

Ressaut hydraulique avec recirculation*

Paolo Mele et Mario Viti

Institut Hydraulique de l'Université de Rome

traduit par Jacques Bonnin

Electricité de France

La présente communication a pour objet l'examen du comportement du ressaut hydraulique lorsqu'il est combiné à une recirculation secondaire du courant principal.

Pour cet examen, à caractère préliminaire, il est utile de rappeler la méthode d'approche, associée à la relation bien connue de Bélanger. Cette relation repose essentiellement sur l'application du théorème des quantités de mouvement à un volume de contrôle limité à l'écoulement principal de fluide incompressible entre deux sections transversales, respectivement à l'amont et à l'aval du ressaut (en supposant que la direction de l'écoulement est horizontale et que les sections transversales lui sont perpendiculaires) ; on utilise de plus les hypothèses simplificatrices bien connues, conduisant en particulier à négliger les débits de quantités de mouvement correspondant à l'agitation, l'action de l'entraînement, etc.⁽¹⁾

En particulier, le fait de négliger l'action de l'entraînement fait que les résultats ne doivent pas dépendre du choix des conditions aux limites, des cotes de surfaces libres, ni des vitesses à l'intérieur du volume de contrôle considéré et, chose plus significative, que la relation obtenue doit rester valable pour les formes les plus variées de ressaut (ressaut ondulé, faible, oscillant, etc.) même en présence de phénomènes qui mo-

difient de façon évidente les formes elles-mêmes, tels que l'entraînement d'air, le développement de rouleaux, l'augmentation plus ou moins sensible de la turbulence, la formation de dards pénétrant dans le corps de la masse fluide ralentie, la propagation vers l'aval de trains d'ondes, etc.

Il est vrai que des recherches approfondies ont été effectuées, soit pour examiner l'adéquation de la relation de Bélanger, soit pour prendre en compte certaines des circonstances mentionnées ci-dessus, soit enfin pour étudier les causes mécaniques de la diversité des comportements sur laquelle nous avons mis l'accent. Un autre aspect très réel du problème concerne les projets de structures où sera localisé le ressaut hydraulique ; on est donc alors intéressé non seulement par les conditions des sections amont et aval de l'écoulement dont on a parlé, mais aussi par les aspects dynamiques du passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial. Il est alors avantageux d'en chercher la solution en tenant compte des données caractéristiques tirées des classifications, des illustrations et des exemples qui figurent dans l'abondante littérature sur le sujet, qui se fonde sur les multiples résultats expérimentaux recueillis par les spécialistes à l'occasion de travaux de recherches approfondies effectuées pendant de nombreuses années.

Ces recherches concernent par exemple :

- l'introduction dans un bassin de tranquillisation "d'accessoires" tels que des seuils de dimensions et de formes extrêmement variées, continus ou indentés, de blocs-brise-jets, d'alvéoles approfondis, car toutes ces structures et d'autres encore peuvent être utilisées pour "fixer" le ressaut, c'est-à-dire le rendre stable dans un domaine satisfaisant de débits et de charges amont, en empêchant son glissement vers l'aval ;
- l'amortissement des ondes qui ont tendance à se propager vers l'aval ;

(*) Communication présentée au 3^e Congrès National de l'Association Italienne de Mécanique Théorique et Appliquée (Cagliari, 13-16 Octobre 1976).

(1) L'application du théorème des quantités de mouvement pour l'obtention de la relation de Bélanger suppose en particulier que, dans les sections amont et aval du ressaut, les vitesses sont uniformes et parallèles au fond. La description des écoulements secondaires que donnent plus loin les auteurs montre qu'il n'en est rien. De plus, le prélèvement et l'injection du débit de recirculation contribuent eux aussi à invalider cette hypothèse (N.d.T.).

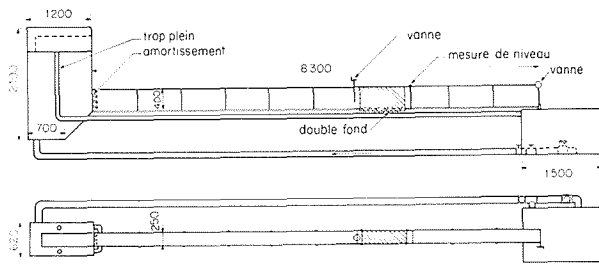


Figure 1. - Canal d'expériences

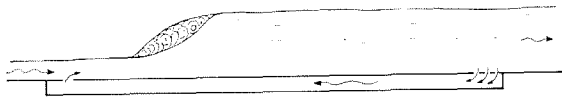


Figure 2. - Double fond

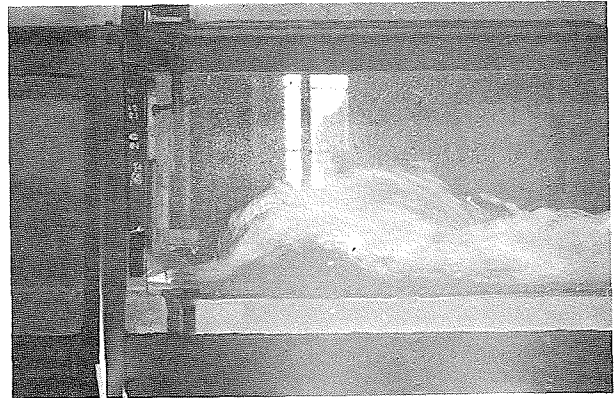
- ainsi que la suppression des affouillements à la base des ouvrages qui constituent le bassin de tranquillisation, etc.

Toujours dans le but de modifier le comportement dynamique du ressaut hydraulique, Teh-Yu Kao a proposé en 1971 l'adoption d'un accessoire de type nouveau, basé essentiellement sur l'impact de jets liquides transversaux à l'écoulement qui va être le siège du ressaut. Dans une solution envisagée par cet auteur, ces jets sont alimentés par le bassin même d'où provient l'écoulement torrentiel donnant naissance à ce ressaut, et viennent perturber le ressaut lui-même. En fait, la masse fluide supplémentaire mise ainsi en circulation superpose au schéma originel un nouveau débit de quantités de mouvement qui vient modifier aussi bien les grandeurs caractéristiques des sections internes de celui-ci intéressées par le ressaut, que celles des sections extrêmes utilisées dans la relation de Bélanger. La mise en équation se base sur l'application du théorème des quantités de mouvement, telle que l'a faite Kao lui-même⁽²⁾.

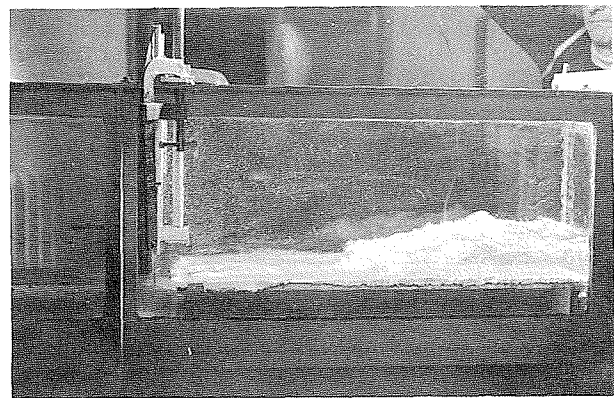
Il faut noter qu'en ce qui concerne l'opportunité de substituer ce nouveau type d'accessoire aux dispositifs conventionnels, les opinions ont jusqu'ici divergé ; l'apport le plus récent est pour le moment une intervention de Wilson, relative à une série de recherches

(2) En principe, seules les projections des quantités de mouvement sur la direction générale de l'écoulement interviennent pour l'établissement des formules de ressaut ; les quantités de mouvement injectées par recirculation n'interviendraient pas dans le bilan, si cette injection était bien perpendiculaire à l'écoulement. L'injection par le haut permet de respecter cette condition ; l'injection latérale ou par le fond nécessiterait des tubulures d'injection suffisamment longues et bien perpendiculaires à l'écoulement.

Même dans ce cas, l'effet de modification de la répartition des vitesses juste en amont du ressaut est, à lui seul, de nature à modifier les caractéristiques de ce dernier (N.d.T.).



(a)



(b)

Ressaut hydraulique avec recirculation (a) et sans recirculation (b). Les conditions d'écoulement amont et aval sont les mêmes dans les deux cas. Le nombre de Froude à la sortie de la vanne est $F = 5,9$.

concernant ce type d'accessoire, où il montre quelques résultats favorables à son emploi.

D'un autre côté, à l'Institut d'Hydraulique de Rome, les auteurs de la présente communication ont effectué récemment des travaux préliminaires pour examiner la possibilité de modifier les caractéristiques d'un ressaut hydraulique en y augmentant l'entraînement d'air. Les résultats de ces travaux n'ont pas été extrêmement encourageants, mais pendant leur exécution est apparue la possibilité technique de modifier le ressaut en produisant par gravité le retour vers l'amont d'une partie de l'écoulement aval et en injectant ce débit dans l'écoulement torrentiel principal ; on profite pour cela de la différence de cotes de surface libre entre la section de prélèvement et celle de restitution, suivant le schéma simple que montre la figure 2.

De cette manière on peut injecter dans le courant principal des jets transversaux plus ou moins inclinés par rapport à l'axe de cet écoulement, ou également réaliser une diffusion continue. Autrement dit, on peut agir par le moyen de cette injection, soit sur un ressaut naturel, soit sur un ressaut forcé, en combinant dans le dernier cas l'effet de ce nouvel accessoire avec

ceux de type classique (seuil, approfondissement, etc.).

Il est également possible d'effectuer cette injection autrement que par le fond, soit par les parois du canal, avec le souci toutefois de la réaliser au-dessous de la surface libre, soit à la partie supérieure de cette surface, l'injection se faisant dans ce dernier cas sous forme de pluie ; les effets prévisibles varient bien entendu d'un cas à l'autre. Des expériences préliminaires ont déjà été réalisées dans ce sens à l'Institut d'Hydraulique de Rome, et sont décrites dans ce qui suit.

Les expériences en question ont été effectuées dans un canal de section rectangulaire (largeur 0,25 m — longueur totale 8,30 m) muni de parois et de fond en verre, excepté sur un tronçon de longueur 0,80 m pour lequel la paroi et le fond ont été réalisés en métal, pour les raisons qui apparaîtront par la suite.

Le canal est alimenté en circuit fermé ; du bassin de décharge aval l'eau est envoyée par une électro-pompe dans un bassin d'alimentation amont muni d'un déversoir à la cote 1,60 m par rapport au fond (horizontal) du canal. Cette hauteur importante a pour but de rendre le dispositif peu sensible aux inévitables variations de débit de l'électro-pompe, qui se traduisent par de faibles variations de charge sur le seuil du déversoir. Un système de by-pass permet de faire varier à volonté le débit dans le canal. Comme on l'a déjà souligné, nos expériences se sont limitées au cas où le fluide de recirculation est injecté dans l'écoulement torrentiel par le fond du canal lui-même. Dans ce but le dispositif expérimental est muni d'un double fond dans le tronçon spécial métallique, de sorte que dans l'intervalle ainsi ménagé le courant de recirculation puisse s'écouler de l'aval vers l'amont. Dans la paroi supérieure de cet intervalle (plan qui est à la même cote que le reste du canal) sont pratiqués les orifices de prise d'eau et d'injection. La prise, située à l'aval de l'injection était constituée de trois rangées de trous circulaires⁽³⁾, tandis que l'injection s'effectuait par une fente transversale de 10 mm de largeur. La distance de cette fente à l'axe du système de trous aval est de 640 mm⁽⁴⁾. D'autre part les parois métalliques de ce tronçon sont munies également d'un double fond pour effectuer des essais d'alimentation latérale (mais ces essais n'ont pas encore été commencés).

Une vanne plane verticale mobile obture partiellement le canal, peu en amont du tronçon d'essai, et donne naissance à son pied à l'écoulement torrentiel. La hau-

teur maximale de retenue par rapport au fond du canal est de 350 mm. D'autre part une autre vanne plane verticale, déversante, placée à l'extrémité aval du canal, permet d'obtenir l'écoulement fluvial qui doit localiser le ressaut.

On a effectué trois paires d'expériences correspondant chacune à une ouverture différente de la vanne amont, et par suite à un débit différent dans l'écoulement torrentiel. La première expérience de chaque paire correspond à un ressaut normal, c'est-à-dire sans recirculation. Elle a été effectuée en substituant à la plaque du fond munie de fentes et de trous, une plaque non perforée. La seconde expérience de chaque paire correspondait au contraire au ressaut avec recirculation, c'est-à-dire avec fentes à l'amont et trous à l'aval de la plaque de fond.

Le but de ce schéma expérimental était d'obtenir une comparaison entre un ressaut normal et un ressaut avec recirculation, toutes choses égales d'ailleurs. Dans ce but la position de la vanne aval, qui a pour rôle de contrôler l'écoulement fluvial, aurait dû être à la même cote dans les deux expériences de chaque paire, mais dans la pratique on a vu qu'il convenait de sacrifier cette dernière condition afin de rendre la comparaison plus significative, pour les raisons qui vont apparaître dans ce qui suit⁽⁵⁾.

Dans la première paire d'expériences, la charge totale amont par rapport au fond du canal était de 119 mm. Le tirant d'eau de l'écoulement torrentiel dans la section contractée était de 19 mm et le nombre de Froude de 3,3. En l'absence de recirculation, le pied du ressaut se trouvait à 20 mm en aval de la vanne en moyenne (valeur peu précise à cause des fluctuations et des jaillissements au pied lui-même). Lorsque nous sommes passés au ressaut avec recirculation, en maintenant inchangées, comme dit plus haut, les positions des vannes aval et amont, nous avons constaté une instabilité du nouveau ressaut : de fait sur son front il se formait une intumescence qui atteignait une hauteur assez importante et avait tendance à déferler vers l'amont avec un fort entraînement d'air ; la configuration évoluait alors vers l'état primitif ; elle était suivie d'un train d'ondes se déplaçant vers l'aval. Pour cette raison, dans cette première phase de la recherche, nous n'avons pas voulu prendre en considération cette forme spéciale de ressaut que nous avons appelée "en panier" et avons préféré abaisser la vanne aval faisant évoluer le ressaut (toujours avec recirculation et charge amont inchangée), de sorte que le nouveau pied se trouve à environ 375 mm de la paroi amont. Dans cette nouvelle position la formation du "panier" était exclue : le ressaut avait une apparence normale, mais se différenciait par plusieurs caractéristiques de celui obtenu sans recirculation. En fait les longueurs des deux ressauts étaient respectivement de 346 mm sans recirculation et de 124 mm avec recirculation. Le tirant d'eau au pied du ressaut sans recirculation était de 19 mm tandis que dans l'autre cas il était de 27 mm, en remarquant que, (puisque la position des deux pieds ne coïncidait pas), la courbe de remous de l'écoulement torrentiel du ressaut sans recirculation donnait au pied du ressaut

(5) La modification indiquée par les auteurs modifie quelque peu le bilan des quantités de mouvement (N.d.T.).

(3) Le mode de réalisation de la prise entraîne un prélèvement de quantité de mouvements incidente, mais à une vitesse inférieure à la vitesse moyenne (prélèvement dans la couche limite) ; ceci est de nature à perturber l'écoulement aval (N.d.T.).

(4) La fente de ré-injection assure à l'amont du ressaut un débit de quantité de mouvements de signe opposé au débit incident, ce qui modifie le bilan dynamique et fait apparaître une épaisse couche limite sur le fond.

Pour pouvoir calculer les effets de la recirculation, il faudrait bien évidemment connaître son débit. Le calcul de ce débit présente trop d'éléments d'incertitude (répartition des vitesses au voisinage du fond dans l'écoulement principal, puis dans les organes de prélèvement et de restitution eux-mêmes, pertes par frottements dans le canal de recirculation) pour être fiable. L'analyse détaillée du dispositif nécessite donc la mesure de ce débit, et son utilisation peut en requérir le réglage (N.d.T.).

avec recirculation 22 mm au lieu de 27 mm effectivement mesurés. Cet écart était probablement dû à l'injection du courant de recirculation qui gonflait l'écoulement torrentiel avant le début du ressaut. La hauteur conjuguée aval est restée sensiblement la même pour les deux types de ressaut, soit 73 mm⁽⁶⁾.

Dans le ressaut sans recirculation de la deuxième paire d'expériences, la charge amont était de 168 mm, le tirant d'eau torrentiel à la sortie de la vanne de 17 mm, et le nombre de Froude de 4,2. Le pied du ressaut était à 137 mm de la vanne et le tirant d'eau correspondant de 18 mm ; la hauteur conjuguée était de 82 mm. Pour étudier le ressaut avec recirculation, il a fallu abaisser légèrement la vanne par rapport à la position du ressaut sans recirculation, toujours pour éviter la formation du ressaut avec panier, assez instable. En agissant de la sorte, le pied du nouveau ressaut s'est fixé à 250 mm de la paroi et le tirant d'eau y mesurait 22 mm. La hauteur conjuguée est restée de 82 mm comme dans le cas du ressaut sans recirculation. A la position correspondant au pied, s'il n'y avait pas eu de recirculation, on aurait mesuré une hauteur d'eau un peu supérieure à 18 mm en écoulement torrentiel. La longueur du ressaut est passée de 434 mm (sans recirculation) à 267 mm.

La troisième paire de relevés correspond à une charge amont égale à 282 mm avec une hauteur d'eau au pied de la vanne de 11 mm et un nombre de Froude égal à 7. La hauteur conjuguée était de 97 mm et le pied du ressaut se trouvait à environ 150 mm de la vanne. Dans le cas de la recirculation il n'a pas été nécessaire de changer la hauteur de la vanne aval, et par suite on a pu effectuer une comparaison assez significative. De celle-ci on peut déduire que, à la différence du cas où il n'y avait pas recirculation, l'écoulement avec recirculation admettait deux types de ressaut, suivant que leur pied se trouvait à l'amont ou à l'aval de la fente d'injection. Ces deux types étaient parfaitement stables et l'on pouvait passer de l'un à l'autre en faisant varier momentanément les conditions aval (par exemple en disposant un obstacle perturbant l'écoulement fluvial). Nous nous sommes arrêtés sur l'examen du ressaut qui a son pied à l'aval de la fente d'injection, précisément à 250 mm de la vanne. Le

(6) Il nous paraît fort judicieux de rechercher une configuration d'écoulement semblable à la configuration d'origine car c'est un moyen de minimiser les effets des écoulements secondaires, que l'on peut alors supposer comparables dans les deux cas (N.d.T.).

tirant d'eau au pied était alors de 16 mm ; notons que dans la même position l'écoulement torrentiel non perturbé aurait atteint un tirant d'eau peu supérieur à 12 mm (avec l'augmentation du nombre de Froude, la ligne de remous de cet écoulement devient plus tendue). La hauteur conjuguée est restée inchangée ; la hauteur du ressaut est passée de 465 mm en l'absence de recirculation à 362 mm avec recirculation.

Conclusion

De l'ensemble des essais et mesures rapportés ci-dessus il semble que l'on puisse conclure ce qui suit :

— Le prélèvement d'un débit dans la zone où la cote piézométrique est plus élevée, et son injection dans l'écoulement torrentiel amont, modifient sensiblement les caractéristiques du ressaut hydraulique. Les auteurs ne sont pas, pour l'instant, en mesure de fournir des indications précises relatives aux modifications ainsi introduites, ni même d'en donner une classification.

— Il est opportun d'orienter la recherche future avec une double optique. En premier lieu, pour le ressaut avec recirculation, il faut classer et expliquer mécaniquement les comportements ; il s'agit ici de traiter un problème d'hydraulique de base (mécanique des fluides). Dans une deuxième phase (problème d'hydraulique appliquée) on pourrait étudier les avantages que peut éventuellement présenter l'adoption de ce nouveau type de ressaut, spécialement en ce qui concerne les bassins de dissipation destinés aux équipements hydroélectriques.

— En rapport avec qui précède, apparaissent certains avantages de la méthode de recirculation par rapport à celle du jet provenant du bassin amont ; ces avantages sont liés à la proximité immédiate des sections de prélèvement et d'injection et à un certain automatisme des effets liés à ce fonctionnement.

— Enfin il serait intéressant de connaître le comportement du ressaut lorsque l'eau est injectée par les parois en même temps que par le fond du canal, ainsi que d'étudier la possibilité d'employer de façon utile, dans différentes applications hydrauliques, le principe de la recirculation dans des cas plus variés de ressaut, tels que l'élargissement brusque de la section d'un canal ou de celle d'un écoulement en charge.