

# Entraînement d'air par lame déversante

## *Air carried along by an overspill wave*

R. Rogala

Professeur à l'Ecole Polytechnique  
de Wrocław, Pologne

### Introduction

Le phénomène dont on s'occupe dans la présente étude concerne l'effet d'aspiration d'air par une nappe d'eau qui se déverse par dessus une vanne à clapet (Fig. 1) et qui, en tombant d'une certaine hauteur, entraîne des quantités d'air considérables.

L'air entraîné par la face supérieure de la nappe provient directement de l'atmosphère. Par contre, l'entraînement sous la face inférieure de la lame se traduit par une dépression dans le volume  $S$  lorsqu'il existe des piliers ou des culées latérales. Cette dépression peut provoquer des surcharges de la vanne supérieure à 30% [13] et des vibrations des structures susceptibles de causer de graves dommages.

Pour éviter que cette dépression n'existe, il suffit de permettre une entrée de l'air atmosphérique dans le volume  $S$ : le dimensionnement de la conduite correspondante nécessite donc la connaissance réelle du débit d'air entraîné par la lame.

Le problème de l'entraînement de l'air par un écoulement d'eau a fait l'objet de quelques travaux parmi lesquels nous pouvons citer ceux de Hickox [5], Kamenev [7], Levin [9] et Pontoni [11]. Dès les premières études expérimentales que nous avons réalisées à l'Ecole Polytechnique de Wrocław [12], il est apparu

des écarts importants avec les solutions proposées par ces auteurs, cela étant dû d'une part au cas particulier que constitue la lame déversante sur une vanne et d'autre part à l'effet d'échelle entre modèle réduit et ouvrage.

Le but de la présente étude est donc d'analyser le mécanisme d'entraînement de l'air par une lame déversante et de définir les paramètres qui jouent un rôle prépondérant dans ce processus.

Nous en déduisons une relation qui permet de déterminer le débit d'air entraîné.

### Analyse bibliographique

Le phénomène d'entraînement d'air par un écoulement d'eau existe dans beaucoup de systèmes hydrauliques :

- canaux à forte pente ;
- déversoirs de barrages ;
- vidanges de fond ;
- déversement au-dessus de vannes ;
- déversoirs en puits ;
- déversoirs en siphon ;
- bassins de dissipateurs d'énergie.

Les caractéristiques du phénomène sont différentes dans chacun des cas, et la plupart des études correspondantes ont eu pour but de définir la valeur du "coefficient d'aération" défini par :

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (1)$$

où  $Q_a$  est le débit d'air entraîné et  $Q_w$  le débit d'eau.

La forme la plus fréquente de cette formule est celle définie par Kalinske et Robertson [6] :

$$\beta = k(F - 1)^2 \quad (2)$$

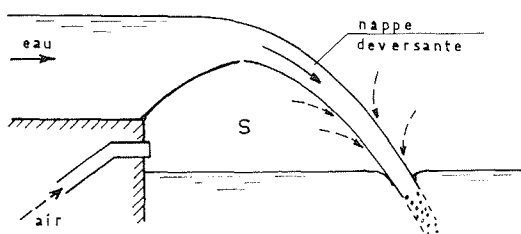


Figure 1 - Schéma du phénomène

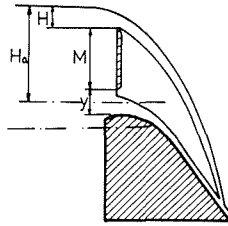


Figure 2 – Schéma de l'écoulement étudié par Hickox [5]

avec :

$k$  constante dont la valeur dépend du cas étudié,  $F$  nombre de Froude calculé dans la section contractée de l'écoulement,

$n$  exposant défini expérimentalement.

En ce qui concerne la lame déversante proprement dite, la première étude est due à Hickox [5]. A partir des essais réalisés sur modèle réduit et sur ouvrage, il a proposé une formule permettant le calcul du débit d'air nécessaire pour aérer l'espace compris entre les deux nappes d'eau correspondant à un fonctionnement simultané en déversoir et vanne de fond (Fig. 2) :

$$q_a = \frac{(CH_0)^{3,64} g^{0,5}}{p^{1,14}} \quad (3)$$

où :

$q_a$  débit d'air par unité de longueur,

$C$  paramètre caractérisant le degré d'ouverture de la vanne,

$H_0$  épaisseur de la nappe,

$g$  accélération de la pesanteur,

$p$  dépression sous la nappe, exprimée en hauteur d'eau.

(Si on utilise directement les valeurs de  $C$  données par Hickox, on doit exprimer toutes les longueurs en "foot").

On doit noter que cette relation ne fait pas intervenir la hauteur de chute de la lame, paramètre qui nous paraît cependant essentiel. Ce fait a été noté dans le commentaire joint à l'article de Hickox.

Une nouvelle méthode de calcul du débit d'air a été proposée par Levin [9], basée sur les résultats obtenus par Kamenev [7]. Ce dernier a étudié l'affouillement du sol sous une lame déversante de 0,20 m de large et environ 3 m de hauteur de chute. Il a mesuré la forme de la section droite de la lame et le "degré d'aération"  $A$  (Fig. 3) défini à partir du coefficient d'aération  $\beta$  par :

$$\beta = \frac{A}{1 - A} \quad (4)$$

La figure 4 montre l'évolution de la section droite de la nappe en fonction de la hauteur : initialement rectangulaire, cette section devient très rapidement en forme de fer à cheval (Fig. 4a). En même temps, la vitesse augmente et la nappe se disloque en un système de filets et de gouttes séparés (Fig. 4c).

Levin propose de calculer la quantité d'air entraînée en employant la relation (4), mais il recommande de diviser la valeur du coefficient d'aération par 2 pour tenir compte du fait que seul intervient le débit entraîné par la face inférieure de la nappe.

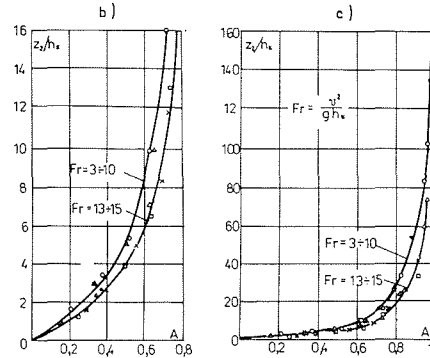
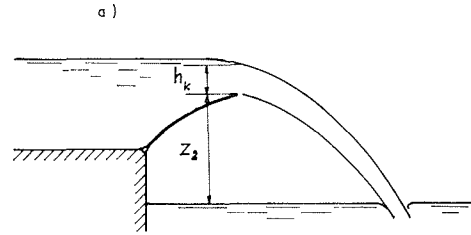


Figure 3 – Diagramme  $A = f(z_2/h_k)$  obtenu par Kamenev [7]  
a) Schéma de l'écoulement de Levin [9]  
b) et c) Résultats obtenus par Kamenev

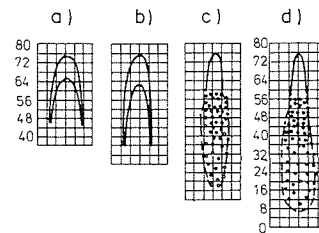


Figure 4 – Sections droites de l'écoulement étudié par Kamenev

Pontoni [11] a étudié le phénomène d'entraînement dans le cas d'une vanne à clapet de 0,30 m de largeur, la hauteur de chute de la lame étant d'environ 0,50 m. Ses résultats sont montrés sur la figure 5. Cependant, les dimensions utilisées et la gamme des débits concernés ne permettent pas de généraliser les résultats obtenus aux conditions réelles des ouvrages.

Nous citerons enfin la formule proposée par Ervine [3] dans le cas d'un déversoir en siphon :

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0,26 k \left(\frac{b}{p}\right) \left(\frac{H}{d}\right)^{0,446} \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \quad (5)$$

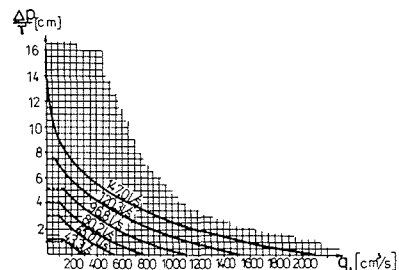


Figure 5 – Exemple de résultats obtenus par Pontoni [11]

avec :

- $k$  coefficient caractérisant la portion du périmètre de la nappe en contact avec l'atmosphère ambiante  
 $b, d, p$  respectivement : la largeur, l'épaisseur et le périmètre de la nappe  
 $H$  la hauteur de chute de la nappe d'eau (en mètre)  
 $V_0$  la vitesse limite à partir de laquelle le processus d'entraînement d'air commence (en m/s).  
 $V$  la vitesse de la nappe d'eau dans la section d'entrée dans le bief aval (en m/s).

Cette analyse bibliographique montre que les formules disponibles pour calculer l'entraînement d'air par un écoulement d'eau sont d'une part spécifiques du cas étudié et d'autre part ne se prêtent pas à leur application à d'autres conditions de fonctionnement.

Notre but a donc été d'analyser plus en détail le phénomène proprement dit d'entraînement de l'air et, par des essais sur différents modèles obtenir une relation générale applicable aux ouvrages réels.

### Réalisation des modèles expérimentaux

Les modèles expérimentaux ont été réalisés à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse où nous avons pu disposer d'un canal de 22 m de longueur et de section droite 0,60 m x 2,20 m, les débits pouvant atteindre 0,30 m<sup>3</sup>/s.

L'entraînement de l'air est causé par l'impact de la lame sur la surface libre du bief aval et se traduit par la formation de bulles. Leur dimension est pratiquement indépendante de l'échelle du modèle et des conditions d'écoulement [1] et [4] et par conséquent ne peut être modifiée par un effet d'échelle. Nous avons donc choisi de réaliser des modèles dans lesquels les conditions d'impact (vitesse) et d'écoulement aval (niveau de turbulence) sont les plus proches possibles des conditions d'ouvrages. En particulier, de précédents travaux [3] et [14] ont montré que lorsque la vitesse d'impact est trop faible, le phénomène d'entraînement présente un certain caractère aléatoire et il devient alors impossible de relier le débit d'air entraîné aux caractéristiques de la lame d'eau. Ce phénomène ne devient "stable" qu'à partir d'une certaine vitesse d'impact : 1,1 m/s pour Ervine et 3 m/s pour Sokolov. Nous avons donc choisi de réaliser tous nos essais à des vitesses d'impact supérieures à 3 m/s.

L'ouvrage de référence est une vanne à clapet de forme cylindrique, de 1,80 m de longueur de corde et correspondant à un tirant d'eau amont de 1,55 m en fonctionnement normal. Le modèle principal a été réalisé à l'échelle 1/3,5, la hauteur de chute étant réglée par la valeur du tirant d'eau dans le bief aval. Cependant, et pour mettre en évidence l'influence éventuelle de l'effet d'échelle, deux autres modèles ont été réalisés avec des rapports 1/4,5 et 1/6,5. L'ensemble de ces essais nous permettra d'obtenir des résultats généraux applicables non seulement au type de vanne considéré, mais à tout autre système comportant un effet d'impact. Notre but étant donc d'analyser le mécanisme d'entraînement dû à l'impact de la lame sur la surface libre, nous devons

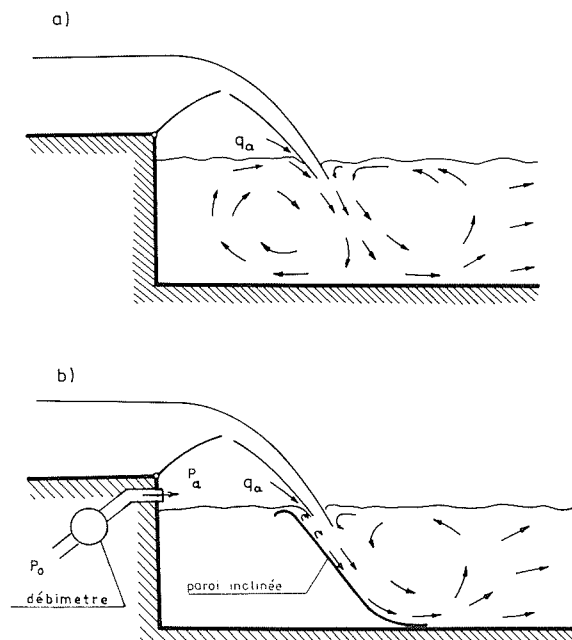


Figure 6 - Schéma d'écoulement

a) lame libre

b) lame déviée par une paroi inclinée

assurer une réaération normale mais connue du volume situé sous la lame. Pour réaliser ce double objectif, nous devons d'une part assurer une injection forcée d'air et d'autre part éviter un retour d'air par effet hydrodynamique.

Comme le montre en effet la figure 6a, l'impact de la lame se traduit par un jet eau-air dans le bief aval. Par effet visqueux et turbulent, ce jet provoque un rouleau de recirculation vers l'amont, rouleau qui ramène vers la zone située sous la lame une partie des bulles d'air. Ce débit d'air ne permet pas alors d'établir une relation correcte entre la dépression sous la lame et le débit d'air effectivement entraîné lors de l'impact. Comme d'autre part, et d'une façon générale pour les ouvrages, la forme du radier empêche ou tout au moins diminue beaucoup ce phénomène de recirculation, nous avons implanté sur les modèles une paroi inclinée (Fig. 6b) qui permet de canaliser le jet vers l'aval. De cette façon, le débit d'air nécessaire pour maintenir la pression sous la lame égale à la pression atmosphérique  $P_a$  ne viendra que de l'injection forcée. Cette dernière est nécessaire pour compenser les pertes de charge ( $P_0 - P_a$ ) dans le conduit de réaération et le débitmètre. A partir du réseau d'air comprimé du laboratoire, un détendeur permet de régler  $P_0$  dans chaque cas de fonctionnement. La mesure des débits d'air dans le conduit de réaération a été effectuée soit à l'aide de rotamètres, soit en utilisant directement un compteur volumétrique d'étalonnage.

### Analyse du mécanisme d'entraînement d'air

Cette analyse qualitative a été effectuée à partir de visualisations dont les photographies des figures 7 et 8 montrent des exemples. L'écoulement de l'air sous



Figure 7 – Illustration du mécanisme d'entraînement d'air (A)

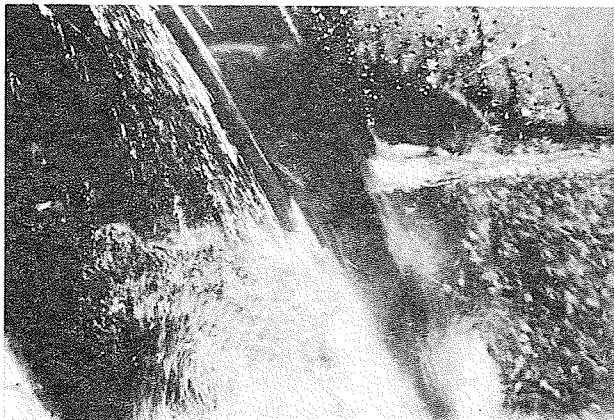


Figure 8 – Illustration du mécanisme d'entraînement d'air (B)

la lame a été matérialisé par la fumée provenant de la combustion de papier d'Arménie.

Dans cette région, la lame d'eau entraîne par effet visqueux les particules d'air voisines: une mince couche d'air se déplace donc parallèlement à la lame d'eau. Lorsque la vitesse dans cette dernière augmente, la surface de séparation eau-air présente des ondulations de plus en plus marquées et l'épaisseur moyenne de la couche d'air augmente.

Au moment de l'impact de la lame sur la surface libre, une part de la perte d'énergie cinétique de l'eau sert à vaincre les effets de tension superficielle: la couche d'air adjacente à la lame peut donc pénétrer dans l'eau du bief aval. Cette couche se disloque alors en bulles qui diffusent dans le jet d'eau selon le schéma de la figure 9. Sur une certaine longueur, la zone centrale du jet ne comporte que de l'eau tandis que les zones de mélange contiennent des micro-bulles. Ces zones de mélange se développent sous forme ondulée (Fig. 7) jusqu'à ce

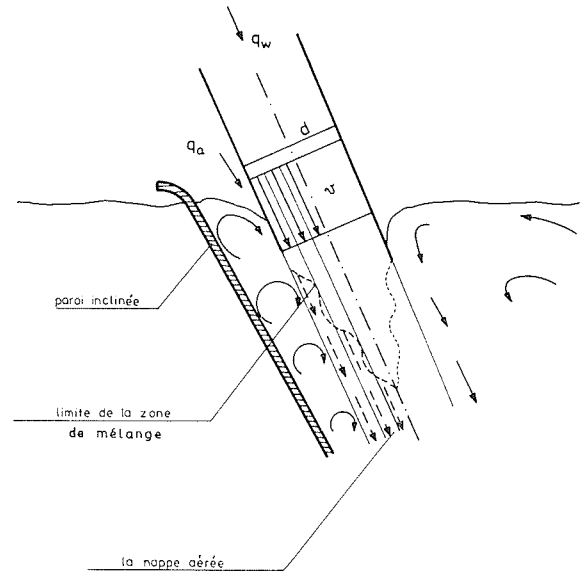


Figure 9 – Schéma du mécanisme d'entraînement d'air

qu'elles occupent la totalité de l'écoulement. Ce mécanisme est tout à fait analogue à celui qui apparaît dans un jet libre.

### Détermination de la vitesse d'impact

La vitesse d'impact est définie comme la vitesse  $V$  d'une particule d'eau de la lame dans la section d'impact avec la surface libre aval (Fig. 10).

Cette vitesse est la résultante de la composante horizontale  $V_1$  qui se trouve dans la section 1-1 et de la vitesse de chute libre  $V_2$  due à la différence d'altitude entre les points 0 et A, ce qui s'écrit :

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (6)$$

où :  $V_1 = q_w/h_1$

et :  $V_2 = \sqrt{2gy}$  (7)

Il résulte de la figure 10 que :

$$y = z + h_0 - \frac{V_1^2}{2g} - \frac{h_1}{2}$$

et la relation (6) devient :

$$V = \sqrt{2g(z + h_0 - 0,5 h_1)} \quad (8)$$

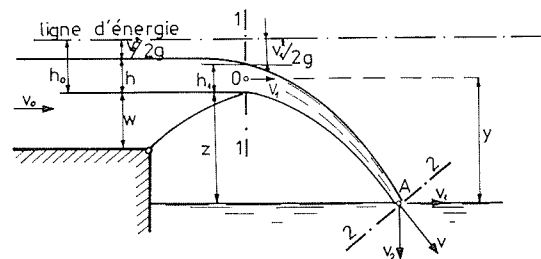


Figure 10 – Schéma d'écoulement pour le calcul de la vitesse  $V$

La détermination de  $h_1$  a été effectuée selon la méthode décrite en [2] dans le cas d'un déversoir à mince paroi, et on a obtenu :

$$h_1 = 0,714 h_0 \quad (9)$$

la relation (8) s'écrivant alors :

$$V = \sqrt{2g(z + 0,643 h_0)} \quad (10)$$

relation que nous mettons sous la forme :

$$V = \sqrt{2g h_c} \quad (11)$$

avec :

$$h_c = z + 0,643 h_0$$

### Elaboration d'une formule de structure par l'analyse dimensionnelle

A partir de l'analyse qualitative du phénomène que nous avons exposé dans les paragraphes précédents et des essais préliminaires que nous avons réalisés, nous pouvons déduire que les paramètres essentiels qui interviennent dans le mécanisme d'entraînement d'air sont (Fig. 11) :

- au niveau de la vanne :
  - $h_0$  charge totale
  - $w$  pelle
  - $q_w$  débit d'eau par unité de largeur
- au niveau de l'impact :
  - $V$  vitesse d'impact
  - $d$  épaisseur de la lame
  - $q_a$  débit d'air entraîné
  - $\nu$  viscosité cinématique de l'eau
  - $g$  accélération de la pesanteur.

Le débit d'air  $q_a$  peut donc se mettre sous la forme :

$$q_a = f_1(h_0, w, q_w, V, d, \nu, g) \quad (12)$$

Ces 8 variables ne dépendent que de deux grandeurs fondamentales ( $L$  et  $T$ ) : par application du théorème de Vaschy-Buckingham, on peut donc former six produits sans dimensions.

Nous choisissons  $q_w$  et  $d$  comme grandeurs de références. Cela permet d'écrire les produits adimensionnels suivants :

$$\pi_1 = \frac{q_a}{q_w} \quad \pi_2 = \frac{gd^3}{q_w^2} \quad \pi_3 = \frac{Vd}{q_w}$$

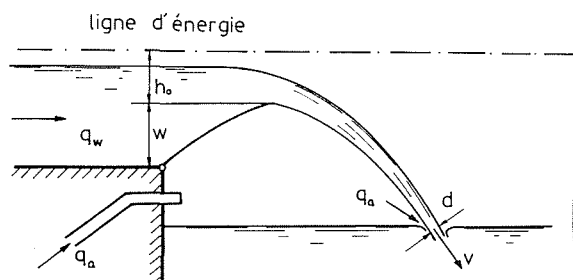


Figure 11 - Schéma d'écoulement pour l'analyse dimensionnelle

$$\pi_4 = \frac{\nu}{q_w} \quad \pi_5 = \frac{h_0}{d} \quad \pi_6 = \frac{w}{d}$$

et la relation (12) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{q_a}{q_w} = f_2\left(\frac{gd^3}{q_w^2}, \frac{Vd}{q_w}, \frac{\nu}{q_w}, \frac{h_0}{d}, \frac{w}{d}\right) \quad (13)$$

Le rapport  $q_a/q_w$  est le coefficient d'aération  $\beta$ . D'autre part, l'équation de continuité donne la relation :

$$q_w = Vd$$

qui, compte tenu de (11) peut aussi s'écrire :

$$d = \frac{q_w}{V} = \frac{q_w}{\sqrt{2g h_c}}$$

Nous pouvons ainsi faire apparaître les nombres adimensionnels classiques  $F_r$  (nombre de Froude) et  $R_e$  (nombre de Reynolds), ainsi qu'un nombre relatif au fonctionnement de la vanne en effectuant les combinaisons suivantes :

$$\pi'_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi_2}} = \frac{q_w}{\sqrt{gd^3}} = \frac{Vd}{d\sqrt{gd}} = F_r$$

$$\pi'_4 = \frac{1}{\pi_4} \pi_5 = \frac{q_w}{\nu} \frac{h_0}{d} = \frac{Vdh_0}{\nu d} = \frac{Vh_0}{\nu} = R_e$$

$$\pi'_6 = \pi_5 \frac{1}{\pi_6} = \frac{h_0}{d} \frac{d}{w} = \frac{h_0}{w}$$

Il faut remarquer que le nombre de Reynolds défini ci-dessus dépend à la fois de la charge  $h_0$  sur la vanne (c'est-à-dire de  $q_w$ ) et de la vitesse d'impact  $V$  (c'est-à-dire de la hauteur de chute  $h_c$ ). Cette définition est donc différente de celle qui est habituellement utilisée et qui ne fait dépendre  $R_e$  que de  $q_w$ . Avec cette nouvelle définition de  $R_e$ , nous avons pu prendre en compte l'effet spécifique de la hauteur de chute sur le coefficient d'aération.

Enfin, il est logique d'admettre que le comportement de l'écoulement au niveau de l'impact ne peut réagir en retour sur le déversement par dessus la vanne pris en compte par  $\pi'_6$ . Nous pouvons donc éliminer le produit  $\pi_5$ .

Comme d'autre part, l'équation de continuité donne  $\pi_3 = 1$ , on obtient la formule de structure du phénomène d'entraînement d'air par la lame sous la forme générale :

$$\beta = f_3\left(F_r, R_e, \frac{h_0}{w}\right) \quad (14)$$

les nombres de Froude et de Reynolds s'expriment respectivement par :

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gd}} = \left(\frac{8gh_c^3}{q_w^2}\right)^{0,25} \quad (15)$$

$$R_e = \frac{Vh_0}{\nu} = \frac{\sqrt{2gh_c} h_0}{\nu} \quad (16)$$

**Formule de structure développée. Résultats expérimentaux**

Pour préciser quantitativement la formule de structure (14), nous avons réalisé des mesures sur trois modèles, dans les gammes suivantes de variation des paramètres adimensionnels :

- modèle I (échelle 1/3,5)
  - $3,6 < Fr < 8,06$
  - $6,7 \cdot 10^5 < Re < 16,6 \cdot 10^5$
- modèle II (échelle 1/4,5)
  - $3,12 < Fr < 9,07$
  - $4,9 \cdot 10^5 < Re < 14,4 \cdot 10^5$
- modèle III (échelle 1/6,5)
  - $3,39 < Fr < 12,5$
  - $3,4 \cdot 10^5 < Re < 11,2 \cdot 10^5$

La figure 12a dans laquelle une échelle logarithmique est utilisée pour  $Fr_r$  montre les résultats relatifs au modèle I. On constate que pour des valeurs constantes de  $h_0/w$ , la relation  $\beta(Fr_r)$  est bien représentée par une droite, ce qui correspond à :

$$\beta = \varphi \left( \frac{h_0}{w} \right) \cdot Fr_r^b \quad (17)$$

L'influence de  $h_0/w$  est représentée sur la figure 12b, et on a :

$$\varphi \left( \frac{h_0}{w} \right) = K_0 \cdot \left( \frac{h_0}{w} \right)^a \quad (18)$$

Les relations (17) et (18) donnent ainsi :

$$\beta = K_0 \left( \frac{h_0}{w} \right)^a Fr_r^b \quad (19)$$

De même, les résultats relatifs à l'influence du nombre de Reynolds sont montrés sur les figures 13a et 13b, et on obtient :

$$\beta = K_1 \left( \frac{h_0}{w} \right)^c Re^d \quad (20)$$

Éliminons alors  $(h_0/w)$  entre les relations (19) et (20). On obtient :

$$\beta = A Fr_r^M Re^K \quad (21)$$

les exposants  $M$  et  $K$  s'exprimant en fonction de  $a, b, c, d$ .

Cette relation correspond à la formule de structure (14) si  $h_0/w$  a très peu d'influence sur  $\beta$ . Pour vérifier cela, nous avons appliqué la formule (21) à chacun des points expérimentaux et déterminé les valeurs de  $A, M$  et  $K$  par une méthode des moindres carrés. On a ainsi obtenu un coefficient de corrélation de 0,95 et une erreur relative moyenne inférieure à 0,64 %.

En définitive, le coefficient d'aération relatif au

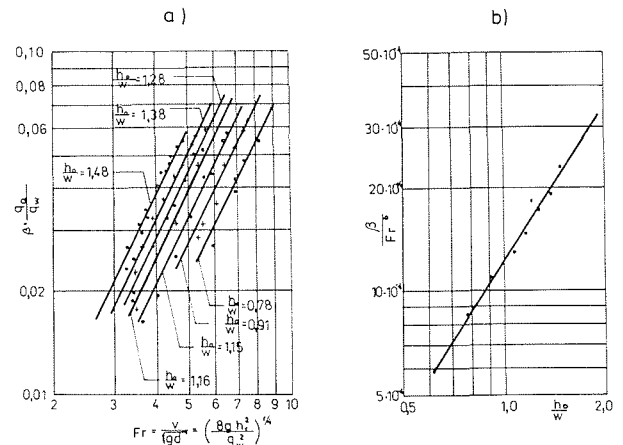


Figure 12 - Exemple de résultats obtenus dans la présente étude (Modèle à l'échelle 1/3,5) : a)  $\beta = k_0 (h_0/w) \cdot Fr_r^b$  b)  $k_0 = k_1 (h_0/w)^a$

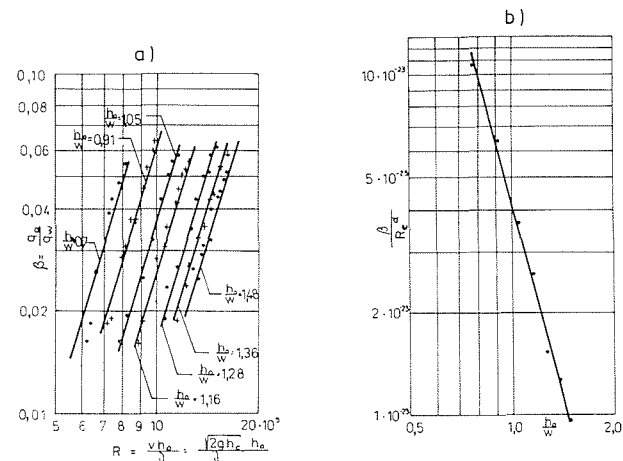


Figure 13 - Exemple de résultats obtenus dans la présente étude (Modèle à l'échelle 1/3,5) : a)  $\beta = k (h_0/w) \cdot Re^d$  b)  $\beta = k_2 (h_0/w)^c$

modèle I s'écrit :

$$\beta = 0,78 \cdot 10^{-9} Fr_r^{1,51} Re^{1,1} \quad (22)$$

L'effet d'échelle entre les différents modèles a été évalué en comparant les valeurs données par (22) aux résultats expérimentaux obtenus sur les modèles II et III. L'écart obtenu est inférieur à 25 % [15]. Cet écart, qui peut paraître important, est essentiellement dû à la difficulté de maintenir correctement la pression atmosphérique sous la lame, difficulté qui provient de l'instabilité naturelle de l'impact de la lame sur la surface libre. L'analyse réalisée par Markofsky [10] et les résultats obtenus dans le cas d'une vanne de fond [8] aboutissent à des écarts du même ordre de grandeur.

$q_w$ [m <sup>2</sup> /s]	$h$ [m]	$z$ [m]	$d$ [m]	$\rho$ [m]	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_2/\beta_1$	$\beta_3/\beta_1$
0,48	0,346	0,47	0,120	2,54	0,02386	0,210	0,0583	8,8	2,4
0,48	0,346	0,94	0,096	2,54	0,05584	0,409	0,0853	7,3	1,5
0,183	0,192	0,68	0,044	2,28	0,028	0,54	0,1234	19,3	4,4
0,183	0,192	1,09	0,037	2,28	0,05578	0,81	0,177	14,5	3,2

Il est intéressant de comparer les résultats donnés par la relation (22) avec ceux obtenus à partir de (4) (Levin) et (5) (Ervin). Le tableau ci-dessus donne les valeurs correspondantes (respectivement  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  et  $\beta_3$ ) calculées avec les conditions extrêmes de fonctionnement du modèle I dont les dimensions sont proches de celles d'un ouvrage réel. L'examen de ces valeurs montre d'une part que  $\beta_2$  et  $\beta_3$  sont systématiquement plus élevés que  $\beta_1$  et que d'autre part les rapports  $\beta_2/\beta_1$  et  $\beta_3/\beta_1$  varient beaucoup. Cela montre que les relations proposées par Levin et Ervin ne peuvent pas traduire correctement l'entraînement d'air par une lame déversante.

## Conclusions

Sur la base de l'étude qualitative du phénomène d'entraînement d'air par une lame déversante et de l'application de l'analyse dimensionnelle, nous avons obtenu une relation entre le coefficient d'aération d'une part, les nombres de Froude et de Reynolds d'autre part. L'expression de ces deux nombres montre qu'interviennent uniquement les caractéristiques de la lame au moment de l'impact et la charge (ligne d'énergie) sur le système qui crée cette lame déversante. Ainsi, même si le calage de cette relation a été effectué sur un modèle de vanne à clapet, elle doit cependant demeurer valable dans tous les écoulements mettant en jeu l'impact d'une lame sur une surface libre.

Cette relation permet de calculer le débit d'air nécessaire pour assurer la réaération complète (pression égale à la pression atmosphérique) du volume situé sous la lame. En réalité, nous avons montré dans une précédente étude [12] que l'on peut tolérer une légère dépression dans cette zone, une valeur de 0,17 hPa provoquant une surcharge de l'ordre de 1 % des contraintes sur la vanne. La réalisation de cette condition de pression [15] sur le modèle a montré une diminution du coefficient d'aération et donc du débit d'air nécessaire, d'environ 20 %. Toutefois, il nous semble préférable d'effectuer les calculs de dimensionnement des conduits d'amenée d'air en supposant une réaération complète, l'augmentation correspondante du diamètre n'ayant que peu d'incidence sur le coût de l'ensemble de l'ouvrage.

Sur un plan plus général, la présente étude peut constituer un premier pas de l'analyse du comportement dynamique des lames aérées. Leur instabilité est en effet source de vibrations et de forces de pression non permanentes qui imposent un surdimensionnement

des ouvrages. Une étude approfondie du couplage dynamique entre la lame et le volume d'air sous-jacent paraît donc nécessaire.

Cette étude a été réalisée à l'Institut de Mécanique des fluides de Toulouse. Nous tenons à remercier Monsieur le Professeur Nougaro qui a bien voulu nous accueillir dans ce laboratoire, et en la personne de Messieurs les Professeurs Castex et Gruat, l'ensemble des personnes qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

## Bibliographie

- [1] AVERY S.T., NOVAK P. – Oxygen transfer at hydraulic structures. *Proceedings of ASCE*. Vol. 104, n° HY11, Nov. 1978, pp. 1521-1539.
- [2] BOYER P., CASTEX L., NOUGARO J. – Pression et vitesses dans une lame déversant sur un seuil en mince paroi. *La Houille Blanche*, n° 1/1971, pp. 49-58.
- [3] ERVIN D.A. – The entrainment of air in water. *Water Power and Dam. Constr.*, No. 12/1976, pp. 23-30.
- [4] HAINDL K. – Hydraulic Jump in closed Conduits. *Proc. of 7th congress of the IAHR*. Lisbon 1957.
- [5] HICKOX G.H. – Aeration of spillways. *Transactions American Society of Civil Engineers*. Vol. 109, 1944, pp. 537-566.
- [6] KALINSKE A.A., ROBERTSON J.M. – Transactions of the symposium on Entrainment of Air in Flowing Water. *ASCE*, Vol. 108, 1943.
- [7] KAMENEV J.A. – Aération d'une nappe d'eau en chute libre (en russe). *Construction hydrotechnique*, n° 8, 1964, pp. 45-49.
- [8] KOSINSKI J. – Entraînement d'air par un écoulement en vidange de fond (en polonais). Institut de Géotechnique. Ecole Polytechnique de Wroclaw. *PRE*, n° 52, Wroclaw 1979 (dissertation).
- [9] LEVIN L. – Calcul hydraulique des conduits d'aération des vidanges de fond et dispositifs déversants. *La Houille Blanche*, n° 2/1965, pp. 121-126.
- [10] MARKOFISKY M., KOBUS H. – Unified presentation of weir-aeration data. *Proceedings of ASCE*, vol. 104, n° NY4, April 1978, pp. 562-568.
- [11] PONTONI K.J. – Entraînement d'air par une nappe déversante sur une vanne. *Trav. 3.31, II<sup>e</sup> Congrès des Hydrauliciens d'Amérique Latine*, Juillet 1966, Caracas.
- [12] ROGALA R. – *Essais sur modèle réduit d'une vanne à clapet à Bochotnica* (en polonais). Ecole Polytechnique de Wroclaw, Janvier 1965.
- [13] ROGALA R. – Augmentation de la charge d'une vanne à clapet provoquée par le manque d'aération de l'espace sous la nappe (en polonais). *Session scientifique de la Faculté de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique de Wroclaw*. Octobre 1968.
- [14] SOKOLOV W.G. – L'influence de l'aération de l'écoulement sur le couplage des biefs lorsqu'il existe un ressaut (en russe). *Les Travaux du Laboratoire d'Hydraulique "Vodgeo"*. Moscou 1959.
- [15] ROGALA R. – *Aération d'une lame déversante* (en polonais). Ecole Polytechnique de Wroclaw (à paraître).