

La modélisation physique des stations de pompage

Physical modeling of pumping stations

ROBERT LABORDE, RENÉ PERRET

CERG SAS

Rue Lavoisier – 38800 Le Pont de Claix

e-mail : robert.laborde@cerg-fluides.com, rene.perret@cerg-fluides.com

Les grandes centrales énergétiques, qu'il s'agisse de centrales thermiques classiques ou des îlots conventionnels des centrales nucléaires et de nombreuses implantations industrielles comportent des stations de pompage avec prise d'eau en mer ou en rivière.

La taille importante du génie civil de ces ouvrages et les puissances mises en jeu justifient des études d'optimisation conséquentes afin de rechercher la plus grande compacité tout en conservant une bonne alimentation des pompes et un rendement optimum.

Les essais sur modèle physique de tels ouvrages, respectant les règles de similitude des écoulements à surface libre, sont indispensables pour optimiser les designs hydrauliques des stations de pompage et en garantir le bon fonctionnement.

Plusieurs exemples de résolution de problèmes sont fournis en illustration de tels essais.

The large power plants, that are either classical thermal plants or conventional parts of nuclear plants and a lot of industrial factories include pumping stations with water intake from sea or rivers.

The great size of these civil works and the involved mechanical powers justify important optimization studies to seek the best compactness while preserving a good water supply of the pumps and an ideal efficiency.

Physical model tests at reduced scale on such works, complying with free surface flows similarity laws, are essential to optimize the pumping stations hydraulic design and to ensure their good performances.

Several examples of problem solution are given in order to illustrate such tests.

I ■ INTRODUCTION

Les besoins actuels en énergie et en eau nécessitent la construction en grand nombre de centrales nucléaires ou thermiques, d'unités de transfert d'eau, d'usines de traitement et de dessalement d'eau de mer. Ces équipements consomment une très grande quantité d'eau soit pour refroidir les condenseurs associés aux turbines à vapeur produisant l'électricité soit comme fluide de process.

Les besoins en eau de chacune de ces centrales, pompée soit dans la mer soit dans des lacs ou des rivières, se comptent généralement en plusieurs dizaines de milliers de m³/h. Ils sont d'ailleurs de plus en plus importants, conséquence de la puissance spécifique accrue des nouveaux projets et de l'utilisation d'eaux de refroidissement de plus en plus chaudes.

Les ouvrages de génie civil associés dans lesquels sont implantés les pompes, les filtres, les circuits sont de très grande taille. Il est nécessaire d'en optimiser les dimensions, d'une part dans l'objectif d'en réduire les coûts d'investissement, et d'autre part pour limiter leur emprise dans le paysage industriel et dans l'environnement.

Il apparaît également des situations où il s'agit uniquement d'augmenter les capacités d'installations existantes sans remettre en question leurs dimensions globales.

Or, le bon fonctionnement hydraulique de tels ouvrages requiert en général des vitesses d'écoulement limitées. Ceci entraîne alors des dimensions importantes, des hauteurs d'eau significatives afin que les installations électromécaniques associées (pompes, filtres, vannes, ...) fonctionnent dans les meilleures conditions. Il est à noter que ces installations de plusieurs mégawatts de puissance doivent fonctionner sans défaut 24 heures sur 24 et permettre, pour leur maintenance, des interventions de très courte durée.

On se trouve ainsi face à un objectif fondamental de devoir réduire les dimensions générales des ouvrages sans dégrader les écoulements ce qui ne se fait pas sans précautions ni vérifications, vu les enjeux de puissance, de disponibilité et donc de coût.

Les stations de pompage et leurs prises d'eau ont déjà fait l'objet de nombreuses études spécifiques et le concepteur expérimenté peut élaborer un projet sur la base de règles connues et vérifiées et d'une étude documentaire appropriée. Cependant, la grande diversité géométrique ou fonctionnelle

des aménagements, l'impossibilité de respecter totalement les recommandations habituelles, l'optimisation des dimensions pour réduire les coûts et la validation de la conception et des tracés conduisent généralement à réaliser des essais sur maquette à échelle réduite, en particulier pour l'ensemble de l'ouvrage d'amenée et de prise d'eau.

II ■ LES CONDITIONS DES ESSAIS SUR MAQUETTE

Les objectifs de validation de l'architecture hydraulique des ouvrages sont atteints lorsque les écoulements répondent aux critères suivants :

- absence de vortex et d'entraînement d'air à l'entrée des pompes,
- prérotation faible de l'écoulement en entrée des roues de pompes,
- profil de vitesse homogène dans la tulipe d'aspiration et fluctuations réduites.

Ces caractéristiques doivent être vérifiées pour les multiples configurations d'exploitation résultant des combinaisons du nombre de filtres et de pompes en service et des variations de niveau dans les bassins.

Les essais sur maquette permettent de simuler facilement et rapidement ces différents cas et, quand cela s'avère nécessaire, il est possible de tester rapidement des améliorations (mise en place de guideaux, de murets anti-vortex, de déflecteurs,...) jusqu'à l'obtention de la qualité d'écoulement requise.

Les essais sur maquette concernant plus spécialement les ouvrages avec écoulement à surface libre, les phénomènes à analyser sont donc sous la dépendance des lois de similitude définies par les nombres de Froude, de Reynolds, de Weber, qu'il n'est pas possible de respecter simultanément. De façon générale, les essais sont réalisés dans les conditions du respect du nombre de Froude et à une échelle suffisante pour obtenir un nombre de Reynolds et un nombre de Weber qui assurent que le comportement du fluide sur modèle sera représentatif de celui à échelle 1. Par exemple, le nombre de Reynolds minimum requis est de $3 \cdot 10^4$, une valeur double étant recommandée par le standard HIS [1].

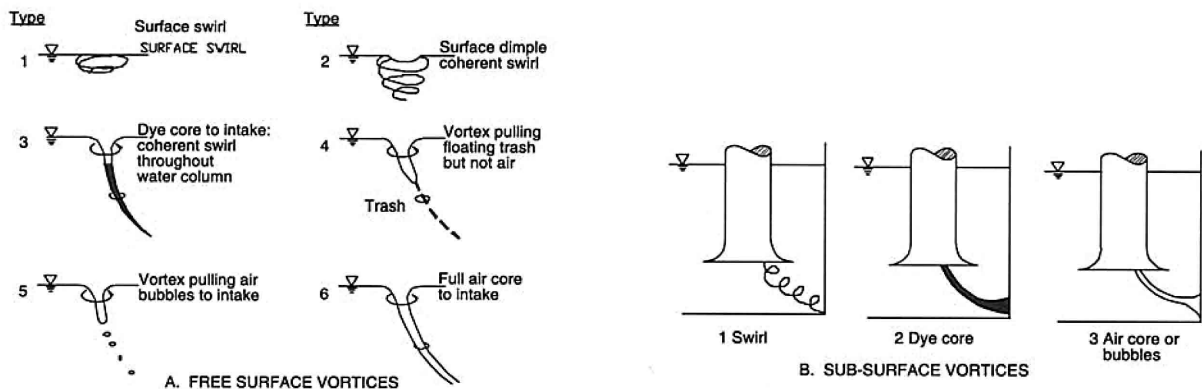
De ce fait, les études de prises d'eau sont réalisées sur des maquettes à des échelles qui peuvent être de l'ordre du 1/5 au 1/20, de taille suffisante pour permettre une meilleure observation et des mesures plus précises et plus faciles des paramètres à contrôler. Les parties sensibles de l'ouvrage nécessitant des observations particulières sont réalisées en matériaux transparents.

Les différentes observations et mesures effectuées pour valider ou corriger le projet sont tout d'abord réalisées au niveau de la surface libre, pour caractériser les écoulements de surface, analyser les effets de sillage d'éventuels obstacles amont, les positions et tailles des zones mortes, les décollements et caractériser l'état de la surface libre. Par le biais de l'usage de traceurs, l'injection de colorant, le peignage par fils de laine ou les mesures au micro-moulinet, ce type d'analyse est également entrepris pour l'ensemble des écoulements en amont des bassins de pompage.

Une attention toute particulière est apportée dans les cellules de pompage aux écoulements en approche des tulipes de pompes. Ces analyses sont réalisées en contrôlant la qualité des profils des vitesses d'arrivée, ainsi que leur dissymétrie éventuelle, les risques de création de torches ou vortex, établis ou non, visualisables au moyen de colorant.

Les observations portent ensuite sur les écoulements au niveau même des tulipes d'aspiration de pompes ou à leur voisinage immédiat avec :

- la visualisation des prérotations avant l'entrée des pompes,
- leur mesure au moyen d'un vorticimètre qui permet de quantifier l'angle de cette prérotation de l'écoulement qui, s'il est trop important, altérerait la qualité de l'écoulement en entrée de pompe et les caractéristiques de la pompe,
- la mise en évidence de vortex, particulièrement préjudiciables au fonctionnement de la pompe (voir la classification fournie sous forme de dessin ci-dessous) ; ce sont les phénomènes les plus graves. Outre le fait qu'ils sont sources de bruit, ils peuvent entraîner des phénomènes vibratoires dangereux pour la durée de vie des pompes, des fluctuations d'effort et également des entrées d'air dans les circuits ; ils doivent, bien entendu, être éliminés. Ils sont généralement mis en évidence par le biais de colorants judicieusement injectés. Ils se décomposent en deux familles :
 - les vortex de surface avec ou sans entraînement d'air,



Classification des vortex selon [1]

— les vortex noyés, de fond ou de paroi, avec cavitation ou dégazage au cœur.

- la mesure des vitesses en sortie de la tulipe permettant de chiffrer l'éventuelle non-conformité du profil d'écoulement à l'entrée de la pompe.

III ■ L'INTÉRÊT DE LA MODELISATION PHYSIQUE - EXEMPLES D'APPLICATION

Le respect des règles de similitude énoncées ci-avant permet de dimensionner convenablement une maquette. La fabrication de celle-ci avec des matériaux permettant une bonne visualisation et l'implantation de moyens de mesures adaptés, assure de pouvoir qualifier rapidement une géométrie de base du génie civil vis-à-vis des critères à respecter (vortex, prérotation, profil de vitesses, essentiellement). Il faut noter que les valeurs limites communément admises, relatives à ces critères (pas de vortex de surface plus grave que le type 2 selon classification H.I.S., 5° de prérotation, +/- 10 % de dispersion sur la vitesse) peuvent être durcis ou adoucis, selon la nature des pompes implantées ou la fréquence prévisible, en fonctionnement réel, des combinaisons critiques. Mais l'avantage fondamental qu'offre la maquette à échelle réduite, au-delà de la caractérisation de la situation de base, c'est de permettre, en cas de design inadapté, de tester assez simplement et rapidement des modifications de génie civil. Ces dispositifs correctifs sont alors conçus tant pour leur efficacité vis-à-vis du retour aux respect des critères définis que pour leur adaptation à une mise en œuvre échelle 1 ; les contraintes constructives réelles sont prises en compte dans leur élaboration. Les problèmes rencontrés sont souvent multiples, corrélés ou indépendants, et, selon la nature du projet, plusieurs solutions sont parfois envisageables et possibles pour corriger les défauts rencontrés. Nous allons dans la suite citer pour exemples quelques cas typiques de modifications de génie civil permettant de corriger des défauts d'écoulement associés à des projets étudiés dans le laboratoire hydraulique du CERG.

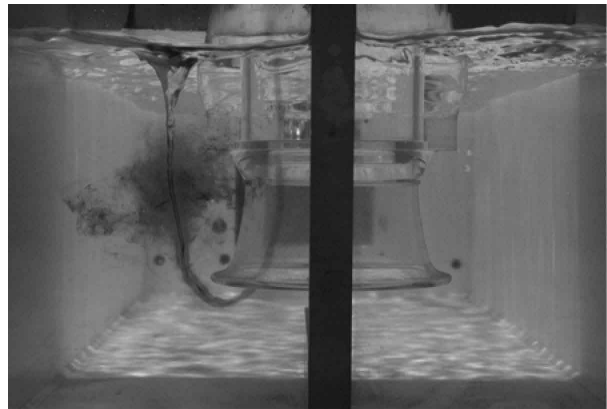
● III.1 VORTEX DE SURFACE ET PRÉROTATION

Le cadre concerne la réalisation d'une station de pompage en Arabie Saoudite sur un site de production énergétique de très grande puissance. La station complète est composée de dix pompes de très forts débits dont six sont dédiées à la génération directe de la puissance électrique (cycles combinés de grosse puissance à partir de la combustion d'hydrocarbures). La station est alimentée en eau de mer par un long canal d'environ 70 m de large. Les différents bassins de la station, des pertuis d'entrée aux cellules de pompage, mesurent environ 62 m de large et 4 m de long. La hauteur d'eau peut y varier de 5 à 8 m. Le débit nominal global du projet est de l'ordre de 320 000 m³/h. Ces six pompes de circulation ont chacune un débit nominal de 8.6 m³/s (Run Out à 11 m³/s) ; leur tulipe a un diamètre de 2,2 m en entrée. Elles sont installées chacune dans une cellule pourvue dès le départ, au niveau de la tulipe, de murets de séparation au radier et au mur du fond (« splitter walls ») et d'angles de

cellules coupés par des murs à trois pans (« corner fillets»). La maquette, réalisée à une échelle de l'ordre de 1/13, a représenté la totalité de l'ouvrage, incluant les dix lignes de filtration, les dégrilleurs, les batardeaux et les pompes annexes, ainsi qu'une partie importante du canal d'amenée. Les essais entrepris au CERG ont mis en évidence, pour certaines configurations de fonctionnement, une prérotation de l'écoulement dans le tube d'aspiration supérieure à 5°. De plus, on a constaté la présence de vortex de surface de type 3 ne pouvant être tolérés car dépassant les critères imposés par l'ingénierie en charge du projet. Le même type de problème était apparu sur un projet similaire traité quelques mois avant. Les deux illustrations ci-après présentent une vue générale de la maquette et un vortex de surface de type 6 (choisi pour la netteté de l'image) rencontré lors du projet antérieur.



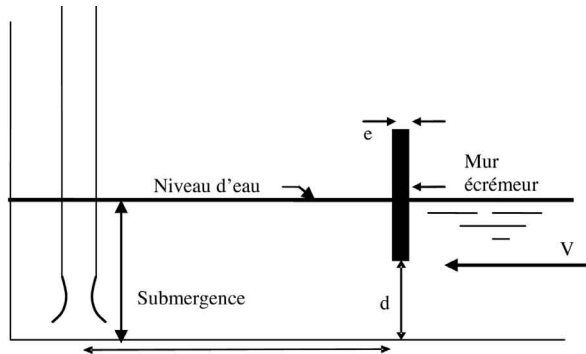
Modèle de la station de pompage au 1/13



Vortex de surface de type 6

L'origine de ces vortex réside visiblement dans les structures tourbillonnaires provenant de l'entrée des cellules, occasionnées par les lâchers associés à des décollements sur les murs latéraux, lors des configurations de fonctionnement croisé pour lesquelles il était nécessaire de pouvoir garantir le respect des critères. La prérotation semble elle-même liée aux structures rotationnelles transitant dans la cellule. Un mur écrémeur (« skimmer wall »), tel que décrit sur le schéma suivant, a été installé sur la maquette. Le prin-

cipe est de créer un obstacle empêchant la convection des structures gênantes jusqu'en fond de cellule et de réaliser, en quelque sorte, à l'aval de ce mur, une remise à zéro de la rotation. Des tests d'optimisation ont été réalisés pour définir la géométrie d'implantation de ce mur (épaisseur 'e', profondeur 'd' de noyage et 'L' distance / axe des pompes). C'est la solution issue du modèle expérimental (cf Schéma ci après) qui a été retenue et incluse dans les plans de génie civil pour la réalisation sur site.



Mur écrémeur : caractéristiques essentielles

● III.2 VORTEX NOYÉS

Une cellule de pompage étant bâtie comme une boîte avec la surface libre comme couvercle (sauf en cas de bassins noyés), les vortex de ce type peuvent être classés en trois types selon leur point d'accroche : (a) ceux partant du radier, (b) des parois latérales et (c) de la paroi de fond. Ces structures sont en général très complexes à prévoir, assez délicates à mettre en évidence et parfois très difficilement supprimables sans modification majeure du génie civil. Les exemples développés ci-après traitent de ces trois cas.

Pour le cas de type (a), les vortex étant généralement présents au droit de la tulipe, la solution consiste à occuper la place où ils sont générés, par l'adjonction de murets séparateurs (« splitters »), de cônes ou de croisillons ; les images suivantes illustrent ces dispositifs (le vortex noyé est visible sur la première image).

Des vortex noyés de type (b) ont été rencontrés lors de l'étude expérimentale traitant de la station de pompage en projet pour l'Arabie Saoudite. Les quatre pompes complémentaires (diamètre de tulipe de 3m) au débit nominal unitaire de 12,5 m³/s (Run Out à 15 m³/s) sont des pompes servant à la désulfuration des fumées. Lors des tests, ces pompes respectaient en toute configuration les critères liés à la prérotation et aux vortex de surface ; en revanche des vortex noyés sont apparus (cf photo de gauche ci après). La très grosse taille du bulbe de pompe et le corridor ainsi généré entre bulbe et tulipe provoquent une nappe de cisaillement qui s'enroule parallèlement au radier créant des vortex noyés accrochés aux murs latéraux. La solution issue des essais sur la maquette a privilégié l'érection de barres verticales appuyées sur ces murs pour désorganiser les enroulements. Les tests ont permis d'optimiser le nombre, la localisation, et les dimensions de ces barres (cf photo et schéma suivants).

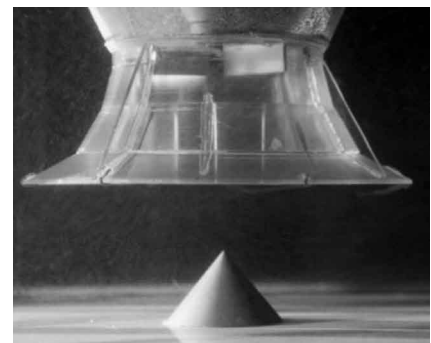
Des vortex noyés de type (c) ont été mis en évidence lors d'une étude pour améliorer les fonctionnalités d'un bassin d'essais industriels destiné à tester, à échelle 1, des pompes verticales (type Saturne), jusqu'à un débit de 10 m³/s. Le modèle bâti au CERG à l'échelle 1/10^{ème} a été conçu pour permettre comme sur le cas réel de faire varier les débits et les submersions. Deux types de pompes, d'encombrements différents (débits de design 4 et 8 m³/s avec un Run Out possible de 25 %) ont été testées. Les illustrations ci-après mettent en évidence des configurations d'écoulement non seulement complexes, mais également inadmissibles du point de vue fonctionnel. On observe la cohabitation de divers types de vortex : surface et noyés de type (b) et (c). Ici également, outre divers autres dispositifs, la solution des problèmes liés aux vortex noyés a été obtenue avec des barreaux verticaux dont l'emplacement a été optimisé sur la maquette.



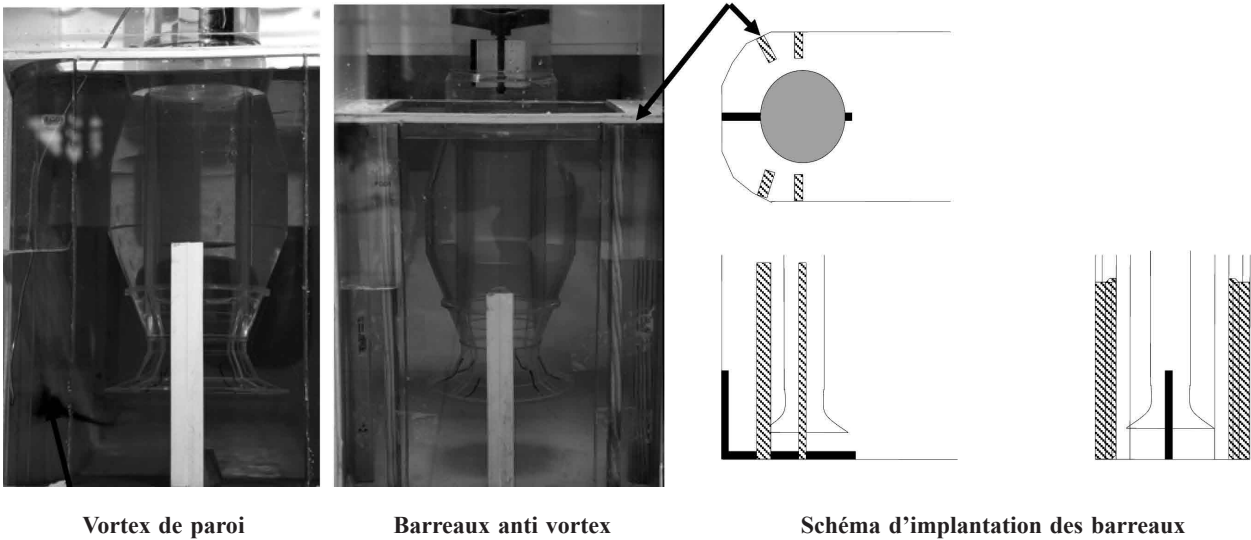
Vortex de fond



Croisillon antivortex



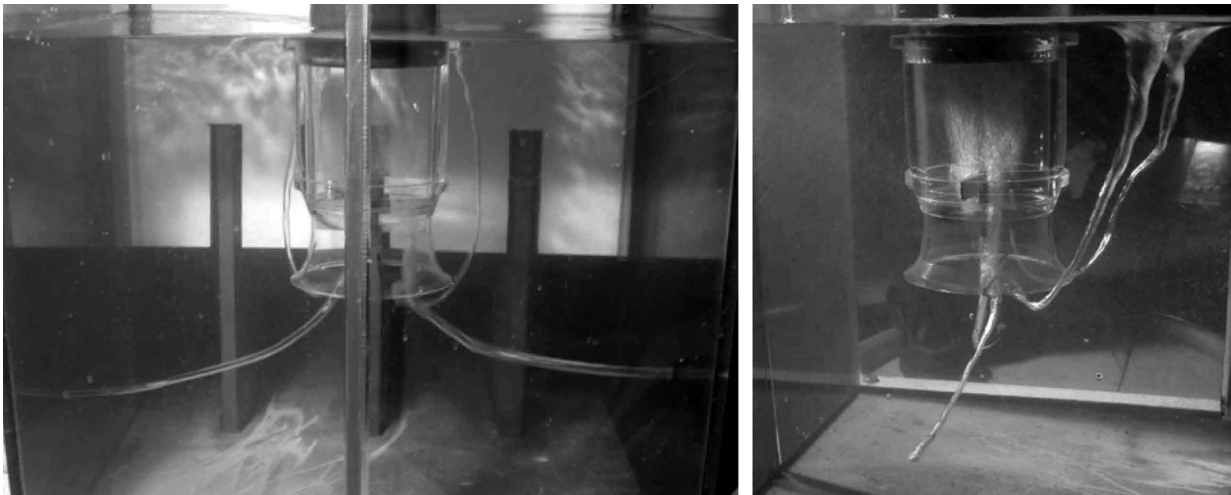
Cône antivortex



Vortex de paroi

Barreaux anti vortex

Schéma d'implantation des barreaux



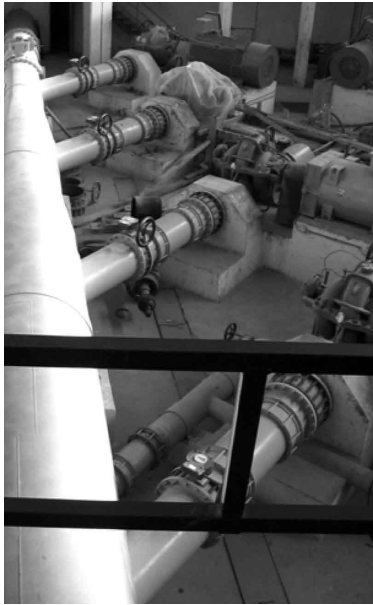
Vortex de paroi et de surface

● III.3 DISSYMMÉTRIE DU PROFIL DE VITESSE EN ENTRÉE DE ROUE DE POMPE

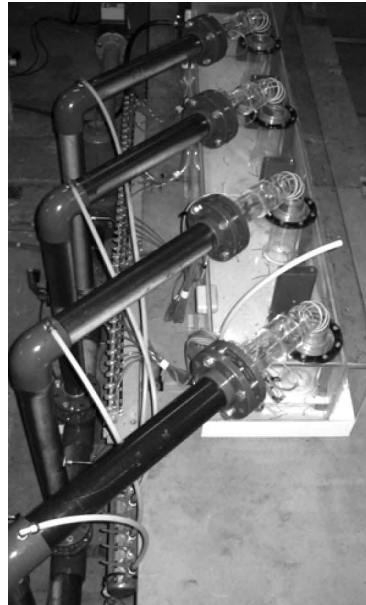
Le contrôle de ce paramètre est effectué à l'aide de bras Pitots équipés de prises de mesure de la pression totale, couplés à une prise latérale de pression statique ; généralement il y a trois bras à 120° équipés chacun de trois prises, soient au total dix prises de pression dynamique, en incluant celle au centre. Ce dispositif de mesure peut impliquer une contrainte sur l'échelle maquette de façon à respecter un diamètre minimal permettant des mesures correctes. L'exemple retenu ici concerne une station de pompage destinée à l'irrigation et située au nord-est du maroc. Elle est équipée de deux files de pompage symétriques comprenant chacune quatre pompes à plan de joint d'un débit unitaire de 750 l/s chacune. L'alimentation de chacune de ces pompes est réalisée par le biais d'un coude à secteurs relié à une tulipe

plongeant dans une bache fermée en charge (cf illustrations ci-après). La bache est un réservoir parallélépipédique de 18 m de long et de section $2.4 \times 3 \text{ m}^2$, dans lequel les pompes sont alignées. La station, en fonctionnement depuis longtemps, était le siège de cassures fréquentes sur les arbres de pompes. Une maquette a été réalisée au CERG, à une échelle de 1/8, pour déterminer la source des problèmes et proposer des solutions réalisables pour les régler.

L'ensemble des trois critères principaux n'étant pas respecté, plusieurs actions ont été entreprises. Après résolution des problèmes de vortex, il subsiste pour les profils de vitesse en entrée des pompes, des distorsions voisines de $\pm 16\%$, pour un objectif de $\pm 10\%$ selon [1]. Le coude, visible sur la photo ci-avant, en étant clairement à l'origine (centrifugation des écoulements), il a été procédé à la mise en place d'une ailette défléctrice pour rééquilibrer la répartition de débit dans la section d'entrée de pompe. La



Station échelle 1

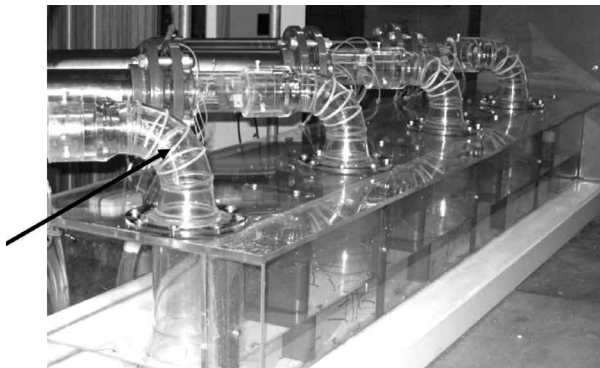


Maquette échelle 1/8



Tulipe et coude

distorsion résiduelle est alors passée largement sous la barre des 10 %. On distingue sur la photo suivante de la maquette, l'ailette implantée sur la pompe de gauche.



Maquette avec ailette dans coude

IV ■ CONCLUSION

Il ne s'agit pas ici de donner une liste exhaustive de solutions mais de s'appuyer sur des cas concrets pour illus-

trer le bien fondé de l'usage de la méthode expérimentale sur maquette à échelle réduite pour traiter des problèmes rencontrés dans le dimensionnement des stations de pompage. Ce type de modélisation est non seulement nécessaire, mais indispensable dès qu'un nouveau projet de pompage est envisagé ou lors d'une modification d'un ouvrage existant (changement des pompes, ajout de lignes de pompage, accroissement des débits, ...).

C'est, de plus, le seul outil, à l'heure actuelle, qui permet de garantir les résultats dans ce domaine de la mécanique des fluides et de proposer la géométrie exacte (nombre, dimensions et implantation) des modifications à apporter sur le génie civil. Les nombreuses études réalisées au CERG et ailleurs, suivies de réalisations sur les sites réels, prouvent, s'il en était besoin, la conformité des écoulements observés sur maquette et la validité des résultats obtenus.

V ■ RÉFÉRENCES

- [1] HIS (1998) — HIS – Hydraulic Institute Standard. *American National Standard For Pump Intake Design – Ansil. Hi-9.8*