

**NOTULE HYDRAULIQUE
HYDRAULIC BRIEF**

Raccordements pour conduites à section carrée^(*)

Inlets for square conduits^(*)

Evolution du jet issu d'un orifice carré, renversement de la section transversale autour de l'axe de l'écoulement. — Application à la réalisation des raccordements dans le cas des conduites à section carrée. — Etudes détaillées des caractéristiques et de la forme de l'écoulement dans la zone de transition entre la section initiale et la section renversée finale (observation directe et photographique, modèle à analogie électrique). — Les avantages de ce type de raccordement par rapport au raccordement classique.

Transformation of a jet issuing from a square orifice; inversion of the transverse section about the longitudinal axis of flow. Application to the design of transitions in the case of conduits of rectangular cross section. Detailed studies of the various characteristics of the flow in the zone of transition between the initial section and the final inverted section (direct and photographic observation, and simulation with electrical analogy). The advantages of this type of transition in comparison with transitions of customary shape.

Le tracé d'un raccordement entre un réservoir et une conduite à section carrée peut logiquement être basé sur la forme du jet issu d'un orifice carré. La forme de la section transversale d'un tel jet se modifie notablement au fur et à mesure qu'il se contracte, à l'inverse de ce qui se passe pour un jet issu d'un orifice circulaire. Dans la zone de contraction, sa section transversale est toujours un carré, mais un carré dont les côtés ont tourné de 45° par rapport à ceux de l'orifice. Si l'on façonne un raccordement d'après le jet, l'eau se trouve tout naturellement amenée à former une section carrée. Pour un projet donné, on peut, grâce à l'analogie électrique, mettre en évidence tous les avantages de ce type de raccordement à section carrée renversée.

L'écoulement issu d'un orifice de ce genre a

Design of an inlet from a reservoir to a square conduit can logically be based on the shape of a jet from a square orifice. Such a jet changes markedly in cross-sectional form as it contracts, in direct contrast to a jet from a circular orifice. At the vena contracta, its cross section is again a square, but one with its sides inclined 45° to those of the opening. If a boundary transition is patterned after the jet, the water is allowed to form a square section in a natural way. Several advantages of this inverted-square transition can be demonstrated for a specific design by means of the electric analogy.

Flow from such an orifice was studied visually and photographically at the Iowa Institute of Hydraulic Research (Fig. 1), and detailed measurements of its profile [1] were obtained from

(*) Etude pour le compte de l'Office of Naval Research (Contract, N8 onr. 500) par l'Université d'Iowa.

(*) Project sponsored by the Office of Naval Research under Contract N8onr-500 with the State University of Iowa.

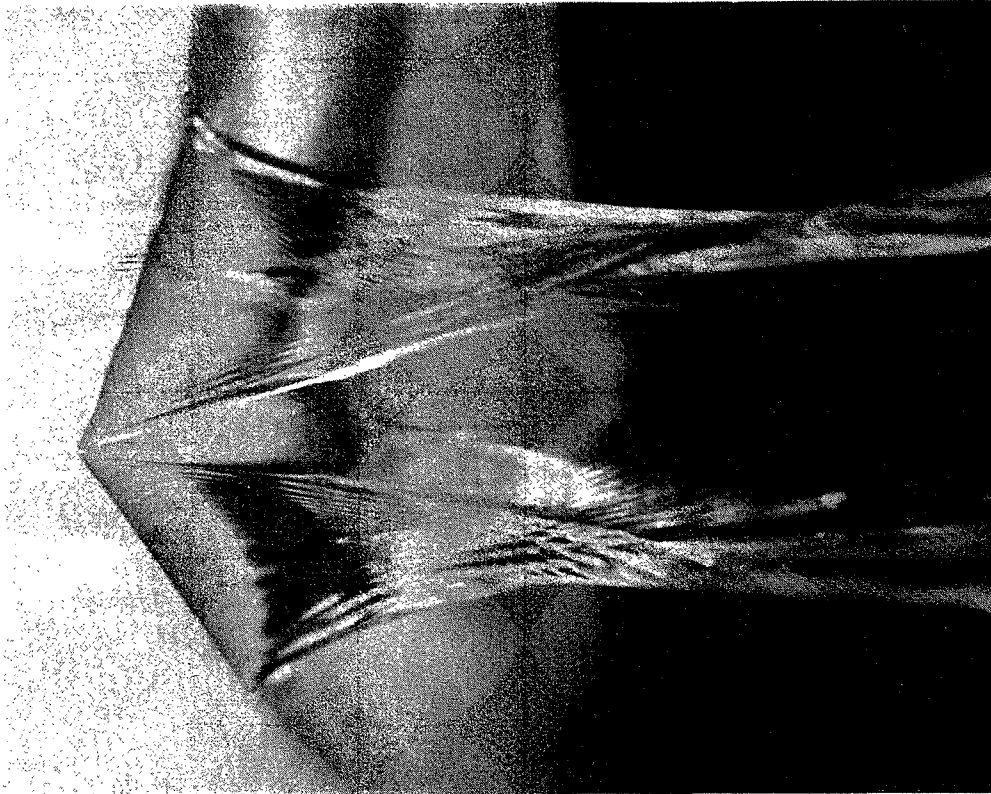


FIG. 1.

Photographie du jet issu d'un orifice carré.

Photograph of a water jet from a square orifice.

fait l'objet d'observations directes et photographiques à l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa (fig. 1). De plus, des mesures détaillées concernant sa forme ont pu être tirées d'une thèse du professeur AMBROSE [1], de l'Université de Tennessee. Dans la zone de transition, entre la section carrée initiale et la section carrée renversée, les sections transversales du jet sont à peu près octogonales, la longueur des côtés variant selon un processus bien déterminé. Les sommets initiaux deviennent de petits côtés qui s'allongent progressivement; par contre, les côtés initiaux se raccourcissent pour constituer les nouveaux sommets. Par suite des difficultés qu'il y a à décrire cette forme, la figure 2 donne une perspective complétant la photographie.

Si la section transversale du jet se modifie, c'est que les lignes de courant issues des sommets de l'orifice se contractent davantage que celles qui sont issues du milieu des côtés. Il est probable que la composante de vitesse en direction de l'axe du jet est plus grande près des sommets, en raison du resserrement des surfaces de courant dans cette zone. La contraction le long des diagonales (fig. 1) est suffisamment pronon-

cée par une thèse by Professor H. H. AMBROSE of the University of Tennessee. In the transition from the original to the inverted square, the jet cross sections are nearly octagonal, the lengths of the sides varying systematically. The original corners become small sides which increase steadily

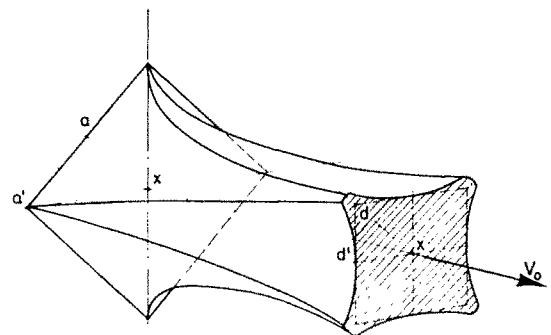


FIG. 2.

Vue perspective du jet.
Perspective view of jet.

in length; the original sides diminish in length to form the new corners. Because the shape is difficult to describe, a perspective drawing is shown in Fig. 2 to supplement the photograph.

cée pour que la contraction le long des côtés soit d'abord arrêtée, puis change de sens. L'allongement des côtés qui en résulte est finalement arrêté à nouveau par la tension superficielle, et la succession des inversions se poursuit plus loin à l'aval.

C'est donc l'inertie qui est à l'origine de la modification du carré original, puis les effets de tension superficielle continuent son action. Si la vitesse du jet est modifiée, l'emplacement du point de section transversale minimum demeure inchangé, bien que l'espacement entre les renversements successifs varie considérablement. La position de la section transversale minimum varierait aussi avec la vitesse dans le cas où la tension superficielle serait importante lors de la contraction initiale.

La figure 3 permet de comparer les résultats précis et détaillés obtenus par AMBROSE sur un

The cross section of the jet changes because streamlines beginning at the corners of the opening contract more than do those beginning at the mid points of the sides. Presumably the component of velocity toward the axis of the jet is greater near the corners, because the stream surfaces there are more crowded. The contraction along the diagonals (Fig. 1) is sufficiently pronounced that the contraction along the sides is arrested and then reversed. The subsequent expansion of the sides is finally reversed again by surface tension, and the familiar cyclic inversion takes place farther downstream.

Inertia thus starts the departure from the original square and surface tension continues it. If the velocity of the jet is varied, the location of the point of minimum cross section, or vena contracta, remains unchanged, although the spacing of the subsequent reversals varies considerably. The position of the vena contracta

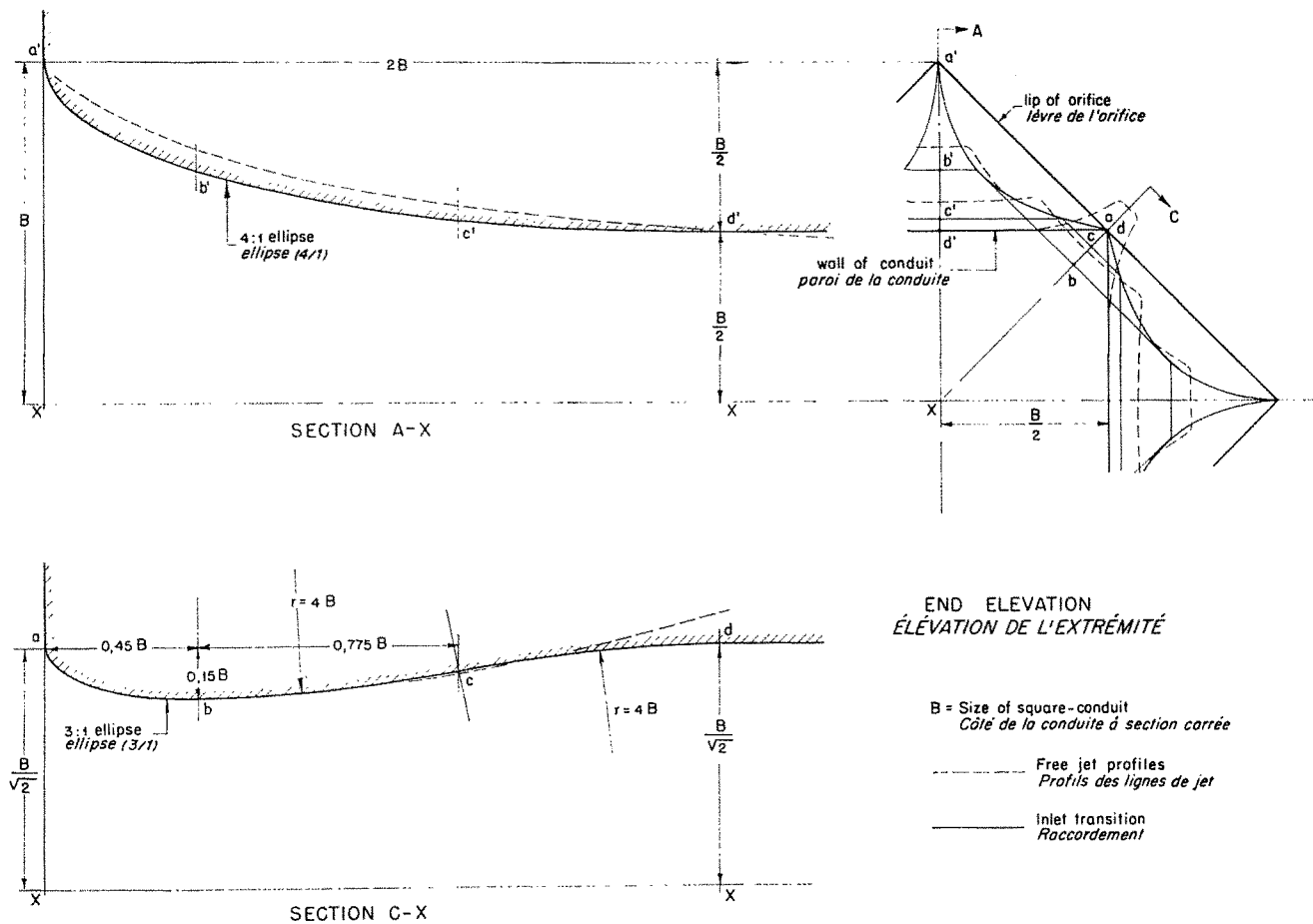


FIG. 3.

Comparaison de la ligne de jet et de la paroi du raccordement.

Comparison of jet surface and transition boundary.

jet issu d'un orifice carré de 2 pouces, avec ceux obtenus avec l'orifice choisi pour une étude par analogie électrique. Les écarts constatés proviennent de ce que le profil choisi présentait une contraction un peu plus grande que celle du jet libre, et de ce que les surfaces étaient géométriquement plus simples que celles du jet libre. On avait imposé un coefficient de contraction de 0,5 au raccordement, alors que dans le jet libre ce coefficient est approximativement de 0,6. On adopta des arcs elliptiques et circulaires, à la fois parce qu'ils constituaient de bonnes approximations des profils, et parce qu'ils s'avéraient faciles à définir et à construire. On n'avait pas tenu compte de la légère courbure transversale observée par AMBROSE, si bien que les surfaces ne présentaient aucun gauchissement.

Pour les essais par analogie électrique on réalisa le modèle du raccordement en chauffant des plaques de lucite, et en les courbant selon les formes désirées. On avait besoin seulement d'un 1/8 du raccordement total, étant donné que toutes les sections sont symétriques par rapport aux médianes et aux diagonales. Ainsi sur les huit surfaces courbes constituant un raccordement complet, seules les moitiés adjacentes de deux d'entre elles furent installées sur le modèle. L'orifice carré avait pour côté $4\sqrt{2}$ pouces, et la conduite, 4 pouces. La longueur du raccordement atteignait 8 pouces. L'éloignement des électrodes aux deux extrémités de la cuve était suffisamment grand pour que l'on ait une représentation correcte d'un grand réservoir et d'une conduite à section carrée infiniment longue. Les limites du champ d'analogie électrolytique étaient constituées par : le raccordement, soigneusement réalisé, des pièces de lucite représentant une partie de la paroi du réservoir et la moitié d'un côté de la conduite, une plaque de lucite inclinée à 45° , les électrodes et la surface libre. Des détails sur le montage, la technique des mesures, et les résultats obtenus dans le cas d'un raccordement à section carrée plus classique ont été présentés par HUBBARD et LING [2].

Les valeurs du potentiel électrique, relevées en 300 points de la paroi de lucite, permirent de déterminer les valeurs correspondantes du potentiel de vitesse. C'est à partir de ces valeurs que les vitesses et les pressions furent calculées. La partie supérieure de la figure 4 montre sur les surfaces développées les courbes d'égalité des pressions, la partie inférieure de cette figure donne la répartition de la pression le long des deux principaux profils de la paroi. Les vitesses à la paroi grandissent de façon presque uniforme rapidement près du point de raccordement amont, et très graduellement presque partout ailleurs.

would also vary with velocity if surface tension were important to the initial contraction.

AMBROSE's accurate and detailed measurements of the jet from a square orifice 2 inches on a side are compared in Fig. 3 with those of the form chosen for study by means of electric analogy. The two differ, because the profile chosen contracted somewhat more than did the free jet, and because its surfaces were geometrically simpler than were those of the free jet. A contraction ratio of 0.5 was assigned for the inlet; that for the free jet was approximately 0.6. Elliptical and circular arcs were used, both because they were suitable approximations to the profiles and because they are easy to define and to construct. The slight transverse curvature which AMBROSE observed was ignored, so that the surfaces were not warped.

For the tests by electric analogy the model of the transition was made by heating and bending sheets of Lucite into the desired shapes. Only an eighth of a complete transition was needed, because all sections are symmetrical with respect to both medians and diagonals. Thus, of the 8 curved surfaces in a complete transition, adjacent halves of two were included in the sectional model. The square opening was $4\sqrt{2}$ inches on a side and the conduit was 4 inches on a side. The axial length of the transition was 8 inches. The distances to the electrodes in the pool upstream and along the parallel section downstream were long enough to provide suitable representations of a large reservoir and an indefinitely long square conduit. The boundaries of the electrolytic analog were the accurately formed transition, pieces of Lucite to represent a part of the wall of the reservoir and half of one side of the conduit, a sheet of Lucite inclined at 45° , the electrodes, and the free surface. The free surface and the glass were planes of symmetry, and their line of intersection represented the axis of the conduit. Details of the assembly, of the technique, and of results for a more conventional transition for a square conduit have been presented by HUBBARD and LING [2].

Values of the electrical potential at 300 points on the Lucite boundary were used to determine the analogous values of the velocity potential. From these the velocities and the pressures were computed. Representative pressure contours are shown in the developed surfaces in the upper part of Fig. 4, and the distribution of pressure along the two principal boundary profiles are shown in the lower part. The boundary velocities increase almost monotonically, rapidly

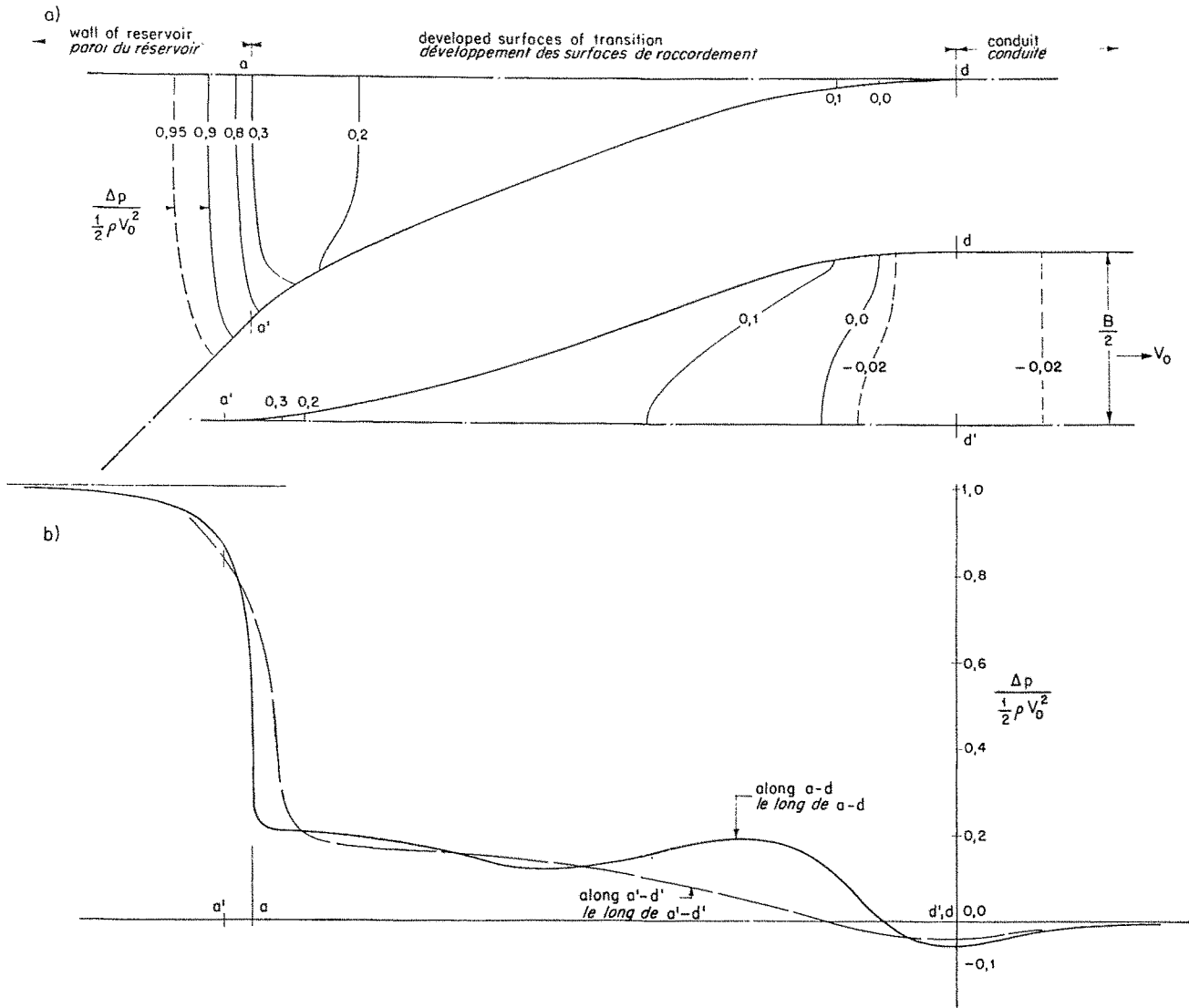


FIG. 4.

Distribution des pressions (a) dans le raccordement et (b) le long des principaux profils.

Distribution of pressure (a) throughout transition, and (b) along principal profiles.

C'est seulement près du point de raccordement aval que la vitesse maximum dépasse V_0 , vitesse moyenne dans la conduite, d'un faible pourcentage, si bien que la pression la plus basse est inférieure à celle de la conduite, de 6 % seulement de la pression dynamique ($\rho V_0^2/2$). Aussi, la vitesse à la paroi au point de raccordement aval est à peu près constante, et la valeur limite est atteinte dans une section assez proche de la conduite.

Ce type de raccordement peut être utilisé sur un grand barrage pour l'entonnement dans une conduite de section carrée, ou pour réaliser la section contractée d'un tunnel aérodynamique. Dans l'une et l'autre de ces applications il remplace avantageusement les raccordements clas-

near the upstream line of tangency and very gradually throughout most of the transition. The maximum velocity exceeds V_0 , the mean velocity in the conduit, by only a few percent near the downstream line of tangency, so that the lowest pressure is only 6 % of the dynamic pressure ($\rho V_0^2/2$) below that in the conduit. Also, the boundary velocity at the downstream line of tangency is almost constant and the limiting value is attained at a section which is only a short distance into the conduit.

This type of transition can be used for the inlet to a square conduit in a large dam, or for the contraction section in an air tunnel. In both applications it has advantages over conventional transitions. Even for conduits in

siques. Les pressions sont si légèrement négatives que, même pour les conduites dans lesquelles la vitesse de l'eau est très grande, la cavitation est tout à fait improbable.

Dans les raccordements du type classique où toutes les sections sont carrées et identiquement orientées, l'écoulement au voisinage des sommets présente des caractéristiques gênantes. Les pressions les plus basses se produisent dans cette zone, et la couche limite s'édifie beaucoup plus rapidement vers les sommets qu'ailleurs. Dans le cas des raccordements à section carrée renversée, le fluide près de la paroi ne reste pas dans les coins lorsqu'il s'écoule à travers le raccordement, car les lignes de courant voisines de la paroi sont légèrement inclinées par rapport aux sommets. La réalisation d'une vitesse constante au voisinage immédiat de l'origine de la section courante est à même d'augmenter la longueur utile de la section d'essai d'un tunnel aérodynamique. Aussi le raccordement à section carrée renversée convient-il aux tunnels aérodynamiques ayant une grande chambre de tranquillisation et un tronçon d'essai à section carrée.

On voit clairement les possibilités avantageuses de l'utilisation du raccordement proposé. Certaines de ces possibilités ont été montrées par des essais d'analogie, mais d'autres restent à mettre en évidence. Il faudrait faire des recherches sur la distribution des vitesses et la turbulence à l'aval de ce dispositif. Il conviendrait d'essayer diverses modifications du profil des courbes de transition. Il n'y a aucune raison de penser que la longueur, le coefficient de contraction et la pression minimum relevés sur le modèle représenté à la figure 2, constituent les meilleures valeurs pour un projet quelconque. Les formes essayées correspondent à un raccordement destiné à relier un très grand réservoir à une conduite, ou une grande chambre de tranquillisation au tronçon d'essai d'un tunnel aérodynamique. Peut-être peut-on mettre au point un raccordement semblable destiné à joindre une conduite quelconque à une conduite de section carrée plus petite.

Comme c'est souvent le cas, c'est en interrogeant le fluide lui-même qu'une bonne réponse a pu être obtenue. Les résultats de l'analogie électrique confirment clairement l'hypothèse initiale selon laquelle le raccordement à section carrée renversée constitue un progrès par rapport au raccordement à section carrée classique. Dans l'écoulement qui en résulte, les dépressions et les ralentissements sont très faibles, l'écoulement uniforme est rapidement atteint, et la croissance de la couche limite près du sommet est

which the velocity of the water is very high, cavitation is quite unlikely, because the pressures are so slightly negative.

For conventional transitions, in which all sections are square and similarly oriented, the flow near the corners has troublesome features. The lowest pressures occur in this region, and the boundary layer builds up much more rapidly in the corners than it does elsewhere. For flow through an inverted-square inlet, the fluid near the boundary does not remain in the corners as it flows through the transition, because the boundary streamlines are inclined at a small angle to the corners. The achievement of a constant velocity almost at the entrance to the parallel section would increase the useful length of the test section in an air or water tunnel. Hence, the inverted-square inlet is proposed for tunnels with a large stilling chamber and a square test section.

The possible advantages in the use of the proposed transition are clear. Some have been demonstrated by the analog tests, but others remain to be substantiated. An investigation of the distribution of velocity and turbulence downstream from such a transition is to be made. Various modifications of the proportions of the transitions of the profile curves should be tested. There is no reason to believe that the length, contraction ratio, and minimum pressure of the form depicted in Fig. 2 are optimum for every design. Also, the form tested is for a transition from a very large reservoir to a conduit or from a large room to the test section of an air tunnel. Perhaps a comparable transition from any conduit to a smaller square one can be developed.

As is often the case, a good answer has been obtained by asking a question of the fluid. Results from the electric analogy clearly support the original belief that the inverted-square transition is an improvement over conventional square ones. For the resulting flow, negative pressures and decelerations are very small, uniform flow is quickly achieved, and the growth of the boundary layer in the corner is reduced and distributed. Consequently, use of this transition reduces the likelihood of both cavitation and separation for large square conduits,

réduite et répartie. Par conséquent, l'adoption de ce raccordement réduit les risques de cavitation et de décollement pour les grandes conduites de section carrée, et il est permis de penser qu'il permettra d'obtenir des caractéristiques d'écoulement meilleures dans le tronçon d'essai d'un tunnel aérodynamique.

John S. McNOWN (**)
et S. C. LING (***)

(**) Professeur de Mécanique à l'Université de Michigan, précédemment Directeur adjoint de l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa.

(***) Underwood Corp., précédemment Research Assoc., Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa.

and can be expected to provide better flow characteristics in the test section of an air or water tunnel.

RÉFÉRENCES — REFERENCES

- [1] AMBROSE, H. H., M. S. Thesis, Case Inst. of Tech.
[2] HUBBARD, P. G., and LING, S. C., "Hydrodynamic Problems in Three Dimensions," *Trans. A.S.C.E.*, vol. 118, 1953.

(**) Prof. Eng. Mech., U. of Michigan, formerly Assoc. Dir., Iowa Inst. Hydr. Res.

(***) Research Assoc., Iowa Inst. Hydr. Res.

