}/U)$, $F_1 = 2,85$;
 écoulement amont pleinement développé.

 Distribution of turbulence intensity:
 $F_1 = 2.85$, developed inflow.

22/

Répartition des intensités de turbulence :

 $y/d = f(\sqrt{u'^2}/U)$, $F_1 = 2,85$;
 écoulement amont à potentiel.

 Distribution of turbulence intensity:
 $F_1 = 2.85$, undeveloped inflow.

/23

Répartition des intensités de turbulence :

 $y/d = f(\sqrt{u'^2}/U)$, $F_1 = 6,00$;
 écoulement pleinement développé.

 Distribution of turbulence intensity:
 $F_1 = 6.00$, developed inflow.

24/ Répartition des intensités de turbulence :

$y/d = f(\sqrt{u'^2}/U)$, $F_1 = 6,00$;
écoulement amont à potentiel.

Distribution of turbulence intensity:
 $F_1 = 6.00$, undeveloped inflow.

25/ Répartition des intensités de turbulence :

$y/d_1 = f(\sqrt{u'^2}/\bar{U}_1)$, $F_1 = 2,85$;
écoulement amont pleinement développé.

Distribution of turbulence intensity:
(rel. to $\bar{U}_1$):
 $F_1 = 2.85$, developed inflow.

26/ Répartition des intensités de turbulence :

$y/d_1 = f(\sqrt{u'^2}/\bar{U}_1)$, $F_1 = 2,85$;
écoulement amont à potentiel.

Distribution of turbulence intensity:
(rel. to $\bar{U}_1$):
 $F_1 = 2.85$, undeveloped inflow.

27/ Répartition des intensités de turbulence :

$y/d_1 = f(\sqrt{u'^2}/\bar{U}_1)$, $F_1 = 6,00$;
écoulement amont pleinement développé.

Distribution of turbulence intensity
(rel. to $\bar{U}_1$):
 $F_1 = 6.00$, developed inflow.

28/ Répartition des intensités de turbulence :

$y/d_1 = f(\sqrt{u'^2}/\bar{U}_1)$, $F_1 = 6,00$;
écoulement amont à potentiel.

Distribution of turbulence intensity
(rel. to $\bar{U}_1$):
 $F_1 = 6.00$, undeveloped inflow.

6. — Mesures de taux de vide

Le coefficient de taux de vide α_G est ainsi défini :

$$\alpha_G = \frac{T_G}{T_G + T_L} \quad (4)$$

avec : T_G le temps passé par la sonde dans la phase gazeuse et T_L le temps passé dans la phase liquide.

Si l'on tient compte des précautions mentionnées au paragraphe 3.2.1 concernant les dimensions exactes des bulles d'air, on obtient, à l'aide du programme d'ordinateur traitant la bande magnétique, le nombre exact de points digitalisés appartenant à la phase gazeuse. Les résultats sont montrés sur les figures 29 à 32 pour les deux nombres de Froude et les deux conditions de l'écoulement à l'amont envisagées.

7. — Discussion des résultats

I. — Les distributions des vitesses moyennes sont représentées sur les figures 12 à 19. La première présentation des résultats, figures 12 à 15, permet une comparaison avec les résultats de l'étude précédente [8]. On peut tout d'abord constater que pour les sections communes aux travaux : P 0, P 10, P 15 et P 20, il y a accord entre les deux séries de mesures. Comme précédemment on peut encore vérifier qu'il existe une différence très nette entre ressauts avec écoulement amont pleinement développé et écoulement amont à potentiel. Ceci est encore plus net si l'on considère la seconde présentation des résultats, figures 16 à 19. On se rend alors très bien compte que les ressauts avec écoulement amont pleinement développé ont une longueur L_j très supérieure à celle des ressauts avec écoulement amont à potentiel. Dans le premier cas on remarque que les distributions des vitesses dans une section ne

semblent pas avoir atteint un état d'équilibre à des sections aussi éloignées que $x = 20 d_2$, alors que dans le second cas (écoulement amont à potentiel) l'écoulement semble avoir atteint un équilibre tel, qu'il est possible d'assurer que les effets du ressaut sont insignifiants à une telle distance (voir aussi tableau I).

Si l'on considère maintenant les profils de vitesse dans le rouleau, section P 2, P 5 et P 7 on peut également noter des différences intéressantes pour les deux types de ressaut. Dans les ressauts de type I (écoulement amont pleinement développé) il semble que l'on obtient les plus fortes valeurs de la vitesse plus près de la surface libre que pour les ressauts de type II où les plus fortes valeurs de la vitesse se produisent plus près de la paroi.

II. — En ce qui concerne les intensités de turbulence il est tout d'abord intéressant de constater que les mesures effectuées dans un écoulement uniforme pleinement développé donnent des résultats parfaitement en accord avec ceux obtenus dans l'étude précédente (voir fig. 20). Ces résultats obtenus par des moyens différents (sondes et méthodes de mesures) montrent la précision des deux séries d'expériences et peuvent même être proposés comme référence pour des travaux ultérieurs.

On peut comparer ici encore les distributions des intensités de turbulence avec celles de l'étude [8] pour les sections P 0, P 10, P 15 et P 20 (fig. 21 à 24). On peut noter qu'il y a accord entre les deux séries de mesures, les évolutions des distributions étant semblables dans les deux cas. Si les valeurs absolues des intensités de turbulence sont parfois différentes, on remarquera que ceci se produit pour les fortes valeurs de $\sqrt{u'^2}/U$ et que dans ce cas là :

- a) la précision des mesures devient plus faible;
- b) le fait d'introduire une linéarisation peut améliorer les résultats.

Cette dernière remarque mérite d'être discutée. En effet d'après Sandborn [10] l'avantage d'une linéarisation ne se fait pas sentir pour des intensités de turbulence inférieures à 30 %, ce qui explique que l'on n'ait point trouvé de différence notable pour les deux séries de mesures de la figure 20. Pour des intensités de turbulence supérieure à 30 ou 40 %, l'effet de la linéarisation devient important; mais, malheureusement, à partir de ces mêmes valeurs la précision des mesures décroît aussi très rapidement car on ne peut plus négliger les composantes transversales de la vitesse. Bien qu'il soit encore impossible d'estimer l'effet d'interaction de ces phénomènes, il semble peu probable d'obtenir une précision meilleure que 20 % pour les régions de forte turbulence [7, 10].

Les figures 25 à 29 montrent les répartitions des intensités de turbulence (par la seconde présentation proposée). Il est intéressant de constater que pour des conditions de l'écoulement à l'amont différentes, les distributions de $\sqrt{u'^2}/U_1$ sont également différentes. Pour le cas d'un écoulement amont à potentiel les résultats se trouvent en bon accord avec ceux de Rouse [9]. On remarquera cependant que même dans ce cas là, les distributions évoluent jusqu'à des distances aussi éloignées que $x = 10 d_2$ et non $5 d_2$ comme semble le suggérer l'étude de Rouse. Lorsque l'écoulement amont est pleinement développé ces distances sont bien supérieures à $10 d_2$, les profils n'ayant pas encore atteint leur équilibre à des sections situées à $x = 20 d_2$. Par ailleurs le niveau de turbulence semble en tous points nettement plus élevé pour les ressauts de type I (écoulement amont pleinement développé) que pour les ressauts de type II. Enfin dans le rouleau lui-

même les distributions ont des formes différentes selon le type de ressaut laissant supposer que la structure de l'écoulement peut être aussi différente pour les deux cas envisagés.

III. — Les répartitions des coefficients de taux de vide dans les différentes sections du rouleau du ressaut semblent également confirmer les hypothèses émises sur les longueurs L_j . On remarque la présence de bulles d'air à des sections nettement plus éloignées du début du rouleau pour les ressauts de type I que pour les ressauts de type II; ceci renforce l'idée que les ressauts de type I sont plus longs que les ressauts de type II.

Par ailleurs pour la section P 2 qui, parmi les sections envisagées ici est celle qui contient la plus grande quantité d'air, les répartitions des taux de vide sont différentes pour les deux types de ressaut: α_G augmente progressivement du fond du canal vers la surface libre pour les ressauts de type I, alors qu'on voit apparaître un maximum pour les ressauts de type II. Cela laisse à supposer que, dans ce dernier cas, il y aurait une brusque injection de bulles d'air dans le rouleau à une hauteur égale à d_1 (hauteur de l'écoulement supercritique au début du ressaut). Cependant, en l'absence d'un processus de mélange efficace, les bulles d'air ainsi projetées horizontalement à une vitesse voisine de U_1 remonteraient progressivement à l'intérieur du ressaut jusqu'à la surface libre à mesure que la vitesse du courant diminue. Cette concentration de bulles d'air ne se produirait pas pour les ressauts de type I où le processus de mélange plus efficace dans ce cas permettrait de maintenir une grande quantité d'air sur une distance plus longue. Enfin, on remarquera que la quantité d'air entraîné augmente avec le nombre de Froude.

8. — Conclusions

Cette étude constitue principalement la continuation de travaux qui ont fait l'objet d'une précédente publication [8] et dont le but était de déterminer les grandeurs moyennes et turbulentes en amont et en aval du ressaut hydraulique, dans la partie désaérée de celui-ci. On s'est consacré ici à la détermination de ces mêmes grandeurs dans le rouleau du ressaut qui est essentiellement constitué d'un écoulement double-phase air-eau dû au fort entraînement d'air dans cette région.

Il serait intéressant de citer une phrase que Rouse écrivit en 1959 [9] lorsqu'il étudia les caractéristiques turbulentes du ressaut hydraulique sur un modèle aérodynamique: « Unfortunately, the jump will probably be one of the last hydraulic phenomena to be susceptible to exploration with the hot-wire instrument, because of the presence of countless fluid discontinuities (bubbles of entrained air) in the region of great interest » (*). Nous avons proposé ici ce qui pourrait bien être la première exploration de ce phénomène avec un anémomètre à film chaud. Pour cela il a fallu mettre au point une nouvelle méthode de mesure. Celle-ci consiste principalement à digitaliser le signal turbulent et à l'étudier au moyen d'un programme d'ordinateur permettant de séparer les points appartenant à la phase liquide de ceux appartenant à la phase

(*) Traduction: « Malheureusement, le ressaut sera sans doute un des derniers phénomènes hydrauliques à être susceptible d'être étudié avec un appareil à fil chaud, à cause de la présence d'innombrables discontinuités dans le fluide (bulles d'air entraîné). »

gazeuse. Ceci a permis non seulement de déterminer les vitesses moyennes et les intensités de turbulence pour la phase liquide mais aussi de déterminer les taux de vide en chaque point expérimental.

En plus d'une méthode permettant de faire des mesures de turbulence dans un écoulement diphasique, une contribution a été apportée à l'étude du ressaut hydraulique. On peut en effet, de façon plus nette qu'auparavant, affirmer que les conditions de l'écoulement à l'amont ont une influence prépondérante sur la structure même du ressaut. Il semble cependant difficile, en l'état actuel des choses, de proposer un schéma de structure. Pour obtenir plus de renseignements il faudrait connaître les distributions des fluctuations transversales de la vitesse ainsi que les tensions de Reynolds (ce programme fera l'objet d'une prochaine étude).

9. — Remerciements

Les auteurs remercient les personnes et organismes qui ont contribué, de diverses façons, à ce travail. En particulier ces remerciements s'adressent à Mr. le Doyen J.M. Ham de la Faculté « of Applied Sciences and Engineering » de l'Université de Toronto, au Conseil National de la Recherche du Canada (Bourse A-1541) et au « Department of Energy, Mines and Resources (Canada) » pour leur soutien et aide financière. Mr. J.R. McBride, directeur du « Computer Research Facility » de l'Université de Toronto a montré un intérêt particulier au problème du traitement du signal par ordinateur et a mis son personnel et ses installations à notre service, les auteurs lui adressent toute leur reconnaissance. Enfin ces remerciements s'adressent aux personnes et collègues du « Department of Mechanical Engineering » de l'Université de Toronto qui, par leurs encouragements et conseils, ont apporté leur contribution à cette étude; en particulier Mr. R. Abel, ingénieur à « Atomic Energy of Canada Ltd. », qui par son expérience et sa participation dans l'établissement du programme d'ordinateur a beaucoup contribué au succès du dépouillement des mesures.

10. — Nomenclature

B : largeur du canal;
 d : hauteur de l'écoulement;
 d_1 : hauteur de l'écoulement amont;
 d_2 : hauteur de l'écoulement aval;
 E : tension du courant aux bornes du film chaud;
 F : nombre de Froude, $F = U/\sqrt{gd}$;
 f_0 : fréquence de digitalisation;
 g : accélération de la pesanteur;
 k : conductivité thermique du fluide;
 l : distance caractéristique entre un maximum et un minimum du signal turbulent, utilisée pour détecter les bulles d'air;

l' : dimension caractéristique du film chaud;

L_j : longueur du ressaut hydraulique;

Nu : nombre de Nusselt;

P 0, P 2,

P 5... : sections transversales de mesures;

Q : débit;

R : nombre de Reynolds, $R = U_{\max} d/\nu$;

R_w : résistance du film à la température θ_w ;

T_k : ($k = G$ ou L) temps passé dans la phase k ;

U : vitesse moyenne locale dans la direction x ;

$\bar{U}$: vitesse moyenne dans la section,

$$\bar{U} = 1/d \int_0^d U dy$$

U : vitesse moyenne de débit, $U = Q/Bd$;

u', v' : fluctuation de vitesse dans les directions x et y ;

x : coordonnée horizontale dans la direction et le sens de l'écoulement;

y : coordonnée verticale;

α_G : coefficient de taux de vide;

θ_f : température du fluide ambiant;

θ_w : température de chauffage du film.

11. — Références

- [1] BLACKMAN (R. B.) and TUKEY (J. W.). — *The Measurement of power spectra*. Dover Publications Inc., New York (1958).
- [2] DELHAYE (J. M.). — « Hot-Film Anemometry in Two-Phase Flow ». Eleventh National ASME/AICHE Heat Transfer Conference (3-6 August, 1969), Minneapolis, Minnesota, U.S.A., p. 58-68.
- [3] HENDERSON (F. M.). — *Open Channel Flow*. The MacMillan Book Co., New York, N.Y., U.S.A. (1966).
- [4] LEUTHEUSSER (H. J.) and KARTHA (V. C.). — « Effects of Inflow Condition on Hydraulic Jump ». *Journal of the Hydraulics Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE), vol. 98, no. HY8 (August 1972).
- [5] RAICHLEIN (F.). — « Some Turbulence Measurements in water ». *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Proceedings of the ASCE, vol. 93, no. EM2 (April, 1967), p. 73-97.
- [6] RESCH (F.). — « Etudes sur le fil chaud et le film chaud dans l'eau ». Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences, Université d'Aix-Marseille (1968). Traduction anglaise n° 70-12637, National Translation Center, The John Crerar Library, 35 West 33rd Street, Chicago, Illinois 60616, U.S.A.
- [7] RESCH (F.) et COANTIC (M.). — « Etude sur le fil chaud et le film chaud dans l'eau ». *La Houille Blanche*, n° 2 (1969), p. 151-161.
- [8] RESCH (F. J.) et LEUTHEUSSER (H. J.). — « Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique ». — *La Houille Blanche*, n° 1 (1971), p. 17-31.
- [9] ROUSE (H.), SIAO (T. T.) and NAGARATNAM (S.). — « Turbulence Characteristics of the Hydraulic Jump ». *Transactions of the ASCE*, vol. 124 (1959), p. 926-950.
- [10] SANDBORN (V. A.). — *Hot-Wire Anemometer Measurements in Large Scale Boundary Layers*. Advances in Hot-Wire Anemometry; Report AF05R, n° 68-1492, Dept. of Aerospace Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland, U.S.A. (July, 1968).