PAR R. LONGUEMARE *

ESSAIS SUR MODÈLE RÉDUIT ET ÉTUDE D'UNE DÉFINITION MATHÉMATIQUE DE L'OUVRAGE DE DISSIPATION D'ÉNERGIE DU DÉCHARGEUR DE SAINT-CHAMAS

Introduction

L'usine de Saint-Chamas est située sur la rive nord de l'étang de Berre, au lieudit « Beau Rivage », à quelques kilomètres de la localité de Saint-Chamas, et à 40 km à vol d'oiseau au nord-ouest de Marseille.

La restitution de la chaîne Basse-Durance à la cote zéro, dans un étang presque fermé, dont la communication avec la mer Méditerranée n'est assurée que par un canal étroit, long de 6 km, entre Martigues et Port de Bouc, a posé de nombreux problèmes à E.D.F. et en particulier celui des dépôts des limons de la Durance. Ces limons extrêmement fins (leur d_{50} est de 40 microns environ) sont essentiellement transportés en suspension. Le projet d'un bassin de décantation à Mallemort, en amont de la dérivation, avait soulevé de nombreuses difficultés à l'enquête, si bien qu'il a été envisagé de stocker les limons dans la zone nord de l'étang, non utilisée par la navigation, comprise entre les embouchures de l'Arc et de la Touloubre.

Une décantation efficace des limons dans une zone aussi peu étendue de l'étang, sera obtenue à l'aide d'ouvrages appropriés, mis au point au Laboratoire des Milles près d'Aix-en-Provence, sur un modèle au 1/500^e distordu 20 fois; il s'agit de 2 digues en enrochements, l'une à la restitution de l'usine, qui dévie vers l'ouest l'écoulement le long de la rive de l'étang, l'autre à l'embouchure de la Touloubre, qui replie la veine liquide et la renvoie vers l'est (fig. 1). Le trajet ainsi parcouru par l'écoulement (environ 6 km) à proximité de la rive nord de l'étang permet une bonne décantation des limons grâce au freinage efficace des vitesses.

Le problème des limons se posait également pour

le déchargeur; il était, en effet, nécessaire de tranquilliser de la même manière l'écoulement à la sortie du déchargeur, en évitant de remettre en suspension les limons déjà déposés.

Il est alors apparu plus simple et plus économique d'aménager un bassin d'amortissement dans l'étang entre l'usine et la digue de restitution et d'utiliser les fortes vitesses de l'écoulement (environ 30 m/s) au bas du coursier du déchargeur pour dévier le jet en ajustant le déversement dans le bassin prévu à cet effet.

Etude sur modèle

L'étude a été menée sur un modèle non distordu à l'échelle du 1/50^e en similitude de Froude, au Laboratoire des Milles.

1/ Champs des vitesses à la restitution de l'usine de Saint-Chamas dans l'étang de Berre.
Saint-Chamas tail-water velocity distribution in the Etang de Berre.

* Ingénieur à E.D.F., R.E.H. ALPES-III.

2/ Forme empirique de la cuillère.
Empirical shape of the flip-bucket.

3/ Coupe de la cuillère dans le plan polaire P 6.
Section through the flip-bucket in the P 6 polar plane.

Définition mathématique de la cuillère de Saint-Chamas.

4/ Mathematical definition of the flip-bucket.

Le modèle reproduit la restitution de l'usine, le déchargeur et l'étang de Berre jusqu'aux fonds de — 4 N.G.F., sur une superficie de 200 m².

La digue de restitution est constituée par des enrochements de la catégorie 250-750 mm. Un dispositif d'alimentation permet la mesure des débits turbinés ou déchargés à concurrence du débit maximal d'équipement de 250 m³/s.

Le niveau dans l'étang est réglé automatiquement à la cote 0 N.G.F., aux limites du modèle, par un déversoir de très grande longueur.

L'ouvrage de dispersion aval, a été essentiellement déterminé par retouches empiriques successives.

Sa forme empirique, qui ressemble à une demi-cuillère, a été relevée à la pointe sèche en coordonnées X Y Z (fig. 2). A partir de ce relevé, une définition mathématique a été étudiée, d'une part pour obtenir une surface à courbure continue, et d'autre part, pour pouvoir en calculer aisément les coordonnées de coffrage nécessaires à l'exécution de l'ouvrage.

Les fonds à l'intérieur de la digue de restitution sont à la cote — 3. Au débit maximal du déchargeur, le matelas d'eau est insuffisant pour dissiper l'énergie et il a été nécessaire de creuser à la cote — 7 une fosse dont la forme en plan enveloppe l'impact du déversement.

Essai d'une définition mathématique

L'ouvrage de dissipation d'énergie est défini à partir de la section rectangulaire courante du canal de décharge, à la cote + 0,50 N.G.F.

L'ouvrage se développe sur 17 m, le bajoyer R.G., incurvé, s'élevant jusqu'à la cote + 6,00 N.G.F.

L'extrémité aval de l'ouvrage se trouve ainsi à une trentaine de mètres de l'axe du pont du C.D. 10 qui enjambe la restitution de l'usine et le canal de décharge.

La surface étudiée est rapportée à un système d'axes rectangulaires XOY, OX parallèle à l'axe du déchargeur, OY selon la dernière section courante rectangulaire du canal à la cote + 0,50, de telle sorte que l'axe du déchargeur ait pour équation $Y = 7,50$.

Les coupes dans des plans polaires verticaux sont du type hyperbolique (fig. 3); nous avons donc choisi une directrice hyperbolique dans un plan polaire d'angle D, s'appuyant sur 3 génératrices horizontales pour engendrer la surface, lorsque D varie de 0 à 90 degrés (fig. 4).

— la première génératrice, à la cote + 0,50, est un demi-cercle passant par l'origine et axée sur OY d'équation :

$$R = 13,5 \sin D, \text{ pour } 0 \leq D \leq 90 \text{ degrés}$$

— la seconde génératrice, de cote + 0,90, est un quart de cercle de rayon 13,50 centré à l'origine des axes : $T = 13,5$;

— quant à la troisième génératrice, de cote + 6,00, elle n'a pu être approchée suffisamment qu'en prenant une équation de la forme :

$$P = a + b \sin^2 D + c \sin^3 D + d \sin^4 D$$

La résolution du système d'équations linéaires aboutit à la relation :

$$P = 17 - 11,09679 \sin^2 D + 8,84552 \sin^3 D - 1,24873 \sin^4 D$$

La directrice hyperbolique dans le plan polaire d'angle D, d'axes OZ vertical et OU horizontal, est de la forme classique :

$$U = \frac{eZ + f}{gZ + h}$$

La résolution du système d'équations linéaires obtenu en écrivant que la directrice passe par les 3 génératrices définies précédemment aboutit à l'équation de la surface cherchée :

$$U = \frac{(68,850 P + 5,40 R - 5,50 PR) Z - 32,40 R - 34,425 P + 4,950 PR}{(74,250 - 0,40 P - 5,10 R) Z - 66,825 + 2,550 R + 2,40 R}$$

Cette équation est de la forme :

$$U = f(Z, \sin D, \sin^2 D, \sin^3 D, \sin^4 D, \sin^5 D)$$

avec :

$$0 \leq D \leq 90 \text{ degrés}$$

Tous les calculs de définition, les résolutions des systèmes d'équations linéaires, puis le calcul des coordonnées de coffrage de cette surface ont été effectués à la CAB 500 en PAF.

La précision des résultats porte sur la 3^e décimale; elle n'a pu être obtenue qu'en conservant la 5^e décimale dans tous les calculs d'établissement et de résolution des définitions mathématiques de la surface de l'ouvrage.

Vérification sur modèle

La surface ainsi définie par ces coordonnées U, Z, D, a été réalisée sur le modèle au 1/50^e à l'aide de gabarits très précis (fig. 5).

Durant les essais de vérification, nous avons observé que les nappes inférieures et supérieures de la veine sont plus régulières et plus stables que celles obtenues avec la forme empirique.

Au débit maximal de 250 m³/s, le jet atteint la cote maximale 25 N.G.F. (fig. 6 a).

Durant la réalisation de la cuillère sur le modèle, 9 prises de pression ont été scellées afin d'évaluer les efforts dynamiques supportés par l'ouvrage. Pour un débit déchargé maximal de 250 m³/s la pression maximale enregistrée est de 12 t/m² dans le profil P 6 (D = 25 degrés; cote : + 1,50).

5/ Gabarits pour la réalisation de la cuillère sur le modèle.
Templates used in building the model flip-bucket.

6 a/ Déversement à 250 m³/s.
Spillway operation at 250 cumecs.

6 b/ Déversement à 166 m³/s.
Spillway operation at 166 cumecs.

6 c/ Déversement à 83 m³/s.
Spillway operation at 83 cumecs.

Conclusions

Les essais sur modèle hydraulique d'une part et l'utilisation de la CAB 500 d'autre part, ont permis la mise au point d'un ouvrage hydraulique de forme très complexe.

Dans une première phase, la solution optimale a été approchée empiriquement sur modèle de façon à adapter la forme hydraulique de l'ouvrage à la fonc-

tion pour laquelle il était destiné et sans pour cela être prisonnier d'une définition *a priori*.

En deuxième phase, une définition mathématique a été établie à l'aide de la CAB 500, approchant le mieux possible la forme empirique trouvée sur le modèle et permettant le calcul des coordonnées de coffrage nécessaire à la réalisation correcte de l'ouvrage.

Discussion

Président : M. CHAPOUTHIER

Considération sur les déchargeurs en exploitation et en projet des usines de la Basse-Durance, par R. LONGUEMARE et M. PUGNET;

Essais sur modèle réduit et étude d'une définition mathématique de l'ouvrage de dissipation d'énergie du déchargeur de Saint-Chamas, par R. LONGUEMARE.

Ces deux communications formant un ensemble, M. le Président juge préférable de les entendre l'une à la suite de l'autre et d'avoir une discussion commune.

DISCUSSION :

M. le Président remercie MM. LONGUEMARE et PUGNET de leurs exposés et leur demande si, pour la définition de la surface, ils ont été guidés par des commodités de coffrage ou de gabarit. La simplification de l'exécution n'est-elle pas entrée en jeu dans la détermination de cette surface?

M. LONGUEMARE répond qu'il n'en n'est pas ainsi. La cuillère a été réalisée sur le modèle par des gabarits métalliques très précis, définis selon les rayons polaires de la surface et noyés dans le béton.

Pour l'ouvrage réel, on ne peut évidemment procéder de la même façon; les coffrages seront réalisés à l'aide de cerces radiales selon la technique habituelle en génie civil.

M. THIRRIOR demande les raisons de l'implantation des trois cheminées d'équilibre de Saint-Chamas.

M. LONGUEMARE répond que la solution avec cheminée d'équilibre correspond à l'optimum économique de la chute: la très grande longueur des conduites d'amenée aurait nécessité, pour limiter les surpressions et les survitesses, un enfoncement considérable de l'usine vers l'amont et un avancement en remblai vers l'aval de la chambre d'eau.

M. LAZARD craint qu'à partir de l'énorme intumescence (27 m), visible sur les figures projetées, au-dessus de l'étang

de Berre, des embruns soient projetés sur la route, située assez près, et gênent la circulation.

M. LONGUEMARE répond que par vent de mistral, soufflant du nord-nord-ouest (le plus fréquent), les embruns seront entraînés vers l'étang de Berre; par contre, par vent de sud (fréquence plus faible), les embruns seront rabattus vers l'usine, mais il ne faut pas oublier que la fréquence de fonctionnement du déchargeur, au débit maximal où les embruns seront le plus à craindre, est très faible, en exploitation normale de l'usine.

M. le Président a remarqué, parmi les photographies projetées par M. PUGNET, celle des intumescences des ondes permanentes qui se produisent. Les mathématiciens ont-ils étudié ces ondes? Ne posent-elles pas de problèmes intéressants l'hydrodynamique?

M. PUGNET indique que des études ont été faites, mais pas de façon systématique. On rencontre parfois ces ondes dans les canaux à forte pente quand il y a une courbure ou un changement de pente.

M. TIXERONT pense que les ondes stationnaires, dont on a eu de la peine à se débarrasser à Saint-Chamas, sont dues au manque de symétrie de l'alimentation du déchargeur par les pertuis et le déversoir. Ne pourrait-on envisager la symétrisation de la prise?

M. PUGNET répond qu'effectivement la solution de Saint-Chamas est une solution de symétrisation, puisque la vidange de fond, au lieu d'être placée latéralement, a été placée en-dessus.

Pour corriger la dissymétrie, on aurait pu aussi envisager une solution qui aurait consisté à injecter dans le plafond du canal de déversement la veine de vidange. Mais les prix de revient auraient sans doute été plus élevés.

M. le Président remercie à nouveau MM. LONGUEMARE et PUGNET.