Société
Hydrotechnique de France
Groupe de Travail n° 10 :
Section Machines

ENQUÊTE SUR LA FORMATION DE VORTEX ET AUTRES ANOMALIES D'ÉCOULEMENT DANS UNE ENCEINTE AVEC OU SANS SURFACE LIBRE

PAR J.-P. BERGE *

Sommaire

1. INTRODUCTION.
2. BUTS DE LA PRÉSENTE ENQUÊTE.
3. CONDITIONS DE FORMATION DE VORTEX.
 - 3.1. Introduction.
 - 3.2. Variation des conditions hydrauliques.
 - 3.3. Variation des formes géométriques.
4. AUTRES ANOMALIES D'ÉCOULEMENT.
 - 4.1. Introduction.
 - 4.2. Torche tourbillonnaire sous la tulipe de la prise.
 - 4.3. Bulles et torches, chambre d'aspiration de la pompe de circulation de la centrale des Ansereuilles.
5. DISPOSITIFS ANTI-VORTEX.
 - 5.1. Introduction.
 - 5.2. Dispositifs anti-vortex.
 - 5.3. Autre dispositif anti-vortex : le dispositif de grilles latérales en métal déployé.
6. SIMILITUDE DES VORTEX.
 - 6.1. Remarques préliminaires.
 - 6.2. Principaux critères.
 - 6.3. Impossibilité de la réalisation d'une similitude complète.
 - 6.4. Similitudes proposées.
 - 6.5. Principaux résultats obtenus au Centre d'Essais et Recherches de Chatou sur la similitude des vortex.

7. CONCLUSION.

8. DISCUSSION DU RAPPORT PAR LA SECTION MACHINES.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE.

ANNEXE : FICHES (renseignements fournis pour l'enquête) :

Catégorie I :

Vidange par gravité,
Classe A : Prises ordinaires,
Classe B : Siphons;

Catégorie II :

Vidange forcée,
Classe A : Verticale descendante,
Classe B : Verticale ascendante;

Catégorie III :

Autres anomalies,
Classe A : Torches,
Classe B : Bulles-torches.

1. Introduction

Dans certains ouvrages hydrauliques, des mouvements tourbillonnaires assez importants peuvent se produire lorsque l'eau passe d'un état d'écoulement à surface libre à un écoulement en charge. En outre, d'autres anomalies (torches tourbillonnaires notamment) sont quelquefois observées au sein même d'écoulements en charge.

Dans le cas d'une surface libre, et sur cette surface, les tourbillons peuvent quelquefois s'amplifier, créant en un point une sorte d'entonnoir ou

* Electricité de France.

vortex. Le cas échéant, un entraînement d'air se produit également dans la dépression centrale (vortex aéré). On note dans ces cas une augmentation très rapide des vitesses de rotation au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre du tourbillon.

On peut observer de tels phénomènes lors de l'écoulement par des orifices (vidanges de réservoirs, de sas d'écluse, entrée de galeries en charge, écoulement sous une vanne, prises d'eau dans une retenue ou en rivière...) ou dans les stations de pompage, quelle que soit la disposition de l'orifice d'aspiration (fig. 1).

Beaucoup de chercheurs se sont consacrés à l'étude des vortex à cause des effets secondaires dont les mouvements tourbillonnaires intenses et l'entraînement d'air seraient à l'origine. Dans le cas d'une aspiration, signalons les vibrations indésirables des divers éléments de la pompe et notamment de ses supports, une tendance à favoriser le seuil de cavitation, une diminution de son rendement et de celui de l'installation. Dans le cas d'une vidange gravitaire par un orifice, il a été noté une diminution non négligeable du coefficient de débit. Il faut également ajouter dans tous les cas les dangers d'aspiration de corps flottants, les bruits intenses,...

Des études théoriques complexes ont été réalisées

sur ce sujet mais, pour les mener à bien, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont été nécessaires. Le cas particulièrement étudié est celui du vortex de vidange, stable, permanent, créé par l'aspiration dans l'orifice axial d'une cuve cylindrique.

Ce cas est cependant très théorique. Dans la majorité des installations il n'existe aucune symétrie d'écoulement et le vortex formé n'est pas permanent : il apparaît, s'amplifie et disparaît après avoir parcouru sur la surface libre un chemin capricieux et variable. Il réapparaît ensuite en un nouvel emplacement.

2. Buts de la présente enquête

2.1. En l'absence de théories précises permettant dans chaque cas particulier de prédéterminer les risques d'apparition du vortex, de nombreux constructeurs ou laboratoires effectuent chaque année plusieurs études pour éviter leur formation

- soit pour des prises d'eau de barrages, en rivière...;
- soit dans les chambres d'aspiration de stations de pompage.

En effet, les conditions de formation de ces phénomènes dépendent non seulement des conditions hydrauliques de l'écoulement (hauteur d'eau, débit, ...), des conditions ambiantes (notamment de la température du fluide), mais aussi des formes de la chambre (chambre d'entonnement ou chambre d'aspiration).

Or il n'est pas toujours possible d'obtenir pour une prise ou une chambre un tracé correct. Le plus souvent, des conditions de génie civil, de prix de revient prohibitif, imposent par exemple un désaxage important entre le canal d'amenée et la position de la prise ou de la pompe, créant de ce fait un moment cinétique de valeur non négligeable et la formation de vortex.

A chaque fois, les mêmes types d'essais sont repris, avec les mêmes solutions imparfaites telles que radeaux flottants, crépines, panneaux déviateurs plus ou moins inclinés, ... avant d'obtenir des solutions donnant satisfaction.

2.2. Nous avons donc recherché, au sein de la Section Machines de la Société Hydrotechnique de France, à rassembler pour un profit commun l'expérience acquise par les différents constructeurs ou laboratoires.

Il est bien entendu impossible de faire ici l'inventaire complet de toutes les formes de chambre ou de toutes les dispositions de une (ou plusieurs) prises d'eau ou pompes d'aspiration dans ces chambres.

Nous avons retenu parmi les réponses obtenues les cas particuliers les plus caractéristiques (regroupés en annexe sous forme de fiches), de façon à permettre aux constructeurs et aux laboratoires de connaître dans ces cas, outre les conditions de formation de vortex, les dispositifs qui ont permis sa suppression. Il est souhaitable de pouvoir ainsi éviter les très nombreux et coûteux tâtonnements dans la recherche d'une solution qui peut en définitive ne pas donner entière satisfaction.

Enfin, il est également paru intéressant, bien que

1/ Vortex dans une station de pompage.
Vortex in a pumping plant.

débordant du cadre de l'enquête, de joindre au présent rapport un paragraphe où il est précisé dans quelles conditions de similitude les études sur modèle ont été réalisées, et une annexe bibliographique regroupant les titres des principales études effectuées actuellement sur ces sujets.

3. Conditions de formation des vortex

3.1. Introduction.

La formation de vortex dépend de nombreux paramètres, notamment des conditions hydrauliques (hauteur d'eau, débit, ...) et des formes géométriques de l'installation.

L'étude de la variation de ces différents paramètres est très instructive, mais (sauf en laboratoire) n'est que très rarement réalisable.

Cependant, dans notre enquête, des variations du niveau du plan d'eau nous ont été quelquefois signalées, permettant ainsi de mettre en évidence le seuil de submersion critique. Le plus souvent ces précisions ne pouvaient être fournies de façon rigoureuse, mais les renseignements obtenus (et regroupés sur fiches) sont cependant fort intéressants, car ils permettent de mettre en évidence des caractéristiques d'installations à éviter.

L'analyse des renseignements obtenus, joints à ceux de nos essais au Centre de Chatou ou trouvés également dans la littérature (Cf. bibliographies en annexe) permet de préciser l'influence des variations des conditions hydrauliques ou des formes géométriques de l'installation.

3.2. Variation des conditions hydrauliques.

La variation des conditions hydrauliques (débit d'aspiration de vidange Q , hauteur d'eau au-dessus du radier H) conduit au tracé :

- du réseau (Q , H , Γ), en désignant par Γ la valeur de la circulation autour du vortex, caractérisant la forme de la partie hyperbolique de ce dernier;
- de la caractéristique (Q , H) de début d'entraînement d'air, permettant, pour chaque valeur du débit, de déterminer le seuil de hauteur d'eau H_c (ou submersion au-dessus de la tulipe Z_c) critique à partir de laquelle les vortex ne sont plus aérés.

Les résultats obtenus dans un cas particulier d'installation sont détaillés au paragraphe 6.5.2. L'augmentation relative de hauteur d'eau permettant d'éviter l'entraînement d'air est nettement moins importante que l'augmentation relative correspondante du débit.

3.3. Variation des formes géométriques.

En l'absence, d'une part, d'une théorie exacte de la formation des vortex, d'autre part, de la connaissance des conditions de similitude entre modèle et prototype, quelques études expérimentales ont cependant été entreprises dans le but de rechercher l'influence des formes géométriques de la chambre sur les conditions d'apparition du vortex. Il est certainement vraisemblable en effet qu'une mesure qui réduit l'intensité des vortex sur le modèle doit

aussi les réduire sur le prototype, quoique nécessairement pas au même degré.

Pour simplifier l'exposé nous envisagerons uniquement le cas des vortex créés par aspiration. La formation de vortex sera caractérisée par la relation ($H_c - Q$) de la hauteur critique au débit dans l'orifice.

Nous renvoyons, dans le cas d'une vidange, aux travaux de Haindl, qui a étudié l'influence des conditions aux limites (mouvement rotationnel plus ou moins important) et l'influence des dimensions géométriques (diamètre de la cuve et diamètre de l'orifice) sur la formation de vortex.

Vortex créé par aspiration verticale ascendante :

De nombreuses variations des conditions géométriques ont été étudiées. Nous examinerons ici les plus caractéristiques, réalisées dans les chambres rectangulaires, et susceptibles de ce fait d'une éventuelle généralisation.

La forme exacte d'une chambre de même que les notations utilisées sont précisées sur la figure 2 a. Les comparaisons seront effectuées pour des débits constants.

a) VARIATION DE LA DISTANCE TULIPE-RADIER (DISTANCE Y) :

En faisant varier la distance Y de la tulipe au radier, toutes les autres variables restant inchangées :

- Iversen (résultats fig. 2 b) et Denny ont trouvé qu'une augmentation importante de la distance Y (le rapport Y/H_c pouvant atteindre 0,6) entraînait une diminution de la submersion critique Z_c et une augmentation de la hauteur critique H_c ;
- Markland et Pope indiquent que si Y croît, Z_c diminue tandis que H_c resterait « sensiblement constant »;
- les résultats obtenus (fig. 2 c) au Centre de Chatou ont permis de montrer, pour des valeurs Y/H_c assez faibles [$0,03 < (Y/H_c) < 0,19$] une diminution simultanée de la hauteur critique et de la submersion critique.

En fait il semble, suivant les valeurs de Y/H_c réalisées dans les différentes expérimentations, que H_c passe par un minimum lorsque Y augmente. Pour ce minimum, le rapport Y/H_c serait compris entre 0,2 et 0,3 environ, valeurs pour lesquelles les risques de formation de vortex seraient les plus faibles.

Cependant, pour obtenir les conditions optimales de rendement de la pompe, Iversen, Stepanoff ou Richardson recommandent dans les projets d'ouvrages d'adopter une distance tulipe-radier égale à la moitié du diamètre de la tulipe.

b) VARIATION DE LA DISTANCE AUX PAROIS.

Distance des parois latérales ($B = 2 X_L + D$) :

Les études ont été réalisées avec des parois latérales disposées symétriquement de part et d'autre de la pompe. Les résultats de Iversen (fig. 2 b) et ceux obtenus au Centre de Chatou montrent que la submersion critique diminue si l'écartement X_L diminue. Cette variation est d'autant moins importante que la valeur de Y est plus grande.

a) Schémas de l'installation - *Diagrams of the installation*

Influence de la distance "tulipe radier"
Effect of distance from bellmouth to floor

$$(X = X_F = X_L)$$

$$Re = 11 \times 10^4$$

d) Courbe iso-submersion critique
Critical equal submersion curve

$B = 0,6 \text{ m}$
 $D = 3,75 \text{ cm}$
 $V = 4 \text{ m/s}$
 $Y/D = 1$
 $C/B = 1/2$

e) Influence de la forme de la tulipe
Effect of bellmouth shape

f) Influence du sens d'aspiration
Effect of suction direction

2/ Influences des limites géométriques. *Effect of geometrical boundaries.*

Distance du tuyau à la paroi verticale opposée à la face d'entrée (X_F) :

Les résultats de Markland et Pope confirment ceux obtenus au Centre de Chatou. Une diminution de cette distance X_F au fond (X_L étant constant) entraîne également une diminution de la submersion critique.

Pour diminuer les risques de formation de vortex il y a intérêt à diminuer les zones « d'eau morte », notamment celles qui se trouvent derrière la pompe. Toutefois, pour ne pas affecter les caractéristiques de la pompe, Iversen recommande de ne pas rapprocher les parois verticales à une distance inférieure à $D/2$ environ du tuyau. Signalons encore que Young a proposé sur ce sujet une formule empirique assez compliquée.

Modification de la position de la pompe dans le puits :

Denny a montré l'importance de la variation de la submersion critique lorsque le tuyau d'aspiration était déplacé dans un puits de formes géométriques invariables, le débit d'aspiration restant constant. La figure 2 d est un exemple de carte isosubmersion critique. Elle indique que les vortex se forment le plus facilement lorsque la pompe est placée dans la partie centrale du puits.

c) VARIATION DU DIAMÈTRE DE LA TULIPE.

Les résultats de Markland et Pope confirment une fois encore ceux obtenus au Centre de Chatou. Quand le diamètre de la tulipe augmente, la submersion critique diminue. Ce sens de variation était prévisible, car toute augmentation du diamètre de la tulipe se traduit par une augmentation de la longueur du vortex.

La forme de la tulipe est également un paramètre qui modifie les conditions d'apparition du vortex.

Sans traiter ici ce sujet d'une façon détaillée, nous extrairons cependant des travaux de Denny plusieurs schémas reproduits par les figures 2 e et 2 f.

Dans les cas schématisés par la figure 2 f, on constate que l'orientation de l'orifice d'entrée vers l'écoulement diminue les possibilités de formation de vortex.

d) VARIATION DE LA LARGEUR D'ENTRÉE DE LA CHAMBRE.

Les essais réalisés par Denny et Young, comme les essais réalisés au Centre de Chatou, ont montré que toute diminution de la largeur d'entrée C de la chambre augmentait la submersion critique nécessaire pour empêcher la formation des vortex.

e) VARIATION DU DIAMÈTRE DU TUYAU.

Les essais réalisés au L.N.H. ont indiqué que la submersion critique Z_0 diminue si le diamètre du tuyau est augmenté, c'est-à-dire en diminuant la vitesse dans le tuyau.

f) REMARQUES.

En comparant parmi les différents essais effectués au Laboratoire ceux relatifs à une modification de paramètres géométriques (distance tulipe-radier, diamètre du tuyau, etc.) nous avons constaté que la

3/ Torche sous la tulipe d'une pompe.
Vortex underneath a pump inlet bellmouth.

submersion critique nécessaire pour empêcher la formation de vortex restait sensiblement la même si la vitesse du fluide sous la tulipe avait la même valeur. Cette valeur de la vitesse sous la tulipe semble de ce fait devoir beaucoup mieux caractériser la formation de vortex que la valeur de vitesse dans le tuyau, proposée par exemple par Denny.

4. Autres anomalies d'écoulement

4.1. Introduction.

Le vortex n'est pas la seule anomalie d'écoulement pouvant exister dans un ouvrage de prise d'eau. Il en existe encore beaucoup d'autres. Il est regrettable que très peu de renseignements nous aient été fournis sur ce sujet.

Nous pouvons signaler les deux cas suivants :

4.2. Torche tourbillonnaire sous la tulipe de la prise.

Sur plusieurs modèles de station de pompage réalisés au Centre de Chatou, des phénomènes de torches tourbillonnaires ont été observés sous la tulipe de la prise (fig. 3).

4/ Bulles dans une station de pompage.
Bubbles in a pumping plant.

Ces phénomènes n'étaient certainement pas engendrés par la pompe, car dans le cas présent seules ses formes extérieures étaient figurées sur le modèle. La pompe proprement dite, provoquant l'aspiration de l'eau, se trouvait bien à l'extérieur du modèle, à une dizaine de mètres à l'aval, la tuyauterie comportant en outre plusieurs coudes.

L'expérience a montré une formation de torches paraissant indépendante des autres mouvements tourbillonnaires de la chambre. Beaucoup plus fréquentes et plus permanentes que le vortex, ces torches pouvaient prendre des dimensions assez importantes.

Cette figure de cavitation est le centre du mouvement tourbillonnaire d'ensemble provoqué sous la tulipe par l'écoulement dissymétrique dans la chambre. Elle peut être très facilement supprimée :

- au moyen des mêmes grilles latérales verticales en métal déployé qui seront mises en place pour la suppression du vortex (Cf. § 5.3) ;
- par l'installation sur le radier de la chambre d'un dispositif (grille déflectrice par exemple) à forte perte de charge dans le sens de rotation.

4.3. Bulles et torches : chambre d'aspiration de la pompe de circulation de la centrale des Anse-reuilles.

La valeur trop faible du volume de la chambre et le désaxage du collecteur d'amenée d'eau par rapport à la pompe de circulation provoquait (fig. 4) :

- la formation d'un grand nombre de bulles d'air ;

- des mouvements tourbillonnaires importants avec torches verticales (entre la tulipe et le radier) ou horizontales (rouleaux entre la tulipe et une paroi verticale).

Toutefois l'agitation intense du plan d'eau empêchait la création depuis la surface libre du vortex avec entraînement d'air.

L'implantation de la station dans le sous-sol de la centrale, autour d'auxiliaires déjà en place, ne pouvant autoriser qu'une faible augmentation du volume de la chambre, il a été nécessaire de placer à l'intérieur un dispositif correcteur comprenant (Cf. fiche correspondante en annexe) :

- une grille directrice verticale à la sortie du collecteur ;
- une grille déflectrice à forte perte de charge, dans le sens de rotation, sous la tulipe de la pompe.

5. Dispositif anti-vortex

5.1. Introduction.

Dans la chambre d'une prise d'eau, ou dans son canal d'amenée, il existe toujours en pratique des dissymétries, même très faibles, des limites géométriques.

L'impossibilité de supprimer complètement ces dissymétries peut entraîner la création d'un moment cinétique par rapport à l'axe de la conduite en charge, puis, le cas échéant, du vortex. Elle nécessite la réalisation de dispositifs anti-vortex.

Ecartons au préalable le cas où l'ouvrage de prise d'eau n'est pas encore réalisé. La connaissance de l'influence des limites géométriques de la chambre sur la formation de vortex et le cas échéant des courbes caractéristiques de hauteur critique facilite la réalisation d'un projet d'installation correct.

5.2. Dispositif anti-vortex.

Cependant, dans le cas où l'ouvrage est déjà construit, ou lorsque des données impératives lui imposent des formes géométriques particulières, examinons quelques-unes des solutions proposées par nos correspondants (cf. également les fiches en annexe) ou par les différents auteurs dans la littérature. Ces solutions sont les suivantes :

- tout d'abord, une augmentation du niveau du plan d'eau au-dessus de l'orifice de succion. Ceci revient à changer de région sur la caractéristique $H_c - Q$ de début d'entraînement d'air. Bien qu'elle soit conseillée par de nombreux auteurs, cette manière de procéder conduit à des modifications importantes de l'installation, à des dépenses prohibitives ou à des pertes de rendement ;
- radeau de bois flottant sur la surface libre (Stepanoff, Haindl,...) ;
- flotteur sphérique de dimensions assez importantes. Entraîné par les mouvements tourbillonnaires dans la dépression centrale du vortex, ce dernier empêche l'entraînement d'air (Haindl) ;
- suppression des zones d'eau morte dans lesquelles le vortex peut plus facilement se former (Institut de Gand,...) ;

- dans un but semblable, mur vertical derrière l'orifice de la prise, dans le sens de l'écoulement (Allen, Taylor), ou masque incliné au-dessus des prises de vidange (Laboratoire du Génie Rural);
- dispositif permettant d'augmenter la vitesse du fluide dans la direction de la prise. Ce moyen peut encore être considéré comme une variante du précédent (Nelson);
- tout dispositif qui provoque une violente agitation permanente du plan d'eau;
- écrans déviateurs plus ou moins nombreux dans le cas où plusieurs pompes sont dans le même puits, ou dispositions particulières de ces pompes (Stepanoff, Fraser, Denny,... Installation des docks de Cardiff,...);
- pertes de charge plus ou moins importantes par la traversée de grilles par l'écoulement (nombreux auteurs);
- tout dispositif qui allonge la longueur du vortex entre la surface libre et la prise (Denny, Markland, Perelman, Poliovski, Pope,...);
- dans un but semblable au précédent, plaque horizontale d'assez grand diamètre disposée sur le tuyau d'aspiration ou directement sur la tulipe de la pompe (installation Sulzer de Bourne Sud Fen, Vevey,...);
- tout dispositif immergé qui, heurté par la queue du vortex au cours de son déplacement, en provoquera la destruction (Institut de Montevideo,...);
- ailettes sur les murs du réservoir ou de la chambre, dans des plans perpendiculaires, pour empêcher la rotation (Haindl,...);
- ailettes en croix à l'entrée de l'orifice, bien que cette solution qui diminue les tourbillons soit peu efficace sur le vortex lui-même (Denny,...);
- dispositif qui permet l'aération du canal ou du conduit d'évacuation si seul l'orifice de prise est en charge (Camichel, Escande, Perelman, Poliovski,...);

Tous ces dispositifs anti-vortex ont été utilisés dans des cas bien particuliers et il n'est pas toujours précisé dans quelles conditions de hauteur d'eau ou de débit ils sont efficaces. Ils empêchent en général l'entraînement d'air mais ne suppriment pas les tourbillons vers l'orifice de la prise.

C'est le cas par exemple d'un autre dispositif dans lequel ils sont volontairement intensifiés. Markland et Pope ont en effet remarqué, dans un puits cylindrique avec aspiration centrale verticale ascendante dans un tuyau au centre du puits, qu'aucun vortex ne peut se former si le fluide possède à l'entrée de la chambre un mouvement important de rotation. Ces auteurs proposent de ce fait, de donner au fluide un mouvement artificiel de rotation, centré sur le tuyau d'aspiration, comme moyen de supprimer le vortex. (Dans le cas d'une vidange, il suffirait de remplacer le tuyau par un noyau cylindrique au-dessus de l'orifice).

Cependant, pour placer les pompes dans des conditions correctes d'alimentation, c'est-à-dire exemptes de tourbillons, il serait nécessaire de détruire ensuite ces derniers volontairement créés au préalable, d'où une perte d'énergie.

5.3. Autre dispositif anti-vortex : le dispositif de grilles latérales en métal déployé.

Citons enfin le dispositif des grilles en métal déployé. Mis au point au Centre de Chatou, il consiste à placer dans la chambre d'aspiration, parallèlement à la direction de l'écoulement et symétriquement par rapport à la pompe (ou à l'orifice de succion en cas de vidange), des grilles latérales verticales en métal déployé (schémas de principe figures 5 a et b).

Une grille de métal déployé est constituée par un grand nombre de mailles identiques, ayant chacune la forme d'un losange. Vues en coupe, ces grilles se présentent sous la forme d'une série d'aubages parallèles. Pour obtenir un bon effet déflecteur, la largeur de la lanière de chaque aubage doit être

Schémas de principe - Principle sketches

Exemple d'implantation des grilles de métal déployé
Examples of expanded metal screen layouts

assez grande. La grande diagonale doit en outre être placée parallèlement au vecteur tourbillon, soit verticalement dans la majorité des cas.

La dissymétrie de ce métal permet ainsi de présenter à tout écoulement fluide une rugosité latérale sensiblement nulle dans le sens normal d'écoulement « pertuis d'entrée-orifice d'aspiration ». Au contraire, cette rugosité devient très importante (avec le cas échéant déflexion) dans le sens opposé d'écoulement qu'engendre toute création de tourbillons (fig. 5 c).

Dans ces conditions, et pour des caractéristiques convenables du métal déployé, l'expérience a montré que ce dispositif placé sur toute la hauteur d'eau de la chambre permet de supprimer complètement la formation de vortex et les mouvements tourbillonnaires (torches) sous la tulipe.

De plus, une visualisation des lignes de courant met en évidence un écoulement calme, complètement régularisé, dans toute la chambre.

Les caractéristiques des grilles à disposer dépendent des conditions hydrauliques (débit, hauteur d'eau) et de la valeur initiale de la circulation du fluide à l'entrée de la chambre. Des essais sur modèle permettent de la déterminer avec exactitude, mais il est possible de dégrossir le problème à partir des solutions déjà mises au point dans la pratique et dont les principales sont rappelées sur les fiches (Cf. fiches II.B.4 à II.B.7).

Aucun courant ne traversant les grilles en fonctionnement normal de l'installation, les pertes de charge introduites par le dispositif sont négligeables. Elles sont restées dans tous les cas, sur les modèles réalisés, inférieures aux erreurs de mesures.

Des cloisons pleines, mises à la place des grilles, laissent subsister le vortex. Au contraire, ces mêmes cloisons pleines, disposées derrière les grilles (du côté opposé à l'orifice de succion), ne modifient pas les résultats favorables obtenus primitivement : tous les mouvements tourbillonnaires sont supprimés. De ce fait, le dispositif de grilles verticales en métal déployé peut empêcher la formation de vortex dans des formes quelconques de chambre d'aspiration.

Quelle que soit la forme du bassin d'aspiration ou de la chambre, il est ainsi possible de disposer à l'intérieur, autour de chaque orifice de succion, un ensemble de grilles verticales dirigées à chaque fois dans la direction de l'écoulement (Cf. les différents exemples en annexe).

Dans le cas particulier de pompes verticales plongeant dans un bassin, il est disposé également derrière celles-ci, pour joindre les deux grilles latérales et éviter une zone d'eau morte non délimitée à l'arrière de la pompe, une autre grille verticale dont le sens des mailles est encore tel qu'il évite toute formation de tourbillon.

Précisons de nouveau que les caractéristiques du métal déployé (pas de la maille, largeur de la lanière,...) et l'écartement des grilles sont fonction de l'intensité de la circulation initiale à l'entrée du bassin et des conditions hydrauliques, hauteur d'eau et débit.

Indiquons également que la mise en place des grilles (sur modèle et ultérieurement sur prototype) nécessite un peu d'attention. Toutes dispositions

mauvaises ou inversées des mailles des grilles en métal déployé et toutes dissymétries des grilles l'une par rapport à l'autre ne permettent plus d'empêcher la formation du vortex, en raison même du processus qui a permis d'en réaliser la suppression.

Rappelons enfin que ce dispositif élimine également les mouvements tourbillonnaires non aérés (mouvements d'ensemble sur la surface libre, torches et mouvements de rotation sous la tulipe,...) et permet la régularisation de l'écoulement avec une perte de charge négligeable. Il présente en outre l'avantage de ne pouvoir être colmaté par les impuretés de l'eau, puisque l'eau ne traverse pas les grilles. Il a déjà été installé maintenant dans de nombreuses installations où il a, avec une efficacité totale, donné des résultats conformes à ceux obtenus sur modèle.

6. Similitude des vortex

6.1. Remarques préliminaires.

Le problème de la similitude des phénomènes de vortex est très complexe et déborde du cadre général de l'enquête. Mais il apparaissait intéressant de connaître les conditions de similitude adoptées par les laboratoires lorsque, le cas échéant, un modèle avait été réalisé et les comparaisons prototype-modèle effectuées.

De telles comparaisons sont d'ailleurs indispensables pour vérifier les conditions de formation de vortex et la valeur des dispositifs anti-vortex proposés.

L'aspect théorique du problème de similitude ne sera pas évoqué dans ce rapport. La question a été abordée par plusieurs auteurs dont nous signalons les études dans l'annexe bibliographique. Remarquons cependant que, là encore, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont été nécessaires pour la réalisation des calculs.

6.2. Principaux critères.

L'analyse théorique de la formation des vortex dans une chambre de prise ne pouvant permettre, d'une façon générale, de déterminer les conditions géométriques à imposer à cette chambre pour éviter la création de vortex, il est de ce fait souvent nécessaire d'essayer de reproduire ces phénomènes sur modèle réduit.

Toutefois, une difficulté apparaît immédiatement dans le choix de la similitude à respecter pour représenter ces phénomènes.

Il est évident que les nombres de Froude, de Weber et de Reynolds doivent intervenir dans la similitude.

En effet, la dépression initiale de la surface libre nécessite, comme dans tous les modèles à surface libre où les forces de gravité sont prépondérantes, l'égalité du nombre de Froude entre le modèle et le prototype. Cependant, et pour des dépressions notables du centre du vortex, les forces de tension superficielles ne peuvent être négligées et il est certainement nécessaire d'en tenir compte en respectant le nombre de Weber. De même la rotation en

bloc de l'eau vers « l'axe central » du vortex, les conditions d'aspiration sous la tulipe de la pompe ou vers l'orifice de prise imposent également, puisque les forces de viscosités prennent localement des valeurs non négligeables, le respect du nombre de Reynolds.

A ces trois nombres de Froude, Weber et Reynolds, l'application de l'analyse dimensionnelle permet notamment encore de mettre en évidence le rapport VD/Γ .

La grandeur Γ , qui figure au dénominateur, est la circulation $\oint u \cdot ds$ d'une particule fluide animée d'une vitesse tangentielle u , et dont le rayon de courbure de la trajectoire autour du vortex est r .

L'action sur cette particule des forces centrifuges peut s'écrire :

$$F_c = \rho dr \cdot dA \frac{u^2}{r} = \rho dr \cdot dA \frac{K^2}{r^3} \text{ (avec } K = \frac{\Gamma}{2\pi}$$

Les forces totales d'inertie sont :

$$F_i = \rho dr \cdot dA \frac{dV}{dt}$$

Ainsi le rapport des forces centrifuges aux forces d'inertie étant $K^2 ds / r^3 V dV$, soit du point de vue dimensionnel $[K^2]/[L^2] [V^2]$, le rapport VD/Γ est donc proportionnel à la racine carrée de l'inverse du rapport des forces centrifuges aux forces d'inertie.

6.3. Impossibilité de la réalisation d'une similitude complète.

Une représentation en similitude complète d'un vortex sur modèle paraît donc impossible, car elle nécessite le respect simultané de tous les nombres sans dimensions précédents.

En fait, pour la réalisation d'essais sur modèle (à une échelle géométrique donnée λ), outre une modification de la vitesse de l'écoulement, on peut introduire une variation des caractéristiques physiques du liquide utilisé (viscosité dynamique, masse spécifique, tension superficielle,...). Ces modifications peuvent être obtenues par variation de la température (qui entraîne dans des proportions assez différentes la modification des trois caractéristiques précédentes), par changement de la nature du corps ou simultanément par ces deux opérations.

Le respect simultané des nombres de Froude et de Reynolds peut être obtenu par modification de la viscosité cinématique du liquide utilisé (par changement de la nature du liquide ou par variation de la température).

La relation obtenue s'écrit : $\lambda^3 = [\nu]^2$.

Le respect simultané des nombres de Froude et Weber conduit à la relation :

$$\lambda^2 = [\sigma] [\rho]^{-1}$$

Malgré le grand nombre de corps organiques, aucun ne semble devoir satisfaire (même en modifiant leurs caractéristiques physiques par des variations de température) aux conditions précédentes. C'est notamment le cas pour des variations assez grandes de l'échelle linéaire, car les variations de certaines caractéristiques physiques sont assez limitées.

Il peut être possible d'envisager d'introduire un

liquide superficiel auxiliaire, sur le fluide principal, de manière à modifier la pesanteur apparente. Mais cet artifice risque d'introduire des phénomènes parasites annexes, notamment par le fait de remplacer l'atmosphère ambiante par un liquide dont les caractéristiques (viscosité, tension superficielle) sont différentes.

En outre, les conditions de similitude imposant à ce liquide d'être disposé sur le modèle à plus grande échelle, ce liquide devrait être de densité inférieure au fluide principal, non miscible avec celui-ci et non volatil. De tels essais deviennent pratiquement irréalisables.

Dans l'impossibilité d'obtenir une similitude complète, il est donc nécessaire de déterminer l'ordre d'importance relatif des forces qui interviennent dans la formation du vortex, de manière à pouvoir négliger les plus faibles.

Il est évident que l'ordre d'importance de ces forces dépend du but recherché dans l'étude, c'est-à-dire en définitive du critère de comparaison utilisé.

On peut adopter par exemple l'un des suivants :

- conditions de formation sur la surface libre de la partie hyperbolique initiale de l'entonnoir du vortex;
- conditions de début d'entraînement d'air;
- fréquence et durée des vortex aérés pour des conditions données.

Il semble le plus souvent judicieux d'adopter le second critère. En effet, ce critère présente l'avantage de fournir le seuil de formation du vortex qui conditionne, en pratique, le bon fonctionnement d'une installation.

6.4. Similitudes proposées.

Dans l'enquête que nous avons réalisée, peu de laboratoires ont indiqué les conditions de similitude adoptées. Les réponses peuvent cependant être classées en deux catégories.

6.4.1. L'ÉTUDE DES VORTEX N'ÉTAIT PAS LE BUT PRINCIPAL DES ESSAIS :

Le modèle (en général barrage de rivière) a été réalisé à petite échelle. Au cours des essais, des vortex ont été observés et des dispositifs ont été installés pour modifier les conditionnements d'entonnement.

Ces essais de suppression de vortex ont donc été effectués dans des conditions de similitude identiques aux autres essais, c'est-à-dire en similitude de Froude.

Il est dans ce cas impossible d'obtenir une opinion valable sur les conditions de similitude. Lors de la réalisation des essais, le dispositif anti-vortex adopté est, en général et dans un but de sécurité, d'une efficacité nettement surabondante, tout au moins pour la suppression de l'entraînement d'air. Des résultats satisfaisants obtenus ensuite sur le prototype ne peuvent donc permettre de conclure sur les conditions de similitude.

Lors de ces études sur modèles, il est également nécessaire de remarquer que bien souvent des tourbillons peuvent se former (avec le cas échéant formation de vortex) si les conditions de tranquillisation à l'amont ne sont pas parfaites et ne reproduisent pas exactement un écoulement identique au

prototype (nécessité de la réalisation d'un champ de vitesses très détaillé dans les deux cas). Des dissymétries initiales de l'écoulement peuvent créer de ce fait sur modèle des tourbillons qui ne se seraient pas formés dans la nature, sur la réalisation de l'ouvrage projeté et réciproquement.

En outre, sur modèle, et *a fortiori* sur les petits modèles de grande échelle linéaire, la turbulence est relativement bien moins importante que sur le prototype et favorise également de ce fait la formation de vortex.

6.4.2. L'ÉTUDE DE LA FORMATION DE VORTEX ÉTAIT LE BUT PRINCIPAL DES ESSAIS :

Des différences assez nombreuses existent dans les critères de similitude proposés par les laboratoires ou par différents auteurs dans la littérature. Certaines peuvent d'ailleurs provenir du fait que le critère de comparaison, non précisé, n'est peut-être pas le même. Remarquons cependant que souvent la difficulté du problème est signalée sans qu'une position soit prise en faveur d'une similitude quelconque.

Ont préconisé de réaliser les essais sur modèle réduit :

a) *En similitude de Froude :*

Allen et Taylor, pour un modèle de prise en galeerie de déversoir de crue.

b) *En similitude de Reynolds :*

Haindl, pour un modèle de vidange de cuve cylindrique. Dans cette cuve, il a effectué une série d'essais, compte tenu des résultats de Einstein et Huon Li. Sur trois modèles semblables, il a appliqué successivement les conditions de similitude de Froude, de l'égalité des vitesses « modèle-prototype », puis les conditions de similitude de Reynolds. Dans ce dernier cas seulement, il a obtenu la meilleure identité des courbes de submersion critique, notamment lorsque le nombre de Reynolds était obtenu en prenant pour vitesse, la vitesse de l'écoulement de l'eau dans le réservoir, et pour dimension linéaire, le diamètre de ce réservoir.

D'autre part, entre ces deux conditions extrêmes, nous devons signaler :

c) *Les travaux de Camichel et Escande :*

Pour les modèles de vidange de chambre spirale, ces auteurs sont arrivés aux conclusions suivantes :

- les débits des vortex, en fonction de la charge, suivent la loi de similitude de Froude;
- les temps nécessaires à la formation de la cheminée d'air centrale, à partir d'un état initial homologue, sont approximativement en similitude de Froude;
- la forme des veines et la formation de la cheminée d'air centrale ne suivent pas la loi de similitude de Froude.

d) *L'article de Issakian :*

D'après A. K. Khalpatchian, il serait possible de reproduire sur modèle réduit des vortex en observant les conditions de la similitude de Froude, à condition d'introduire un coefficient correctif. Pour Issakian, et dans le cas de l'écoulement sous une vanne, ce coefficient ne serait fonction que du rapport du rayon hydraulique à la hauteur de l'orifice.

e) *Les travaux de Kolf-Stevens et Zielinski :*

Ces auteurs, après avoir étudié l'écoulement avec formation de vortex à travers des orifices horizontaux, préconisent une similitude tenant compte du rapport des forces centrifuges aux forces d'inertie.

f) *Les recherches de Vassilichin :*

Vassilichin, après avoir étudié des modèles de vortex réalisés dans des chambres ayant la forme de spirales, a montré qu'il est nécessaire de tenir compte dans la similitude des vortex, non seulement du nombre de Froude, mais également du nombre de Reynolds. Il a introduit pour cela le nombre sans dimension :

$$\pi = \frac{VD/\nu}{V^2/gD}$$

(rapport du nombre de Reynolds au nombre de Froude) et, en déterminant expérimentalement le coefficient de débit ϕ , il met en évidence que la courbe $\phi = \log \pi$ est constituée de deux portions de droites groupant tous les résultats des essais de plusieurs modèles, dont un essai avec une modification de la viscosité du fluide étudié. La première portion de droite correspond à des vortex non aérés, la seconde à des vortex aérés. Cependant ces résultats semblent assez discutables, car Vassilichin, ne faisant varier qu'une seule dimension de la spirale, n'a obtenu ces résultats que lors de la comparaison de très petits modèles (hauteur du plan d'eau sur le plus grand modèle 30 cm, sur le plus petit modèle 3,75 cm).

g) *Les recherches de Polikovski et Perelman :*

Ces auteurs, après avoir également critiqué la fonction de Vassilichin et indiqué qu'elle ne pouvait être régulière, ont effectué sur leur modèle de cuve cylindrique, possédant un orifice central de vidange, des essais dans lesquels ils ont fait varier tous les principaux paramètres.

Ils recommandent de réaliser une similitude « locale » des vortex d'après Reynolds tout en conservant le nombre de Froude pour l'ensemble de l'écoulement.

h) *Les études effectuées sur des modèles de stations de pompage avec aspiration verticale (Iversen, Fraser, Denny, Young, Markland et Pope) :*

Iversen a montré que des vitesses sur le modèle, basées sur le nombre de Froude, étaient bien trop faibles pour donner des résultats quantitatifs et permettaient uniquement, par l'observation des lignes de courant, de déterminer les régions de formation des vortex.

Fraser a émis le premier l'idée que des résultats acceptables pouvaient être obtenus en réalisant sur le modèle les mêmes vitesses que sur le prototype.

C'est à un résultat semblable que Denny et Young ont été conduits. Pour une échelle linéaire 1/5, des vitesses « modèle-prototype » égales permettent d'obtenir, aux fortes vitesses, des submersions critiques homologues. Aux faibles vitesses, la correspondance est moins bonne. Ce résultat n'a cependant pas reçu de justification théorique et, de ce fait, les auteurs recommandent d'appliquer cette condition de similitude avec précaution.

C'est par une conclusion semblable que Markland et Pope terminent leur article.

Remarquons enfin que dans une étude très récente et à partir de travaux de Einstein et Huon Li (effectués dans le cas de la vidange d'une cuve cylindrique par un orifice central) G. Holtorff a obtenu des résultats théoriques en accord avec les constatations précédentes.

Au-dessus de l'orifice de rayon r_e il est nécessaire de prévoir, pour cet auteur :

- une similitude dans le domaine $r \geq r_e$ nécessaire pour comprendre l'influence décisive de la géométrie sur le moment cinétique;
- une similitude dans le domaine $r \leq r_e$ utile pour garantir dans le domaine une forme de tourbillon conforme à celle de la nature.

Ceci pose une grande difficulté d'expérimentation du fait de deux conditions différentes pour le modèle réduit pour un problème expérimental uni-

samment grande pour représenter le plus correctement possible les phénomènes d'entraînement d'air.

Nous avons donc obtenu deux valeurs pour le prototype et, sur le modèle, deux courbes, en fonction du débit.

Pour une échelle linéaire donnée, l'échelle des temps n'est fonction que du débit réalisé sur le modèle. De ce fait, les résultats précédents exprimés en grandeur « prototype » ont été traduits en fonction de l'échelle des temps (fig. 6).

Le report sur les courbes « modèle » des deux valeurs (moyennes des résultats) obtenues sur le prototype, met en évidence les deux valeurs de 0,20 et 0,21 de l'échelle des temps permettant d'obtenir des résultats homologues avec ceux du prototype.

La concordance entre les deux résultats constitue une excellente présomption en faveur de l'exactitude de la valeur $\tau = 0,20$ de l'échelle des temps.

Il y correspond la valeur $\varepsilon = \lambda/\tau = 5/4$ de l'échelle des vitesses, très légèrement supérieure à celle proposée par Denny.

Remarquons cependant que cette méthode, seule possible dans le cas présent, reste peu précise. Il est en effet difficile au cours du mouvement général de rotation de l'eau, de déterminer sur un prototype le début réel de l'entraînement d'air quand il ne possède pas de parois verticales vitrées.

6.5.2. ETUDE EXPÉRIMENTALE DE LA SIMILITUDE DES VORTEX.

A la suite des essais précédents, il était intéressant de connaître avec beaucoup plus d'exactitude les conditions de similitude des phénomènes de vortex, notamment dans ce genre d'installation où la formation de vortex est la plus gênante. Le cas retenu est donc celui, rencontré souvent en pratique, des stations de pompage avec aspiration verticale ascendante au moyen d'une pompe plongeant dans le bassin.

De très nombreuses difficultés sont immédiatement apparues. Tout d'abord l'impossibilité de mener à bien l'étude théorique du problème en raison de la double instabilité spatiale et temporelle du vortex. Lieu et fréquence de formation, durée d'existence et d'aération, chemin parcouru sur la surface libre sont excessivement variables et aucune équation théorique ne traduit ces phénomènes.

De ce fait, l'étude expérimentale des conditions de similitude restait la seule possible. Ces conditions pouvaient être déterminées à partir de l'examen de la formation de vortex sur des modèles semblables, mais d'échelles linéaires assez différentes.

Après une série d'essais préliminaires, dans le but de déterminer les dimensions minimales du petit modèle, il est apparu nécessaire de trouver un processus expérimental permettant de caractériser avec précision à un instant quelconque un vortex, de la dépression initiale sur la surface libre à l'entraînement d'air.

Les difficultés essentielles ont encore résidé dans la double instabilité spatiale et temporelle du vortex. Les méthodes directes de relevé du profil de l'entonnoir (pointes limnimétriques, prises de pression,...) ne pouvaient être retenues, en raison des déplacements incessants du vortex sur la surface libre et des modifications que l'introduction de ces

6/ Etalonnage d'un modèle de vortex. Fréquence horaire et durée moyenne de formation d'un vortex sur le modèle. Résultats exprimés en grandeur « nature ».

Calibration of a vortex model. Hourly frequency and average model vortex formation time. Results expressed to « real-life » scale.

que, et nécessite le recours aux règles expérimentales pratiques.

6.5. Principaux résultats obtenus au centre de Chatou sur la similitude des vortex.

6.5.1. COMPARAISON « MODÈLE-PROTOTYPE ».

Au cours d'une étude de suppression de vortex sur modèle, nous avons profité de l'existence du prototype pour comparer dans les deux cas les conditions de formation des vortex.

Comme il était impossible de faire varier le débit d'aspiration sur le prototype, les phénomènes de vortex ont été caractérisés par les deux grandeurs mesurables suivantes : la fréquence de formation et la durée moyenne des vortex. Ces deux grandeurs ont également été mesurées sur le modèle, dont l'échelle linéaire $\lambda = 1/4$ avait été choisie suffi-

1/

Tache caractérisant à chaque instant l'évolution d'un vortex.
Continuous vortex development observation by the spot method.

Points expérimentaux Test points

- 15 cm.
- 17 cm
- × 20 cm
- + 25 cm.
- △ 30 cm.
- ▽ 34 cm.
- 37 cm
- ⊙ Aération

Tracé théorique
Theoretical curves

— Courbes $Q = f(\Gamma)$ pour $H = \text{Cte}$
 $Q = f(\Gamma)$ for constant H

8/ Vortex $Q = f(\Gamma)$ pour $H = \text{constante}$. Vortex $Q = f(\Gamma)$ for constant H .

instruments, même miniaturisés, apportaient à l'écoulement.

Pour ces raisons, seules des méthodes optiques pouvaient être envisagées. Parmi ces méthodes, une détermination photographique de la forme et de la longueur du vortex ne pouvait être également retenue, l'erreur étant très importante dans le cas de faibles entonnoirs.

En définitive, un vortex a été caractérisé par la valeur de sa circulation, c'est-à-dire par la forme plus ou moins évasée sur la surface libre de sa partie hyperbolique à laquelle la circulation est directement reliée.

La méthode des rayons réfractés, imaginée au Centre de Chatou en 1960 pour cette étude, permet d'obtenir le résultat cherché. Elle utilise le phénomène optique de formation d'une surface caustique lors de la déviation de rayons lumineux au passage de la surface dioptrique de révolution air-eau de l'entonnoir du vortex. Il suffit de mesurer le diamètre de la ta-

che circulaire sombre constituée par l'intersection de la surface caustique avec le radier de la chambre, au préalable gradué (Cf. fig. 7). De telles mesures peuvent être effectuées à partir de méthodes cinématographiques d'enregistrement.

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir établir, par des essais, une correspondance entre la valeur de la circulation autour du vortex (déterminée à partir du diamètre de la tache), la hauteur d'eau dans la chambre et le débit d'aspiration de la pompe.

Ces essais ont été déjà réalisés sur le petit modèle (appelé échelle 1/5), dont les caractéristiques sont précisées sur la figure 8. Cette même figure fournit également les points expérimentaux des résultats des essais réalisés dans le cas particulier $C/B = 0,5$. D'autres valeurs de ce rapport ont été également étudiées. Nous préciserons ci-après en remarques le mode du tracé des courbes de ce premier réseau.

A partir de ce premier réseau, on peut en déduire, par transposition, le réseau de la figure 9 sur laquelle nous avons porté la courbe de hauteur critique $f(Q, H_c)$ de début d'entraînement d'air.

REMARQUES

SUR LA SIMILITUDE.

Pour déterminer expérimentalement les critères de similitude, il serait nécessaire de pouvoir comparer sur deux modèles semblables, mais d'échelle linéaire différente, les conditions de formation des vortex.

Dans ce but, un second modèle avait été prévu, d'échelle linéaire 1 par rapport au petit modèle cité précédemment. Ses caractéristiques (hauteur d'eau 2 m, débit 300 l/s environ) auraient eu l'avantage d'être semblables à celles de nombreuses installations existantes.

Toutefois, en l'absence de ce grand modèle, dont il n'a pas été encore possible d'effectuer la construction, nous pouvons déjà formuler les remarques suivantes :

a) Supposons que les points expérimentaux indiqués sur la figure 8 ne proviennent pas de résultats obtenus sur un même modèle, mais sur des

9/ Vortex. (H.Q) à circulation constante.

Vortex. (H.Q.) for constant circulation.

modèles différents, d'échelle linéaire λ . Dans ces conditions, il est nécessaire cependant de remarquer que les dimensions géométriques des chambres et du tuyau d'aspiration sont restées inchangées en passant d'un modèle à un autre. Seules ont varié toutes les conditions hydrauliques.

Il est difficile d'évaluer les erreurs introduites par ces hypothèses, mais lorsque le vortex se forme assez loin des parois, il est probable qu'elles restent assez faibles et ne masquent pas de par leur importance les phénomènes recherchés.

Dans ces conditions de raisonnement :

A partir d'une courbe $H = Cte$ de la figure 8, traçons en similitude de Froude les autres courbes correspondant aux valeurs des plans d'eau pour lesquels les essais expérimentaux ont été effectués. Rappelons également que le processus même des

essais (pour H et Q donnés, détermination à partir du diamètre de la tache de la valeur maximale de la circulation qu'il est possible d'obtenir dans chaque cas) nécessite de ne considérer que l'enveloppe extérieure des points expérimentaux).

On constate que les courbes obtenues en similitude de Froude peuvent très bien représenter les courbes enveloppes des points expérimentaux.

b) Avec des hypothèses similaires, supposons (fig. 9) que la partie inférieure de la courbe des conditions critiques de début d'entraînement d'air corresponde à un modèle, tandis que la partie supérieure correspondrait à un autre modèle.

En tenant compte du rapport λ^2 des sections entre les tuyaux d'aspiration de ces deux modèles d'échelle linéaire λ , l'échelle des vitesses permettant d'obtenir la similitude des conditions du début d'entraînement d'air serait de l'ordre de 1,1-1,2.

Ainsi il apparaît deux résultats :

- les conditions de formation sur la surface libre de la partie hyperbolique supérieure de l'entonnoir du vortex seraient bien en similitude de Froude;
- les conditions de début d'entraînement d'air dans la prise seraient en similitude si, au minimum, l'égalité des vitesses modèle-prototype était réalisée.

Bien entendu, il serait désirable de vérifier ces deux résultats sur le modèle de grande échelle.

Notons enfin que le rapport Γ'/Γ de la valeur de la circulation à l'entrée du modèle à la circulation dans la zone irrotationnelle du vortex a été trouvée constante et égale au rapport 3/2, quelle que soit la dissymétrie réalisée à l'entrée du modèle.

7. Conclusion

Dans le présent rapport, nous avons essayé de réunir les données expérimentales pratiques pouvant permettre, lors de toute étude d'écoulement où des phénomènes de vortex risquent de se produire :

- d'éviter dans la mesure du possible cette formation (influence des différentes limites géométriques sur les conditions d'apparition du vortex);
- de supprimer ces phénomènes de vortex, les autres anomalies d'écoulement (bulles, torches,...), et d'une façon plus générale les mouvements tourbillonnaires à l'entrée des orifices de succion (différents dispositifs anti-vortex et description notamment du dispositif de grilles latérales en métal déployé);
- de connaître les règles de similitude à observer pour la réalisation d'un modèle, permettant de contrôler si des vortex peuvent se former, et dans ce cas, de mettre au point et de contrôler la validité du dispositif anti-vortex adopté.

Nous tenons à remercier vivement les Sociétés ou Laboratoires qui ont répondu à notre enquête et grâce auxquels il a été possible d'établir les fiches d'informations jointes en annexe, après la bibliographie.

Il reste néanmoins qu'une telle étude n'est jamais

complète. Nous souhaitons que la diffusion de ce rapport favorise le rassemblement de nouvelles informations sur ce sujet et permettent ainsi de compléter cette étude.

8. Discussion du rapport par la Section Machines

Au cours de la discussion, trois points ont été notamment évoqués concernant l'influence de la rotation de la pompe sur la formation du vortex, la corrélation entre les mouvements de rotation modèle et prototype, les difficultés d'une détermination de la similitude des vortex dans un cas général.

En ce qui concerne le premier point, il a été possible de reproduire sur le modèle des vortex semblables à ceux de la nature sans installer de modèle de pompe à la place de la pompe prototype. De plus, même pour des pompes induisant une forte prérotation, l'influence de celle-ci sur la formation du vortex doit rester faible (sauf peut-être au débit nul), car elle reste très localisée et beaucoup moins importante que le moment cinétique créé par les conditions d'alimentation.

La corrélation entre les mouvements de rotation modèle et prototype est rendue délicate, car le vortex peut être également la conséquence d'une instabilité dans un écoulement symétrique. Cependant, que le vortex soit dû à une dissymétrie ou à une instabilité, il pourra être supprimé par les mêmes moyens. Il faut toutefois remarquer que des conditions incorrectes de rugosité dans la partie amont du modèle (ceci étant surtout valable pour de fortes valeurs du rapport de similitude) peuvent faciliter la création de vortex sur le modèle qui n'apparaîtraient pas dans la nature.

La difficulté d'une détermination de la similitude des vortex dans le cas général, confirmée par les remarques précédentes, ressort également du nombre important de paramètres susceptibles d'intervenir dans leur formation. En fait, il faut choisir à l'avance l'aspect du phénomène auquel on s'intéresse (début de formation, entraînement d'air...) et en conséquence, en déduire les paramètres essentiels à prendre en compte.

Bibliographie sommaire

Principales études effectuées actuellement sur les phénomènes de vortex dans un liquide à surface libre.

ACKERS (P.) et CRUMP (E.). — The Vortex drop. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 16 (août 1960).

ALLEN (J.) et TAYLOR (G.A.). — A note on free vortices observed in scale model tests of a bellmouth overflow spillway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 10 (juillet 1958).

BENFRATELLO (G.). — Ricerca sperimentale su scarichi a pozzo aventi imbocchi di forme speciali. *L'Acqua*, n° 3 (mai-juin 1962).

BERGE (J.P.) et LABETOUILLE (J.). — Suppression des vortex dans les chambres d'aspiration des pompes de circulation de la centrale thermique de Creil-Saint-Leu. *La Houille Blanche*, n° B (1958).

BERGE (J.P.). — Suppression de l'entraînement d'air par vortex dans quelques cas particuliers. *Le Génie Civil* (15 décembre 1959).

- BERGE (J.P.). — Etat actuel des recherches sur les vortex dans un liquide à surface libre. C.R.E.C., département L.N.H. (16 décembre 1960).
- BERGE (J.P.). — Etude des phénomènes de vortex dans un liquide à surface libre. Méthodes optiques expérimentales d'étude. *Bulletin du C.R.E.C.* (n° 13, octobre 1965).
- BERGE (J.P.). — Etudes de vortex. Différents rapports. C.R.E.C., département L.N.H. (de 1957 à 1964).
- BIESEL (F.). — Réflexions sur les vortex de vidange. *La Houille Blanche*, n° 4 (août-septembre 1955).
- BINNIE (A.M.) et HOOKINGS (G.A.). — Laboratory experiments on whirlpools. *Proceedings of the Royal Society*, Série A, vol. 194 (1948).
- BLAISDELL (F.W.). — Hood inlet for closed conduit spillways. *Proceedings of the American Soc. of Civil Eng. : Hydraulic Division*, vol. 86 (mai 1960).
- BONNIN (J.). — Recherche d'une similitude des vortex. Publications S.E.H. (août 1960).
- BOUGHTON (N.O.). — Laboratory studies on the use of siphons and vortex chambers for the inclusions of air at secondary intakes. 8^e Congrès de l'A.I.R.H., Montréal 1959. Publication D.5.
- CAMICHEL (C.) et ESCANDE (L.). — Sur la similitude des vortex. C.R.A.S., tome 194 (21 mars 1932).
- CAMICHEL (C.). — Sur la détermination des vitesses dans les liquides. *Revue générale de l'Electricité*, tome VI (22 novembre 1919).
- CAMICHEL (C.) et ESCANDE (L.). — Similitude hydrodynamique des modèles réduits. Chap. VI : Recherches sur les vortex. *Publ. Scient. et Techn. Ministère de l'Air*, n° 127.
- CAMICHEL (C.), ESCANDE (L.) et CRESCENT (S.). — Les évacuateurs de crues à galeries souterraines. *La Technique Moderne*, tome XXV, n° 13-14-15 (1933).
- DENNY (D.F.). — An experimental study of air entraining vortices in pump sumps. *The Chartered Mechanical Engineer*, vol. 2, n° 8 (1955).
- DENNY (D.F.). — An experimental study of air entraining vortices in pump sumps. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 170 (1956).
- DENNY (D.F.) et YOUNG (G.A.). — The prevention of vortices and swirl at intakes. 7^e Congrès de l'A.I.R.H., Lisbonne 1957. Publication C.1.
- DOUKINE (A.S.). — Evacuateurs de blocs de glace par vortex. *Travaux hydrauliques*, n° 3 (1953) (en russe).
- DUMITRESCU (D.), IAMANDI (C.) et IANCU (C.). — L'instabilité de l'écoulement dans les chambres d'aspiration. Société Hydrotechnique de France, VIII^{es} Journées de l'Hydraulique, Lille 1964.
- EINSTEIN (H.A.) et HUON LI. — Steady vortex flow in a real fluid. *Proceedings of Heat Transfer and fluid Mechanics Institute* (1951).
- EINSTEIN (H.A.) et HUON LI. — Vortex motion in viscous fluids studied in apparatus consisting of concentric glass cylinders. *Civil Engineering* (septembre 1953).
- EINSTEIN (H.A.) et HUON LI. — Le vortex permanent dans un fluide réel. *La Houille Blanche*, n° 4 (août-septembre 1955).
- ESCANDE (L.). — Remarque sur les vortex pouvant exister en tête des évacuateurs de crue à galerie souterraine. Compléments d'hydraulique, 1^{re} partie, chap. VI (1947).
- ESCANDE (L.). — Sur l'utilisation des vortex en tête des évacuateurs de crues à galerie souterraine. C.R.A.S., tome 215 (28 septembre 1942).
- ESCANDE (L.). — Sur la similitude des phénomènes d'entraînement d'air par l'eau en mouvement. C.R.A.S., tome 209 (16 octobre 1939); et *Hydraulique Générale*, tome 2.
- FOREIEV (V.S.). — Quelques propriétés d'un vortex stable. *Travaux hydrauliques*, n° 5 (1951), (en russe).
- FOREIEV (V.S.). — Expérience de la production et le calcul des vortex. *Travaux Hydrauliques*, n° 4 (1954), (en russe).
- FOREIEV (V.S.) et CHILIMOV (A.I.). — L'expérience de l'exploitation des vortex à la centrale de Bourdjarsk. *Travaux Hydrauliques*, n° 10 (1959), (en russe).
- FRASER (W.H.). — Hydraulic problems encountered in intake structures of vertical wet, pit pumps and methods leading to their solution. *Transactions A.S.M.E.*, vol. 75 (mai 1953).
- GIBSON (A.H.). — *Hydraulics and its application* (1930).
- GRIDNEV (I.D.) et POBESIMJKI (A.D.). — Evacuation de la glace en formation à travers les turbines au moyen de vortex. *Travaux Hydrauliques*, n° 6 (1952), (traduit du russe).
- HAINDEL (K.). — Contribution to air entrainment by a vortex. 8^e Congrès de l'A.I.R.H., Montréal 1959. Publication D.16.
- HOEFFKEN (A.). — Beitrag zur Kenntnis der Wirbelbewegung in zähen Flüssigkeiten. Karlsruhe 1940.
- HOLTORFF (G.). — La surface libre et la condition de similitude du vortex. *La Houille Blanche*, n° 3 (mai-juin 1964).
- ISAAKIAN (S.M.). — Les vortex dans les installations hydro-techniques. *Izvestia Akad.*, 3 (1955), (en russe).
- IVERSEN (H.W.). — Studies of submergence requirements of high specific speed pumps. *Transactions A.S.M.E.*, vol. 75 (mai 1953).
- KERR (S.L.) et MOYER (S.). — Hydraulic Engineering problems at Southwark Generating Station. *Transactions A.S.M.E.*, vol. 64 (1942).
- KOLF (R.C.) et STEVENS (J.C.). — Vortex flow through horizontal orifices. *Proceedings A.S.C.E.*, vol. 83 (décembre 1957).
- KOLF (R.C.) et ZIELINSKI (P.B.). — The vortex chamber as an automatic flow control device. *Proceedings of the American Soc. of Civil Eng.*, vol. 85 (décembre 1959).
- LABETOULLE (J.) et BERGÉ (J.P.). — Suppression des vortex dans les chambres d'aspiration des pompes de circulation de la centrale de Creil-Saint-Leu. *La Houille Blanche*, n° B (1958).
- LAMB (H.). — *Hydrodynamics* (1932).
- MARKLAND (E.) et POPE (J.A.). — Experiments on a small pump section well, with particular reference to vortex formations. *The Chartered Mechanical Engineer*, vol. 2, n° 8 (octobre 1955).
- MARKLAND (E.) et POPE (J.A.). — Experiments on a small pump section well, with particular reference to vortex formations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 170 (1956).
- NELSON (M.E.) et JOHNSON (H.). — Vortex problems at intakes for lock hydraulics systems. 8^e Congrès de l'A.I.R.H., Montréal (1959). Publication B.12.
- POLIKOVSKI (V.) et PERELMAN (R.). — La formation de vortex dans un liquide à surface libre (en russe).
- POSEY (C.J.). — Earth's rotations has little effect on vortex motion. *Civil Engineering* (décembre 1953).
- POSEY (C.J.) et HSIEN CHING Hsu. — How the vortex affects orifice discharge. *Engineering New Record* (mars 1950).
- QUICK (M.C.). — Scale relationship between geometrically similar free spiral vortices. *Engineering and public review*, (septembre 1962).
- RICHARDSON (C.A.). — Submergence and spacing of suction bells. *Water Supply* (1941).
- ROUSE (H.). — *Engineering Hydraulics* (1950).
- SEDDON et ANWAR. — Measuring flow velocities optically. *Engineering*, (6 septembre 1963), pp. 318-319.
- STEPANOFF (A.J.). — Centrifugal and axial flow pumps (1948), pp. 363-367.
- THOMSON (H.) (Lord KELVIN). — On vortex motion. *Transl. on the Royal Society of Edinburgh*, vol. 25 (1869).
- VALENBOIS (J.). — Memento d'hydraulique pratique. Collection L.N.H., Eyrolles.
- VASSILICHIN (T.M.). — Essais sur modèle de vortex. *Travaux hydrauliques*, n° 8 (1953), (en russe).
- VIPARELLI (M.). — Type particulier d'embouchure et écoulement à vortex. *L'Energia Elettrica* (octobre 1950), (trad. S.E.R.H.).
- WELTMER (W.W.). — Suction intake design for vertical circulating pumps. *Proceedings of the Illinois Institute of Technology*, III (1949).
- WESKE (J.R.). — On the origin and mechanism of vortex motion at inlet of intakes placed near a flat surface. *Univ. of Maryland*, Tech. note B.N. 152 (1958).
- WORSTER (R.C.). — Vortex formation in pump suction wells. *The British Hydromechanics Research Association* (1950).

ENQUETE VORTEX
Catégorie I - Vidange par gravité
Classe A - Prises ordinaires

I - A - 1 VIDANGE D'UN CANAL DE LABORATOIRE

- a) Caractéristiques principales de l'installation :
- la chambre est constituée par la partie aval d'un canal de section carrée de 0,80 m et 12,30 m de long,
 - 2 prises, dont l'une (prise n° 1) sert à l'alimentation d'une turbine Francis (chute nette : 4,4 m - Sens trigonométrique), l'autre (prise n° 2) à la vidange gravitaire,
 - hauteur maximale d'eau h au-dessus de chaque prise (fonctionnement séparé) :
prise n° 1 = 1,24 m prise n° 2 = 1,10 m
 - débit maximum de chaque prise fonctionnant séparément :
prise n° 1 = 165 l/s prise n° 2 = 300 l/s

b) schémas :

c) Renseignements complémentaires :

- Dans les conditions indiquées en (a) :
prise n° 1 (turbine) : 1 vortex avec entraînement d'air, très stable, avec de très courtes interruptions de quelques dizaines de secondes, déplacement irrégulier dans le sens inverse (repère A)
prise n° 2 : 2 vortex éphémères sans entraînement d'air (repère B)
- Dispositif anti-vortex constitué par un masque en tôle recourbé aux deux extrémités inclinées de la tôle de 28° - Efficacité totale.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche

Ecole du Génie Rural
Avenue du Maine - XV° -
(M. CARLIER)

ENQUETE VORTEX
Catégorie I - Vidange par gravité
Classe A - Prises ordinaires

I - A - 2 = Bassin de compensation de la Maya à Arolla

a) Caractéristiques principales de l'installation :

- une seule prise $\varnothing$ 2,4 m
- hauteur d'eau au-dessus de la prise 2,3 à 6 m,
- débit = 12,6 m³/s.

b) Schémas :

c) Renseignements :

- vortex sur la surface libre, avec entraînement d'air,
- échelle linéaire du modèle : 1/6
- échelle des débits : 1/27,2
- dispositif anti-vortex constitué par un écran horizontal au-dessus de la prise, et un écran vertical dans le chenal d'alimentation de façon à repousser autant que possible en amont la formation de vortex,
- les entraînements d'air jusqu'à la prise ne paraissent plus à craindre,
- installation non encore en service.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Laboratoire d'Hydraulique de l'Ecole
Polytechnique de l'Université de
LAUSANNE
(M. Ed. RECORDON)

ENQUETE VORTEX
Catégorie I - Vidange par gravité
Classe A - Prises ordinaires

I - A - 3 - Bassin de compensation de Bodmen à Zermatt

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- prise d'eau inclinée avec écoulement en charge à partir d'un certain niveau,
- section de la prise = $\phi = 1,35$ m,
- débit de la prise : $8,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

b) schémas :

c) Renseignements complémentaires :

- vortex de très courte durée, et entraînements d'air très importants sous forme de bulles,
- étude sur modèle réduit d'échelle linéaire 1/6,
- échelle des débits : 1/36
- amélioration des formes hydrauliques à l'entrée de la chambre, et détermination ensuite de la hauteur critique (cote 2062,40),
- installation en cours de construction.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Laboratoire d'Hydraulique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne (M. Ed. RECORDON)

ENQUETE VORTEX
Catégorie I - Vidange par gravité
Classe A - Prises ordinaires

I - A - 4 : Aménagement hydro-électrique de la Basse-Durance
Prise d'eau de l'usine de Salon

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- retenue sur le canal de dérivation de la Basse-Durance avec 3 prises d'alimentation en eau des différents groupes, vannes de vidange de fond et un déversoir latéral de sécurité,
- débit de chaque prise : $83 \text{ m}^3/\text{s}$
- hauteur d'eau pouvant varier de 11,00 m à 12,75 m au-dessus du radier.

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- formation de vortex sur la prise RD, en raison des formes dissymétriques des bajoyers latéraux de cette prise,
- étude sommaire sur un modèle, non prévu initialement à cet effet, d'échelle linéaire 1/30,
- suppression de ces phénomènes sur le modèle en rendant des formes symétriques, par rapport aux axes de chaque prise, de tous les bajoyers latéraux,
- réalisation en cours de construction.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche Centre de Recherches et d'Essais de CHATOU

ENQUETE VORTEX
Catégorie I - Vidange par gravité
Classe A - Prises ordinaires

I - A - 5 - EVACUATEUR DE FOND SUR LA RIVIERE GÜLÜC

a) Caractéristiques principales de l'installation :

- Evacuation sur la rive droite, à l'extrémité du barrage,
- Section $3 \times 2,75$ m
- hauteur d'eau : 10 m
- débit moyen : $70 \text{ m}^3/\text{s}$

b) Schémas :

c) Renseignements complémentaires :

- Vortex observés dans la nature pour un débit de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, avec entraînement d'air et de matériaux dans l'évacuation,
- diamètre approximatif du vortex à la surface libre : de 0,75 à 1,25 m
- essais sur modèle,
- suppression du vortex par construction d'une paroi verticale (cf figure)

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche

Middle East Technical University
ANKARA
(Dr. Ing. Günther Garbrecht)

ENQUETE VORTEX
Catégorie I : vidange par gravité
Classe A : prises ordinaires

I - A - 6 - USINE HYDROELECTRIQUE BASSE CHUTE (Uruguay)

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- 5 prises identiques de $10 \times 6,75$ m
- distance entre 2 axes de prise = 14 m
- hauteur d'eau au-dessus de chaque prise = de 23,50 à 26 m
- débit ordinaire de chaque prise = $1\,084 \text{ m}^3/\text{s}$

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- Dispositif anti-vortex constitué par une partie horizontale inclinée et efficace pour toutes variations du plan d'eau entre 37,50 et 44 m.
- Etudes sur modèle aux échelles linéaires 1/84 et 1/100 (similitude de Froude)

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Instituto de Maquinas
MONTEVIDEO (M. O.J. MAGGIOLLO)

ENQUETE VORTEX
Catégorie 1 - Vidange par gravité
Classe A - Prises ordinaires

I - A - 7 - BARRAGE SUR LE RIO MAYO (Colombie)

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- prise d'eau en amont d'un barrage
- hauteur d'eau au-dessus de la prise = de 3 à 8 m
- débit de la prise 12,5 m³/s

b - Schémas :

ELEVATION COUPE A

c - Renseignements complémentaires :

- Formation assez importante de vortex, entraînant de l'air dans la conduite forcée (formation facilitée par l'ouverture de la vanne RG) ;
- Déplacement de la prise d'eau pour suppression de la zone d'eau morte, permettant la diminution de la fréquence de formation du vortex et la suppression de l'entraînement d'air et de ce fait de celui des matériaux dans la prise.

Essais réalisés au cours d'une étude de barrage (érosion, dessablage...) à l'échelle linéaire de 1/33,3 (similitude de Froude)

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Institut Hydraulique de l'Université de Gand
(Prof. L.J. TISON)

ENQUETE VORTEX
Catégorie 1 - Vidange par gravité
Classe B - Siphons -

I - B - 1 - CENTRALES ELECTRIQUES HEMWEG II ET III A AMSTERDAM

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- 2 prises par siphon dans une conduite d'alimentation
- diamètre de passage de l'écoulement $\phi = 200$ mm
- hauteur d'eau au-dessus du radier = 0,25 à 0,060 m
- débit de chaque prise = 0,060 m³/s

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- Vortex permanent pour une hauteur $H = 0,30$ m (I ou II ou I + II)
- Vortex non permanent pour une hauteur $H = 0,36$ m (I ou II ou I + II)
- Suppression des vortex par approfondissement du fond du canal et enfoncement de la base de la tulipe de 17 cm
- Etude sur modèle à l'échelle linéaire 1/4,6 (similitude de Froude)

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Waterloopkundig Laboratorium DELFT
(M. S.E. PRINS)

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe A - Verticale descendante

II - A - 1 - EXPERIENCE AUX ATELIERS DE VEVEY

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- alimentation de la pompe en surface, par un déversoir de longueur 2 m
- pompe 1/2 axial, hauteur de refoulement 10 m, sens trigonométrique
- hauteur d'eau au-dessus de la base de la tulipe : 0,742 m
- débit d'aspiration : 1 m³/s

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- Vortex non permanent, de sens inverse, avec entraînement d'air et généralement localisé entre mur et pompe. Le vortex n'apparaissait que si la surface libre était calme,
- Dispositif anti-vortex constitué par une plaque de ϕ 1 500 disposée sur la base de la tulipe - Efficacité totale.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche

Ateliers de Constructions Mécaniques
de VEVEY
(M.J. ORTLIEB)

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe A - Verticale descendante

II - A - 2 - PRISE D'EAU EN CANAL

a - Caractéristiques principales de l'installation

- prise d'eau (forcée) au centre d'une extrémité d'un canal rectangulaire,
- débit variable de 20 à 80 l/s ,
- hauteur d'eau variable de 20 à 120 cm.

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- formation importante de vortex - avec ou sans aération - ,
- étude sur prototype réalisée en Laboratoire,
- étude de l'influence de l'écartement des grilles du dispositif de grilles latérales en métal déployé du Centre de Chatou,
- caractéristiques des grilles étudiées 7.6.20 (Sté Le Métal Déployé, 6 rue Daru - PARIS)
- construction des courbes de hauteur critique dans 3 cas, montrant l'influence du dispositif et permettant pour un cas similaire d'installation et compte tenu des caractéristiques hydrauliques de déterminer l'écartement des grilles pour un type donné de mailles.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Centre de Recherches et d'Essais
de CHATOU

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe A - Verticale descendante

II - A - 3 - Cascade du Trocadéro - 1931

a - Caractéristiques principales de l'installation

- prise d'eau forcée dans un bassin (alimentation latérale à partir d'une cascade)
- débit = 500 l/s (une pompe)
- hauteur d'eau = 0,65 m.

b - schémas

c - Renseignements complémentaires

- apparition d'un vortex permanent, mettant à nu la moitié de la surface des grilles après environ 1/2 heure de fonctionnement.
- Mise en place de 2 murettes en croix, noyées sur les grilles - Il ne restait qu'un petit tourbillon, animé d'un mouvement de précession et disparaissant à chaque fois que la queue du vortex passait sur une des branches de la croix.
- Remarque = une seule murette mise dans l'axe AA et émergeant, donnait lieu à la formation de 2 gros vortex, découvrant les grilles et tournant en sens inverse.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Maison L. BERGERON
PARIS

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - Verticale ascendante

II - B - Chambre d'aspiration des pompes d'épuisement d'une forme de radoub

a - Caractéristiques principales de l'installation

- bassin d'aspiration rectangulaire, comprenant 4 pompes et pouvant être alimenté de deux façons différentes (soit à partir d'un tunnel C, soit à partir des vannes D)
- 4 pompes de débit unitaire 6 m³/s, de mises en service séparées ou simultanées, groupant toutes les combinaisons possibles

hauteurs d'eau dans le bassin (m)	6,20	4,20	3,20	2,20
nombre de pompes en service	4	3	2	1
débit unitaire (m ³ /s)	6,2	5,5	3,1	4,5

b - Schémas

c - Renseignements complémentaires

- Etude sur modèle réduit d'échelle linéaire 1/10 en similitude de Froude,
- Dans le cas de fonctionnements dissymétriques des pompes on observe des mouvements tourbillonnaires avec formation de vortex depuis le fond du bassin ou depuis la surface libre jusqu'à la pompe - Dans ce dernier cas il peut se produire un désamorçage de celle-ci.
- Mise en place d'un dispositif anti-vortex constitué de cloisons pleines déflectrices et de grilles sur toute la hauteur d'eau de la chambre.
- Dispositif en cours d'installation.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni des renseignements permettant la rédaction de cette fiche.

Maison L. BERGERON

ENQUÊTE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - Verticale ascendante

II - B - 1 - STATION DE POMPAGE DE BOURNE SUD FEN

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- Installation comprenant 2 pompes verticales de caractéristiques :
(pour une hauteur d'eau au-dessus du radier comprise entre 0,75 et 1,05 m)

- hauteur statique	3,95 m	3,95 m
- vitesse	720 t/mn	580 t/mn
- débit	900 l/s	565 l/s

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- des vortex importants se sont produits dans le bassin d'aspiration, aussi bien avec une qu'avec 2 pompes. Ces phénomènes étaient accompagnés d'un bruit de cavitation,
- radeaux de bois autour de chaque pompe peu efficaces,
- avec une tôle rectangulaire de 4,8 x 1,8 m placée à la cote 0,30 m les vortex ne se formaient que pour des niveaux d'aspiration compris entre 0,75 et 1,05 m. Les vortex commençaient toujours dans le coin droit et avaient tendance à osciller le long du bord de la tôle.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche

Compagnie de Construction Mécanique
Procédés Sulzer - PARIS
(M. de SAINT VAURY)

ENQUÊTE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - Verticale ascendante

II - B - 2 - STATION DE POMPAGE DE LENDALL - RIVIERE OUSE (YORKS)

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- La station comprenait 2 pompes
- hauteur statique 3,20 m 3 m
- vitesse 720 t/mn 580 t/mn
- débit 650 l/s 1300 l/s

b - Schémas

c - Renseignements complémentaires

- à l'origine les vortex se sont produits pour tous les niveaux d'aspiration (diamètre approximatif 0,45 m sur la grosse pompe). Vortex non permanents, de sens inverse.
- il n'y a pas encore été prévu de dispositif anti-vortex.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche

Compagnie de Construction Mécanique
Procédés Sulzer - PARIS
(M. DE SAINT VAURY)

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - Verticale ascendante

II - B - 3 - POMPES DE DOCKS POUR CARDIFF

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- 3 pompes du type vertical hélicocentrifuges aspirant sur un côté d'un canal qui avait été fabriqué antérieurement,
- canal normalement noyé, mais dénoyé pour les faibles hauteurs d'eau,
- hauteur statique 6,1 m
- vitesse 140 t/min
- débit 7 000 l/s

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- pour déterminer un dispositif anti-vortex un modèle a été réalisé (modèle à air à l'échelle 1/40)
- mise en place de déflecteurs anti-vortex - Fonctionnement efficace -

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche
Compagnie de Construction Mécanique
Procédés Sulzer - PARIS
(M. de SAINT-VAULRY)

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - Verticale ascendante

II - B - 4 - CHAMBRE D'ASPIRATION DES POMPES DE CIRCULATION DE LA CENTRALE THERMIQUE DE CREIL SAINT LEU

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- 2 pompes par 1/2 chambre, avec alimentation latérale à partir de 2 puits,
- en cas de nécessité alimentation de la 1/2 chambre par un seul puits,
- pompes identiques d'un débit unitaire de : 5,5 m³/s
- hauteur d'eau au-dessus du radier pouvant varier de 3,30 à 9,10 m.

b - Schémas :

cf. schéma partiel fiche III.A-

c - Renseignements complémentaires :

- formation de vortex aérés très importants sur chaque pompe, avec des fluctuations de vitesse entraînant la mise hors service prématurée des pompes,
- étude sur modèle réduit à l'échelle linéaire 1/6,
- suppression totale du vortex et des torches sous la tulipe des pompes par le dispositif spécial de grilles latérales en métal déployé (caractéristique prototype n° 45.40 - Sté Le Métal Déployé, 6 rue Daru - PARIS). Pour les torches cf. fiche III.A -
- dispositif totalement efficace (pour tous les modes d'alimentation de la chambre), en service depuis 1957,
- cf. article en bibliographie "Suppression de vortex dans les chambres d'aspiration des pompes de circulation de la centrale thermique de Creil Saint Leu" par J.P. BERGE et J. LAURETOULLE Houille Blanche - B.1958

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche
Centre de Recherches et d'Essais
de CHATOU

Maison Bergeron et Centre de
Recherches et d'Essais de CHATOU

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - Verticale ascendante

II - B - 7 - COMPLEXE CHIMIQUE DE SAFI - STATION DE POMPAGE
EAU DE MER

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- chambre d'aspiration comportant :
 - 3 pompes d'un débit de 220 l/s
 - et 3 pompes d'un débit de 1 500 l/s
- hauteur minimale du plan d'eau (lors des plus basses eaux) : 3,15 m au-dessus du radier

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- Projet d'aménagement anti-vortex par grilles en métal déployé (dispositif LNH) prévu directement en même temps que l'installation (les formes et les fonds rocheux du site ne permettant d'autre implantation de la chambre d'aspiration).
- grilles en APS 20 A Pompey métal déployé n° 26-20, sauf n° 25.10 pour les plaques entre les pompes 220 l/s (Société Le Métal Déployé, 6 rue Daru, PARIS)
- installation en cours.

Société (ou Laboratoire ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de la fiche

Maison BERGERON - PARIS
et Centre de Recherches d'Essais
de CHATOU -

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Vidange forcée
Classe B - verticale ascendante

II - B - 8 - PRISE D'EAU SUR LE RHONE - MONTIEN

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- prises multiples d'eau en rivière (cf schémas)
- hauteur d'eau au-dessus du radier : de 1,05 à 1,80 m
- débit de chaque prise = 125 l/s

b - Schémas :

DETAIL DE LA PRISE
ELEVATION

SITUATION DE LA PRISE

c - Renseignements complémentaires :

- formation de tourbillons et de vortex sur les prises 3 à 7 pour une hauteur d'eau de 1,05 m (vortex permanents sur les prises 5 et 6),
- étude sur modèle à l'échelle 1/25, (étude des vortex sur ce modèle non prévue initialement)
- débit modèle le plus grand possible compte tenu des installations des essais, et correspondant à une échelle des débits 1/1420,
- dispositif anti-vortex constitué par un écran horizontal (cf schéma) occupant toute la surface de l'ensemble des prises d'eau,
- installation en cours de construction.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

ENQUETE VORTEX
Catégorie III - Autres anomalies
Classe A - Torches

III - A - 1 : CHAMBRE D'ASPIRATION DES POMPES DE CIRCULATION
DE LA CENTRALE THERMIQUE DE CREIL SAINT-LEU

a - Caractéristiques principales de l'installation (cf fiche II-B-4) :

- 2 pompes par 1/2 chambre, avec alimentation latérale à partir de 2 puits,
- en cas de nécessité alimentation de la 1/2 chambre par un seul puits,
- pompes identiques d'un débit unitaire de : 5,5 m³/s ,
- hauteur d'eau au-dessus du radier pouvant varier de 3,30 à 9,10 m

b - Schémas :

Schéma partiel

cf schémas complets
fiche II - B - 4

c - Renseignements complémentaires :

- formation de vortex aérés très importants sur chaque pompe, mais également formation de torche sous la tulipe de chaque pompe,
- cf fiche II.B.4
- le même dispositif de grilles latérales verticales en métal déployé qui a permis la suppression des vortex permet également la suppression des torches tourbillonnaires et de toute prérotation sous les tulipes, (Sté Le Métal Déployé, 6 rue Daru, PARIS)
- efficacité totale.

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Centre de Recherches et d'Essais
de CHATOU -

ENQUETE VORTEX
Catégorie II - Autres anomalies
Classe B - Bulles, torches

III - B - 2 : CHAMBRE D'ASPIRATION D'UNE POMPE DE CIRCULATION
DE LA CENTRALE THERMIQUE DES ANISOTILLES

a - Caractéristiques principales de l'installation :

- une pompe par chambre, avec alimentation à partir d'un collecteur en charge ø 1,75 m de 260 m de longueur environ, et desaxé par rapport à la pompe,
- débit unitaire 5 m³/s ,
- hauteur d'eau au-dessus du radier pouvant varier de 2,95 à 3,45 m

b - Schémas :

c - Renseignements complémentaires :

- formation très importante de bulles et de torches verticales ou horizontales sous la tulipe de la pompe,
- cf texte (et photographie) du paragraphe 4.3
- étude sur modèle réduit échelle linéaire 1/5 (échelle des vitesses voisine de l'unité),
- suppression de tous ces phénomènes par la mise en place d'une grille directrice verticale oblique à la sortie du collecteur, et d'une grille horizontale sous la tulipe de la pompe (à 0,10 m du radier),
- efficacité totale

Société (ou Laboratoire) ayant fourni les renseignements permettant la rédaction de cette fiche

Centre de Recherches et d'Essais
de CHATOU

Abstract

A study of vortex formation and other abnormal flow in a tank with and without a free surface

by J.-P. Berge *

1. Introduction.

Quite pronounced eddy motion is apt to occur in certain hydraulic structures when a transition occurs from free-surface to pressure flow, and other abnormal flow effects (especially vortex "streamers") are also observed, even in pressure flows.

Eddies on a free surface sometimes grow to the point of forming a kind of "funnel" or vortex at one point. Air is sometimes entrained in the central depression, and when this happens, rotational speeds increase very sharply towards the vortex centre.

Such phenomena can be observed in orifice flows (tank drains, lock chambers, power tunnel intakes, flow under a gate, reservoir or river intakes, etc.) or in pumping plant, irrespective of the pump intake orifice design (Fig. 1).

2. Aims of this study.

In the absence of precise theories whereby the likelihood of vortex formation might be predicted for each particular case, many manufacturers and research laboratories undertake several research programmes every year in an attempt to find a way of preventing vortex formation in dam water intakes in rivers or in pump intake chambers.

Conditions governing vortex formation not only depend on the hydraulic flow conditions (depth or head of water, rate of flow, etc.) and ambient conditions (especially fluid temperatures) but also on the chamber design (shaped intake or suction chamber). Ideal intake or suction chamber outlines cannot always be achieved, for civil engineering and imperative cost requirements almost invariably make it necessary to put up with considerable misalignment of the supply canal centre line and the intake or pump position, resulting in an appreciable kinetic moment and vortex formation.

The same types of test are repeated over and over again with the same imperfect devices such as floating rafts, strainers, deflecting panels at various angles, etc., until satisfactory results are finally obtained.

An attempt has now been made by "Société Hydrotechnique de France" ("Machines Section") to collate the experience of various manufacturers and laboratories for the common good. The three main points retained for consideration in this study were the following:

- (i) Vortex formation conditions (and conditions for other abnormal flow effects, where applicable);
- (ii) Anti-vortex devices;
- (iii) Vortex similitude.

The most characteristic special cases have been retained out of the replies received (they are summed up in "card-index" fashion in an appendix hereto) so that manufacturers and laboratories may acquaint themselves not only with the vortex formation conditions for such cases, but also with successful counter-measures. It is a good thing to thus be able to avoid the considerable amount of costly trial-and-error work associated with the search for a solution, which may not even then be entirely satisfactory. It is also thought the attached reference list to the principal current research into the subject may be of interest.

3. Vortex formation conditions.

Vortex formation depends on numerous parameters, notably hydraulic conditions (depth or head of water, rate of flow, etc.) and the geometry of the installation. By analysing information obtained, experimental data from the Chatou Test Centre, and published data (see bibliographical reference list herewith) it has been possible to determine the critical head or depth of water above the bellmouth intake beyond which vortices no longer entrain air.

Especially in the case of vortices formed by vertical rising suction flow, the tests have shown up the effect of chamber geometry and—for example—variation of any of the following (Fig. 2):

- (i) Distance from bellmouth to floor;
- (ii) Distance from the walls;
- (iii) Pump position in the sump;
- (iv) Bellmouth diameter;
- (v) Pipe diameter;
- (vi) Chamber intake width.

Other forms of abnormal flow liable to appear in a water intake are also worth noting, for instance the formation of a vortex "streamer" underneath the bellmouth, with large quantities of bubbles (Fig. 3 and 4).

4. Anti-vortex devices.

Contributors have drawn attention to numerous such devices, and references to others are found in published material (see bibliographical reference list herewith). Most are designed to prevent air entrainment and do not eliminate eddies near the intake orifice, as would strictly speaking be desirable for ideal pump intake conditions.

This has led to the development of a special device consisting of lateral vertical expanded metal screens by the Chatou Research Centre, which are positioned in the suction chamber parallel to the flow and symmetrically to either side of the pump (or of the suction orifice in the case of a drain) (see sketches, Figs 5 a-b).

An expanded metal screen comprises a large number of identical diamond-shaped meshes which, seen in cross-section, appear as a series of parallel blades; to ensure efficient flow deflection, the "strap" of each such "blade"

* Electricité de France.

must be fairly wide. In addition, the longer mesh diagonal must lie parallel to the eddy vector, i.e. nearly always vertical.

The lack of symmetry of this metal device thus enables lateral frictional resistance to any flow to be reduced to practically nothing in the normal direction of flow, i.e. from the intake sluice towards the suction orifice. This resistance becomes very great (and the flow may be deflected) with the flow occurring in the reverse direction, as is invariably associated with eddy formation (Fig. 5 c). This being so, experience has shown that *provided the expanded metal screen has the requisite characteristics*, vortex formation and 'streamer' effects underneath the bellmouth can be prevented completely by such screens extending over the full depth of water in the chamber. Visual observation then shows completely calm, steady flow throughout the chamber.

Suitable screen characteristics depend on hydraulic conditions (depth of water, rate of flow, etc.) and the initial fluid circulation value at the chamber inlet. These can be determined accurately by scale model tests, but a rough solution to the problem can be based on established practical solutions along the lines listed in the "card-index" herewith. (Slips II B 4 to II B 7.)

As no flow passes, through the screens during normal plane operation, loss of head due to the device is negligible; it was found to be well within normal experimental error on all the models tested.

Full panels in lieu of these screens do not eliminate the vortex, but if placed behind the screens (on the opposite side to the suction orifice) they do not affect their beneficial action, and all eddy motion is still eliminated as before. This being so, vertical expanded-metal screens are able to inhibit vortex formation in suction chambers of any shape.

A set of vertical screens facing in the direction of flow can thus be arranged by each suction orifice of an intake or in a chamber of any shape (examples are given in the appendix with the article). In the particular case of tank-fed vertical pumps, an additional vertical screen is placed behind the pump and connecting to the two lateral screens, in order to prevent formation of an unlimited dead water area behind the pump. The meshes of the third screen face in a direction ensuring a total absence of eddy formation.

The expanded metal characteristics (mesh pitch 'strap' width, etc.) and screen spacing depend on the intensity of the initial circulation at the basin inlet, also on head of water and rate of flow.

Some care is required in placing the expanded metal screens on the model (and subsequently also on the prototype). Vortex formation is not prevented if the mesh is positioned incorrectly or if the screens are unsymmetrical with respect to each other, by virtue of the very process whereby correctly installed screens prevent vortex formation.

This system also eliminates non-aerated eddy motion (overall motion on the free surface, 'streamers', rotary motion underneath the bellmouth, etc.) while regulating the flow with negligible loss of head. A further advantage of these screens is that they cannot clog up with dirt in the water as there is no flow through them. They have already been fitted in numerous installations and have invariably given the same efficient service as on the model.

5. Vortex similitude.

Though this very complicated problem is beyond the scope of this study, it was nevertheless considered interesting to approach it because of the importance of comparing model and prototype when designing an anti-vortex device.

Similitude conditions depend on the criterion considered for the comparison, which could be one of the following:—

- (i) Conditions for the formation of the initial hyperbolic portion of the vortex "funnel" on the free surface;
- (ii) Conditions for initial air entrainment;
- (iii) Air-core vortex frequency and duration under given conditions.

The choice of different comparative criteria can thus explain the numerous differences between the similitude criteria suggested by various laboratories and in published work.

These criteria are analysed, followed by a description of the main results obtained at Chatou Research Centre (Figs 6 to 9).

An experimental method was required whereby the characteristics of a vortex might accurately be determined at any given instant, from the moment of initial depression formation to that of air entrainment. The main difficulties in finding such a method were associated with vortex instability in both space and time. Direct methods of determining the vortex 'funnel' profile (point gauges, pressure pick-ups) could not be considered, as a vortex continually changes its position on the free surface, and also because of the upsetting effect of such instruments upon the flow—even if in miniaturized form.

Only an optical method could be practicable, therefore, but straight photography of the vortex shape and length also had to be given up because of its very considerable error when applied to shallow vortices.

The 'refracted ray' method developed at Chatou in 1960 gives the requisite results. It is based on the optical phenomenon whereby a caustic surface forms when light rays are diverted in passing through the dioptic air-water surface of revolution of the vortex 'funnel'. It is then merely necessary to mark out the chamber floor with a suitable scale and to measure the diameter of the dark circular patch formed by the intersection of the caustic surface and the chamber floor (see Fig. 7). The actual measurement can be done by an appropriate cinematographic recording method.

The advantage of this method is that it enables an experimental relationship to be established between circulation strength around the vortex (determined from the patch dimensions) the depth of water in the chamber, and the pump intake flow.

Tests are still in progress on the subject, but it is already quite clear from results so far that:—

- (i) Formation of the hyperbolic upper part of the vortex 'funnel' on the free surface definitely appears to comply with Froude similitude requirements;
- (ii) Given equal velocities on the model and prototype, the initial air entrainment process would also comply with similitude requirements.